Université Sorbonne Paris Cité

Thèse de doctorat
de l'Université Sorbonne Paris Cité
Préparée à l'Université Paris Diderot
École doctorale Savoirs scientifiques (ED 400)
Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR)

Le langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau entre registre empirique et registre des modèles : une problématique de l'enseignement-apprentissage de la chimie

Une reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques

Par Sophie Canac

Thèse de doctorat de didactique des disciplines, chimie

Dirigée par Isabelle Kermen

Présentée et soutenue publiquement à Paris-Diderot le 8 décembre 2017

M. Ludovic Morge, professeur, Université Clermont-Auvergne	Président du jury et rapporteur
M. Philippe Snauwaert, professeur, Université de Namur (Belgique)	Rapporteur
Mme Patricia Crépin-Obert, maître de conférences, UPEC	Examinatrice
Mme Mercè Izquierdo-Aymerich, professeure émérite, Université autonome de Barcelone (Espagne)	Examinatrice
Mme Laurence Lecamp, professeure, Université de Rouen	Examinatrice
Mme Isabelle Kermen, maître de conférences HDR, Université d'Artois	Directrice de thèse

Except where otherwise noted, this work is licensed under
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/
[Insérer le logo correspondant à la licence choisie]

Titre : Le langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau entre registre empirique et registre des modèles : une problématique de l'enseignement-apprentissage de la chimie

Résumé :
Cette recherche, s'appuyant sur les spécificités du langage symbolique de la chimie, propose une reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences. Celle-ci doit permettre d'introduire les formules chimiques en créant une dialectique entre le registre des représentations, le registre empirique et le registre des modèles. La thèse se structure en trois parties :

- une enquête préalable permettant d'identifier les difficultés liées à l'apprentissage du langage symbolique, à partir d'un questionnaire auprès de 600 élèves, et à l'enseignement du langage symbolique de la chimie à partir de deux études de cas d'enseignants dans leur classe ;
- une enquête de nature historique donnant accès à l'évolution des représentations utilisées en chimie et aux différentes controverses qui ont traversé la première moitié du XIXe siècle au moment de l'élaboration des formules chimiques ;
- l'élaboration de ressources, à partir des controverses repérées dans l'enquête historique et analysées à partir d'espaces de contraintes et nécessités, puis la présentation de leur mise en œuvre réalisée par deux enseignants avec leurs élèves.

Mots clefs :
Didactique de la chimie, langage symbolique de la chimie, difficultés des élèves, pratiques des enseignants, histoire des sciences, reconstruction didactique, espace des contraintes et nécessités

Title
The symbolic language of chemistry as a meta-level between empirical registry and model registry: a problem of teaching-learning of chemistry

Abstract
This research focuses on the specificities of the symbolic language of chemistry and proposes a didactic reconstruction based on the history of science. The didactic reconstruction should lead to introduce the chemical formulas by creating a dialectic between the empirical register, the register of models and the register of representations. The thesis is structured in three parts:

- a preliminary survey to identify students' difficulties related to the learning of symbolic language and the difficulties of teachers at the moment when they introduce this symbolic language. For this investigation, six hundred students responded to a questionnaire and two teachers were followed in their class;
- a historical inquiry giving access to the evolution of representations in chemistry and to controversies about the development of chemical formulas in the first half of the nineteenth century;
- the development of didactic resources based on historical controversies pointed out by the historical investigation. These are analyzed from spaces of constraints and necessities. Finally, these resources are implemented by two teachers with their students.

Keywords :
Didactics of chemistry, symbolic language of chemistry, student's difficulties, teacher's practices, history of sciences, didactic reconstruction, space of constraints and necessities

Le philosophe se console aisément. Il admire le symbolisme lorsqu'il marche et le rejette quand il ne marche pas. Il est tout près, au moindre échec, de conclure : après tout, il ne s'agissait que de représentation. […] Les chimistes sont plus exigeants. Ils ont toujours la pensée que les symboles doivent retrouver quelques aspects de la réalité. Précisément, ils les réfèrent à la réalité. Cette attitude d'un symbolisme appliqué réclame, outre la cohérence logique des symboles, une efficience expérimentale. Les chimistes peuvent sans doute s'entendre comme tout le monde, sur des conventions. Mais leurs conventions se chargent, à l'application, de coefficients réalistiques différents. (Bachelard, 2010)

La chimie moderne s'est constituée en même temps que son « langage ». Il lui faut presque un siècle pour s'élaborer et il paraît aujourd'hui complétement « naturel », ceci étant sans doute lié à son « apparente » simplicité. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993)

Remerciements

Je remercie vivement Ludovic Morge et Philippe Snauwaert d'avoir accepté d'être rapporteur de ce mémoire et d'avoir autorisé la soutenance, ainsi que Patricia Crepin-Obert, Mercè Izquierdo-Aymerich, venue spécialement de Barcelone, et Laurence Lecamp de participer au jury.

Je remercie l'ESPÉ et l'université Paris-Est Créteil de m'avoir accordé pendant trois ans une décharge pour me permettre de réaliser ce travail.

Celui-ci n'aurait jamais existé sans deux rencontres essentielles. J'ai eu tout d'abord la chance, à la fois professionnellement et amicalement, de travailler à l'IUFM avec Laurence Maurines et Monique Couchouron. Elles m'ont initiée à la recherche en didactique et encouragée dans cette voie.

J'ai croisé pour la première fois Cecile de Hosson et Isabelle Kermen au cours de mon DEA. Quelques années plus tard j'ai repris contact avec elles pour leur présenter ce sujet. Leur accueil et leur enthousiasme ont fait tomber tous les doutes que je pouvais encore avoir. Je ne regrette pas ce choix. Travailler à leurs côtés a été une expérience riche tant sur le plan humain que sur le plan scientifique. Merci Cécile pour ton soutien tout au long de ce travail, pour tes conseils toujours précieux, et pour la dynamique que tu apportes au laboratoire. Un très grand merci Isabelle pour ton accompagnement, ta disponibilité et ta réactivité à chaque relecture. Ta rigueur scientifique et ton analyse critique, toujours justifiée et toujours constructive, m'ont permis de progresser et de comprendre ce que signifie faire de la recherche. Une complicité à la fois intellectuelle et amicale s'est construite au cours de nos nombreux échanges. Je souhaite qu'elle puisse continuer.

Mes remerciements vont également vers l'équipe du laboratoire de didactique André Revuz et pour les échanges toujours fructueux pendant les séminaires et les différents groupes de travail. Le groupe jeune chercheur tient une place particulière en créant une entraide entre les doctorants. Celle-ci est indispensable dans les moments de découragement et de doute. Je pense à tous les doctorants et tous les chercheurs qui prennent sur leur temps pour faire vivre ce groupe, pour partager leurs « trucs et astuces », leur expérience ou tout simplement leur bonne humeur. Alice, Assia, Charlotte, Julie, Robin, Valentin et bien d'autres, à tous un grand merci.

Merci aux collègues de l'ESPÉ qui ont dû reprendre une partie de mes cours et qui ont dû s'adapter à mon manque de disponibilité, cela sans jamais aucun reproche. Tous vos encouragements ont été très précieux. Je tiens tout particulièrement à remercier Brigitte Marin qui a consacré plusieurs soirées à la recherche des dernières « coquilles » alors que la direction de l'ESPÉ occupe déjà pleinement tout son temps, et qui m'a fait bénéficier de « son réseau » de correcteurs. Grâce à cette aide, de nombreuses améliorations orthographiques et stylistiques ont pu être apportées au manuscrit. Mais j'ai surtout été sensible aux appels quotidiens pendant les périodes de rédaction de la dernière année. Ils m'ont souvent permis de garder la tête hors de l'eau. Brigitte, je mesure la chance que j'ai de travailler à tes côtés.

Enfin, la thèse n'aurait pas pu aboutir sans le soutien et la patience de ma famille et de mes amis proches. Ils ont supporté mes sautes d'humeur et mon indisponibilité ces cinq dernières années. Ils ont toujours répondu présent quand j'avais besoin de me changer les idées. Vos messages et vos appels d'encouragements dans la dernière ligne droite m'ont chaque fois redonné le petit coup d'énergie indispensable pour tenir jusqu'au bout.

J'ai terminé ce manuscrit le jour de la date d'anniversaire de ma mère. Elle ne comprenait pas bien dans quoi je m'étais lancée mais je crois qu'elle aurait été fière du résultat final.

Je lui dédie ce travail.

Table des matières

REMERCIEMENTS **5**

INTRODUCTION **11**

PREMIÈRE PARTIE : ENJEUX DE LA RECHERCHE **17**

CHAPITRE 1 : LE REGISTRE SYMBOLIQUE DE LA CHIMIE **18**
1. ÉLABORATION DE LA NOMENCLATURE, DES SYMBOLES ET DES FORMULES CHIMIQUES 18
2. LES REPRÉSENTATIONS SYMBOLIQUES EN CHIMIE : LANGUE OU LANGAGE ? 20
3. LES REGISTRES ET NIVEAUX DE LA CHIMIE 26
CHAPITRE 2 : CONCEPTS EN CHIMIE ET LANGAGE SYMBOLIQUE **33**
1. QU'EST-CE QU'UN CONCEPT ? 34
2 LES CONCEPTS EN CHIMIE EN LIEN AVEC LE LANGAGE SYMBOLIQUE : REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES 37
3. DIFFICULTÉS D'APPRENTISSAGE DU LANGAGE SYMBOLIQUE 43
4. UNE PROGRESSION TENANT COMPTE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE SYMBOLIQUE 46
CHAPITRE 3 : CADRES MÉTHODOLOGIQUES **54**
1. ENSEIGNER LE LANGAGE SYMBOLIQUE PAR L'HISTOIRE DES SCIENCES : UNE RECONSTRUCTION DIDACTIQUE 54
2. POUR L'ANALYSE DE L'ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE SYMBOLIQUE : LA PROBLÉMATISATION 60
3. POUR L'ANALYSE DES PRATIQUES ENSEIGNANTES : LA DOUBLE APPROCHE DIDACTIQUE ET ERGONOMIQUE 67
CHAPITRE 4 : PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE **74**
1. PROBLÉMATIQUE 74
2. QUESTIONS DE RECHERCHE 77

PARTIE 2 : ENQUÊTES PRÉALABLES **83**

CHAPITRE 1 : LE CONTEXTE INSTITUTIONNEL **84**
1. LES PROGRAMMES 84
2. ANALYSE DES OUVRAGES SCOLAIRES DE CINQUIÈME ET QUATRIÈME 90
3. CONTEXTE INSTITUTIONNEL : CONCLUSION 103
CHAPITRE 2 : L'ENQUÊTE DIDACTIQUE : ÉLÈVE ET LANGAGE SYMBOLIQUE **103**
1. OBJECTIF DU QUESTIONNAIRE 103
2. MÉTHODOLOGIE 104
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 119
4. LES DIFFICULTÉS ÉLÈVES : CONCLUSION 146
CHAPITRE 3 : CE QUE DISENT ET FONT LES ENSEIGNANTS **148**
1. UN QUESTIONNAIRE ENSEIGNANT 148
2. OBSERVATION DE DEUX SÉANCES DE CLASSE « ORDINAIRES » 152
3. CE QUE DISENT ET FONT LES ENSEIGNANTS : CONCLUSION 221
CONCLUSION PARTIE 2 ..... **223**

PARTIE 3 : ENQUÊTE HISTORIQUE **225**

INTRODUCTION **226**
CHAPITRE 1 : ÉLABORATION DU LANGAGE **227**
1. AVANT LAVOISIER : LE PASSAGE À UNE SCIENCE 228

2. Lavoisier ou l'élaboration d'une nomenclature 229
3. Les formules de Dalton 231
4. Les formules de Berzelius 238
5. Les formules des organiciens 244
Chapitre 2 : La formule chimique au cœur des débats 259
1. Une même formule mais plusieurs interprétations 259
2. Des controverses 276
3. Une formule macroscopique ou microscopique ? 289
Conclusion de l'enquête historique 292

PARTIE 4 RECONSTRUCTION DIDACTIQUE 295

Introduction 296
Chapitre 1 Apport de l'enquête historique pour l'élaboration des ressources 296
1. Regards croisés enquêtes historiques et enquêtes didactiques 296
2. Histoire des sciences pour le *media* : les raisons de l'élaboration des formules chimiques 302
Chapitre 2 : Élaboration des ressources 322
1 Choix des ressources 323
2. Les scénarios 327
Chapitre 3 : Premières utilisations des ressources 340
1. Comparaison intra-personnelle avec ou sans les ressources 341
2 Utilisation des dialogues par un enseignant 356
Conclusion partie 4 367

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES 369

Conclusion 369
Une enquête institutionnelle 369
Une enquête auprès des élèves 370
Une enquête sur les pratiques des enseignants 370
Une enquête historique 371
L'élaboration et les premières utilisations du *media* 372
Perspectives de recherche 373
Les élèves peuvent-ils construire des raisons ? 373
La formation des enseignants 374
L'élaboration d'un nouveau curriculum 375

BIBLIOGRAPHIE 377

Sources primaires historiques 377
Programmes et ouvrages scolaires 379
Bibliographie générale 380

TABLE DES ILLUSTRATIONS 399

Figures 399
Graphiques 401
Photos 402
Tableaux 403

TABLE DES ANNEXES.....405

ANNEXES DE 1 À 14 : PARTIE 2 409

ANNEXES 1 : PROGRAMMES 2008 DE CHIMIE AU COLLÈGE 410

ANNEXES 2 : EXTRAITS D'OUVRAGES SCOLAIRES 417

ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE ÉLÈVES.....424

ANNEXES 4 : ENTRETIENS EXPLORATOIRES : PROTOCOLES ET TRANSCRIPTIONS 427

ANNEXES 5 : RÉSULTATS QUESTIONNAIRE ÉLÈVES 436

ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE ENSEIGNANT.....448

ANNEXE 7 : PRÉSENTATION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 1 (MATHIEU) 450

ANNEXE 8 : PRÉSENTATION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 2 (AUDE) 452

ANNEXE 9 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 1 (MATHIEU) 453

ANNEXE 10 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 2 (AUDE).....474

ANNEXE 11 : DOCUMENTS DONNÉES AUX ÉLÈVES (SÉANCE 2 AUDE).....493

ANNEXE 12 : ENTRETIEN 1 AVEC MATHIEU 495

ANNEXE 13 : ENTRETIEN 2 AVEC AUDE 503

ANNEXE 14 : GRAPHES EN AIRE POUR L'ANALYSE DES SÉANCES.....508

ANNEXES DE 15 À 19 : PARTIE 3 509

ANNEXES 15 : ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE — AVANT LAVOISIER 510

ANNEXES 16 : ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE — LAVOISIER 518

ANNEXES 17 : DALTON ET BERZELIUS 534

ANNEXES 18 : LES ORGANICIENS 543

ANNEXES 19 : LES ÉQUIVALENTISTES.....550

ANNEXES DE 20 À 29 : PARTIE 4 553

ANNEXE 20 : UNE PROPOSITION DE SÉQUENCE AVEC LES GAZ 554

ANNEXES 21 : LES EXTRAITS DE TEXTE HISTORIQUE DU SCÉNARIO 1 555

ANNEXES 22 : LES DIALOGUES.....560

ANNEXE 23 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE 3 À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES (MATHIEU) ..566

ANNEXE 24 : ENTRETIEN 3 AVEC MATHIEU 586

ANNEXES 25 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 3 (MATHIEU) 594

ANNEXE 26 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 4.1 (BENJAMIN) 596

ANNEXE 27 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 4.2 (BENJAMIN) 598

ANNEXE 28 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE 4.1 À PARTIR DES DIALOGUES HISTORIQUES (BENJAMIN) 603

ANNEXE 29 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE QUATRIÈME.....613

ANNEXE 30 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE QUATRIÈME 617

ANNEXE 31 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE TROISIÈME.....638

ANNEXE 32 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE TROISIÈME 643

ANNEXE 33 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE SECONDE 667

ANNEXE 34 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE SECONDE 670

Introduction

Les premières questions dans les exercices sur l'estérification de baccalauréat S demandent souvent aux élèves de retrouver à partir de la formule semi-développée l'alcool et l'acide carboxylique qui ont permis sa synthèse. Ce qui pourrait sembler sans difficulté — ce point étant largement repris par les enseignants pendant l'année de terminale —, bloque pourtant un nombre non négligeable d'élèves. Les enseignants sont alors toujours surpris des échecs à ce type de question.

> *J'ai souvent été frappé du fait que les professeurs de sciences, plus encore que les autres si c'est possible, ne comprennent pas qu'on ne comprenne pas. (Bachelard, 1967, p. 21)*

Fensham (2002) reprenant les travaux de Johnstone et Kellett indique que bon nombre d'élèves essaient de lire les formules de gauche à droite comme ils liraient habituellement. Mais les conventions symboliques en chimie organique présentent généralement le groupe fonctionnel, la plus importante partie de la formule, à l'extrémité droite de la formule. Avant d'arriver à la lecture de cette partie, l'élève est déjà en surcharge d'informations. Ces chercheurs font ressortir les complexités d'apprentissage dans ce domaine très symbolique de la chimie. Marais et Jordaan (2000) montrent qu'il faudra aux étudiants au moins treize étapes d'interprétation de l'ensemble des symboles de l'équation donnée dans l'énoncé (Figure 1) avant de pouvoir répondre aux questions d'un problème portant sur la préparation de l'ammoniac par le procédé Haber.

Ammonia is prepared using the Haber process, which is based on the reaction of hydrogen and nitrogen according to the following equilibrium reaction:

$$N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g) \qquad \Delta H < 0$$

How will the equilibrium be affected if
(i) the temperature is increased;
(ii) the pressure is increased?

Figure 1 Exemple de problème typique d'équilibre chimique (Marais & Jordaan, 2000, p. 135)

Les chimistes comme les mathématiciens, ainsi que l'a montré Duval (1993), sont amenés à utiliser des représentations pour les objets qu'ils sont censés « manipuler » sur le papier, objets qui sont pour la plupart non directement accessibles aux sens. Un élève de collège ou de lycée va rencontrer au cours de sa scolarité, en plus du nom et de la formule brute, huit

autres représentations possibles pour la même substance chimique, comme dans le cas du butane, ci-dessous (Figure 2).

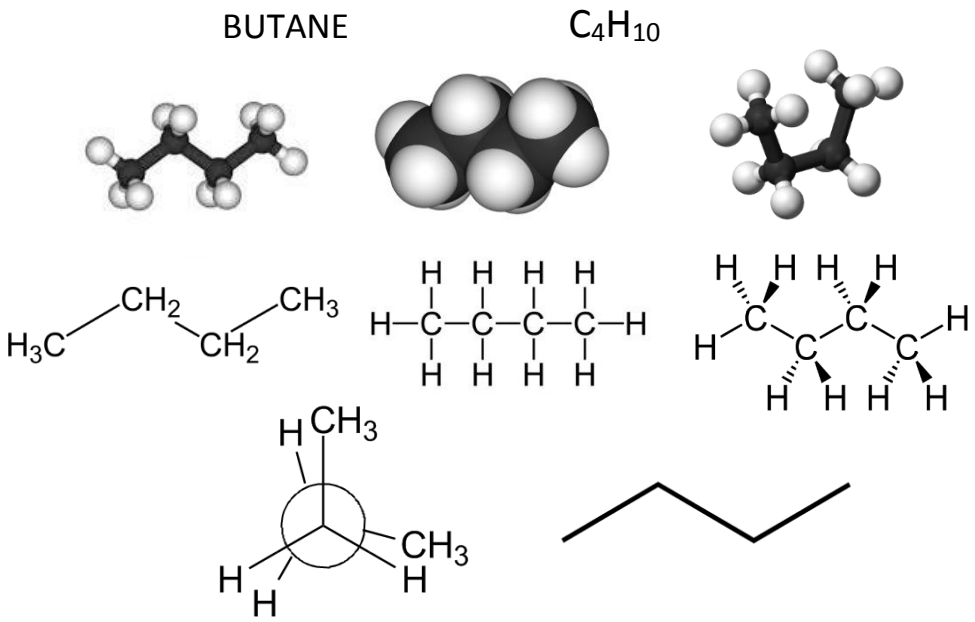


Figure 2 Les différentes représentations du butane dans les ouvrages scolaires du second degré

Un élève va donc utiliser dix signifiants pour un signifié, dix registres sémiotiques avec chacun ses propres règles et véhiculant ses propres informations (Le Maréchal & Cross, 2010). On pourrait malgré tout penser qu'un langage scientifique est un outil de communication « efficace », et qu'à chaque signifiant est associé un signifié et un seul, ce qui pourrait alors aider les élèves, mais le même symbole C peut tout aussi bien signifier l'élément chimique, l'atome de carbone ou l'espèce chimique. Comme les mots d'un langage « naturel », le signifié d'un symbole ou d'une formule dépend alors du contexte. Le même symbole C, qui apparaît deux fois dans l'équation de combustion du carbone ($C + O_2 = CO_2$), prend deux significations différentes. Le « C » seul du début de l'équation représente le solide graphite mais il est l'atome de carbone dans la formule « CO_2 ». On retrouve avec le nom ce qui pourrait encore être considéré dans un premier temps comme des ambiguïtés. Dans les quatre exemples ci-dessous, le carbone n'a pas la même signification :

- exemple 1 : l'éthène contient du carbone ;
- exemple 2 : le carbone brûle dans le dioxygène ;
- exemple 3 : le carbone a 4 électrons dans l'orbitale hybride sp^3 ;
- exemple 4 : le carbone diamant contient des liaisons covalentes.

L'interprétation des noms, des symboles et des formules chimiques nécessite alors une véritable enquête pour pouvoir y associer le « bon » signifié.

> *C'est un processus qui se déroule dans l'esprit de l'inter-prète : il débute avec la perception du signe et se termine avec la présence à son esprit de l'objet du signe. C'est un processus inférentiel. […]. Il s'agit d'une sorte d'enquête dont nous sommes le plus souvent inconscients dans la vie quotidienne car sa répétition à tout instant a créé en nous des habitudes d'interprétation quasiment instantanée. (Marty & Marty, 1992)*

On peut alors s'interroger sur les significations qu'un élève donne aux différentes représentations utilisées en chimie. Quand un enseignant de chimie utilise la lettre C, il y voit immédiatement le carbone, et suivant le contexte, sa signification macroscopique ou microscopique. Le novice risque de n'y voir que la troisième lettre de l'alphabet en écriture d'imprimerie.

> *L'utilisation d'un signe sans explication par un enseignant peut référer à la fois aux concepts macroscopiques et aux concepts microscopiques alors qu'un élève ne peut y voir qu'une lettre ou un chiffre sans aucun lien avec le phénomène chimique observé. (Dehon & Snauwaert, 2015)*

Les représentations sémiotiques, « *productions constituées par l'emploi de signes appartenant à un système de représentation qui a ses contraintes propres de signifiance et de fonctionnement* » (Duval, 1993, p. 39), sont indispensables pour toutes communications en chimie mais pas seulement. Comme pour les mathématiques, elles sont essentielles « *pour l'activité cognitive de la pensée* » (Duval, 1993, p. 39). La nature des transformations nécessaires pour pouvoir s'approprier les connaissances dans le domaine des sciences physiques doivent intervenir « *à la fois sur le plan des opérations de pensée, sur celui des concepts et des classes de problèmes auxquels ils s'appliquent, et enfin sur celui des systèmes de représentation symbolique* » (Weil-Barais, 1994, p. 443). L'appréhension conceptuelle d'un objet, la « *noésis* », est intimement liée à l'appréhension de sa représentation sémiotique, le « *sémiosis* » (Duval, 1993). Or l'enseignement des systèmes de représentation est souvent considéré comme secondaire face à celui des concepts.

> *Le paradoxe cognitif de la pensée mathématique, et les difficultés qui en résultent pour son apprentissage tiennent au fait qu'**il n'y a pas de noésis sans sémiosis** alors qu'on veut enseigner les mathématiques comme si la sémiosis était une opération négligeable par rapport à la noésis. (Duval, 1993, 40)*

En 1994 (p. 50), Barlet et Plouin proposaient déjà pour améliorer l'enseignement de la chimie de travailler autour des représentations symboliques de la chimie « *de façon à réduire les zones d'ombres et d'imprécisions et à permettre une meilleure appropriation des concepts utilisés* ». Mais une difficulté vient encore s'ajouter à la chimie que ne connaissent sans doute ni les mathématiques ni la physique. Le symbole « C » est tout aussi bien le concept atome au niveau microscopique que l'espèce chimique au niveau macroscopique. Les noms, les symboles et les formules chimiques permettent de circuler entre les concepts et la réalité et entre le microscopique et le macroscopique.

Nous pensons alors que l'enseignement des registres sémiotiques en lien avec le registre des modèles développés en chimie et avec le registre empirique est un problème essentiel pour l'enseignement de celle-ci et qu'il est encore à développer. Nous souhaitons nous intéresser à l'introduction des noms et des formules brutes, première étape des dix représentations de la Figure 2, dans l'enseignement de la chimie en France. Nous voulons montrer comment cet enseignement peut se faire en dialectique avec celui des concepts de la chimie et son registre empirique. Nous pensons que l'élaboration des formules chimiques par les élèves doit permettre de favoriser l'apprentissage des concepts de molécules et d'atomes au niveau microscopique et d'espèces chimiques au niveau macroscopique. Nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de textes historiques pour l'élaboration d'une séquence d'enseignement sur la formule brute en classe de quatrième peut devenir le support didactique qui semble pour l'instant manquer aux enseignants. Nous envisageons pour cela une reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences (de Hosson, 2011). Martinand en 1992 (p. 8‑9) indiquait qu'il souhaitait « *se donner les moyens de transformer les contenus et les activités d'enseignement et d'apprentissage* ». Pour cela, il suggérait « *un réexamen des domaines de connaissance* », « *une critique des programmes et des manuels* », « *des enquêtes sur les idées des élèves* », « *l'essai et l'évaluation de projets d'enseignement en classe* » et « *une attention aux difficultés rencontrées par les enseignants* ». Nous souhaitons donc mener ce travail au cours de la thèse que nous structurons en quatre parties. Dans la première partie, nous souhaitons préciser les enjeux de la recherche en montrant notamment les spécificités des représentations en chimie et leurs liens avec les concepts de la chimie. Nous indiquerons pour quelles raisons nous envisageons une reconstruction didactique et nous utiliserons le cadre de la problématisation (Orange, 2000) et le cadre de la double approche (Robert & Rogalski, 2002). Dans la deuxième partie, nous procéderons aux enquêtes préalables permettant

d'élaborer cette reconstruction didactique : les contraintes institutionnelles et les difficultés repérées des élèves à propos de l'interprétation des noms et des formules. Nous irons également regarder ce que font les enseignants quand ils doivent introduire les formules chimiques. La reconstruction didactique étant fondée sur l'histoire des sciences, nous étudierons dans la troisième partie comment le langage symbolique de la chimie s'est élaboré et les controverses qui ont marqué cette élaboration. Dans la quatrième partie, nous croiserons les résultats des deux premières pour élaborer des ressources didactiques. Nous présenterons les premières utilisations de ces ressources par des enseignants mais nous restons persuadée qu'elles devraient surtout servir la formation des enseignants de chimie. Nous souhaitons que ce travail puisse fournir des outils aux enseignants pour leur travail en classe, mais que cela puisse également servir à leur formation.

Première partie : Enjeux de la recherche

CHAPITRE 1 : LE REGISTRE SYMBOLIQUE DE LA CHIMIE 18
1. ÉLABORATION DE LA NOMENCLATURE, DES SYMBOLES ET DES FORMULES CHIMIQUES 18
2. LES REPRÉSENTATIONS SYMBOLIQUES EN CHIMIE : LANGUE OU LANGAGE ? 20
2.1 La nomenclature 20
2.2 Les formules chimiques 21
2.3 Langue ou langage ? 24
3. LES REGISTRES ET NIVEAUX DE LA CHIMIE 26
3.1 Registre empirique et registre des modèles dans la recherche en France 26
3.2 Registre du langage symbolique : un méta-niveau 30
CHAPITRE 2 : CONCEPTS EN CHIMIE ET LANGAGE SYMBOLIQUE 33
1. QU'EST-CE QU'UN CONCEPT ? 34
2 LES CONCEPTS EN CHIMIE EN LIEN AVEC LE LANGAGE SYMBOLIQUE : REPRÉSENTATIONS DES ÉLÈVES 37
2.1 Concept macroscopique : substance pure, corps pur ou espèce chimique 38
2.2 Concepts microscopiques : hypothèses des élèves à propos des structures de la matière 40
2.3 Concepts de transformation chimique et réaction chimique 41
3. DIFFICULTÉS D'APPRENTISSAGE DU LANGAGE SYMBOLIQUE 43
3.1 Un bilan des difficultés des élèves 43
3.2 Des enseignants qui n'ont pas conscience des difficultés 45
4. UNE PROGRESSION TENANT COMPTE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE SYMBOLIQUE 46
4.1 Des propositions de progression dans les travaux de recherche 46
4.2 Créer une dialectique entre langage symbolique et concepts de la chimie 48
CHAPITRE 3 : CADRES MÉTHODOLOGIQUES 54
1. ENSEIGNER LE LANGAGE SYMBOLIQUE PAR L'HISTOIRE DES SCIENCES : UNE RECONSTRUCTION DIDACTIQUE 54
1.1 Histoire des sciences et didactique des sciences 54
1.2 Choix et utilisation des ressources historiques 56
1.3 Le cadre de la reconstruction didactique 58
2. POUR L'ANALYSE DE L'ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE SYMBOLIQUE : LA PROBLÉMATISATION 60
2.1 Problème et problématisation dans l'activité scientifique et dans l'activité pédagogique 61
2.2 Espace des contraintes 62
2.3 Pour l'analyse du corpus historique : un espace des contraintes et nécessités pour le langage symbolique de la chimie 65
2.4 Pour l'élaboration du « media » 66
3. POUR L'ANALYSE DES PRATIQUES ENSEIGNANTES : LA DOUBLE APPROCHE DIDACTIQUE ET ERGONOMIQUE 67
3.1 Recherche des régularités et variabilités 68
3.2. Une démarche pour aborder l'activité de l'enseignant 69
3.3. Trois niveaux d'analyse 72
3.4 Les cinq composantes 72
CHAPITRE 4 : PROBLÉMATIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE 74
1. PROBLÉMATIQUE 74
2. QUESTIONS DE RECHERCHE 77
2.1 Partie 2 : les enquêtes préalables 78
2.2 Partie 3 : l'enquête historique 79
2.3 Partie 4 : la reconstruction didactique 80

Chapitre 1 : Le registre symbolique de la chimie

Les noms, les symboles, les formules sont plus qu'un outil de représentation. Ils font progresser la science.

> *Les signes dénotent les idées et il existe une algèbre à la fois nécessaire et harmonieuse, qui leur confère leur liaison interne. La science n'est rien d'autre que la recherche de cette algèbre, de cette combinatoire qui rend les mots aptes à dire les choses. (Laszlo, 1993, p. 31)*

Nous allons dans ce chapitre brièvement présenter l'élaboration du registre symbolique de la chimie et montrer que celui-ci peut être considéré comme un langage. Puis nous présenterons la place des modèles en chimie en lien avec le registre empirique et la place particulière du langage symbolique.

1. Élaboration de la nomenclature, des symboles et des formules chimiques

La chimie est considérée comme une science à partir du XIXe siècle. C'est alors l'expansion des connaissances empiriques et des théories chimiques et cela se fait de concert avec l'élaboration d'un « langage » qui va porter ces nouvelles découvertes. Se développent alors la nomenclature, les symboles, les formules et les équations en lien avec l'évolution des nouvelles théories. Le « langage » de la chimie, en véhiculant les nouvelles théories, est un élément essentiel du processus de développement de la chimie du XIXe siècle. Lavoisier est à l'origine « *de la révolution chimique sémantique et ordinatrice* » (Dagognet, 2002, p.7). Avant celui-ci, la « langue » et la chimie ne fonctionnent pas ensemble (Laszlo, 1993). Dans la première moitié du XIXe siècle, trois temps forts se dégagent dans l'élaboration des représentations symboliques en lien avec le développement des connaissances empiriques et l'apparition des nouvelles théories de la matière :

- l'élaboration d'une nomenclature par Lavoisier s'appuyant sur le concept de « simple », ou substance indécomposable, et sur les expériences de laboratoire de composition et de décomposition des substances. L'eau, notamment, perd son statut d'élément. La nomenclature s'élabore contre la théorie du phlogistique et ouvre la voie à la chimie en tant que science. Lavoisier est conscient que la nouvelle nomenclature est une véritable révolution plutôt qu'une réforme, une rupture brusque et douloureuse avec le passé (Sliwka, 2003) ;

- l'élaboration des symboles et d'une arithmétique par Berzelius en lien avec la théorie atomique et les combinaisons fixes des atomes. Les chimistes vont traduire les expériences faites en laboratoire par des équations chimiques écrites au moyen de formules (Laugier, 1998, p. 163) ;

- l'élaboration des formules développées avec l'explosion de la chimie organique et en lien avec le concept de molécules et d'arrangement des atomes dans la molécule. Pour les chimistes comme Laurent, Couper ou Boutlerov la structure chimique devient la source des propriétés chimiques des composés. « *La nature chimique d'une molécule composée dépend de la nature, de la quantité de ses constituants élémentaires et de sa structure chimique* » (Kluge & Larder, 1971, p. 290). L'écriture de ces structures moléculaires planes sur une feuille de papier a servi d'auxiliaire puissant pour les chimistes dans l'interprétation des réactions chimiques (Dumon & Luft, 2008, p. 12).

> *On n'est pas juste devant la notion de formule développée en disant qu'une telle formule est une représentation conventionnelle ; c'est plutôt une présentation qui suggère des expériences. […] La formule développée est un substitut rationnel qui donne, pour l'expérience, une comptabilité claire des possibilités. Il y a dès lors des expériences chimiques qui apparaissent a priori impossibles parce qu'elles sont interdites par les formules développées. […] Vice versa, il y a des expériences qu'on n'aurait jamais songé à réaliser, si l'on n'avait pas prévu a priori leur possibilité en se confiant aux formules développées. On raisonne sur une substance chimique dès qu'on en a établi une formule développée. On voit donc qu'à une substance chimique est associé désormais un véritable noumène. (Bachelard cité par Lecourt, 2002, p. 78-79)*

Ce système de représentations a permis de significatives avancées entre 1820 et 1850 (Klein, 2001b). C'est notamment en utilisant le système de Berzelius que Dumas en vient à proposer le concept de substitution (Klein, 2001a). La composition de chaque substance chimique au moyen de lettres et de chiffres « *permet la manipulation formelle des symboles indépendamment de leurs signifiés empiriques, pour autant que le chimiste suive certaines règles générales* » (Laszlo, 1993, p. 12). Les représentations spatiales posées sur le papier peuvent être considérées, ainsi que l'indique Bachelard (2010), comme de véritables hypothèses scientifiques.

> *En posant le schéma du tétraèdre, la chimie classique émettait une hypothèse. (Bachelard, 2010, p. 144)*

Les formules écrites sont de véritables « *outils de papier* » (Klein, 2001b) permettant de réaliser des expériences sur une feuille blanche en lieu et place de la paillasse.

2. Les représentations symboliques en chimie : langue ou langage ?

> *For a chemist, natural signs are whatever can be seen, smelled and felt before, during and after an experiment. This assortment of signs is actively linked to that other group of signs devised by chemists to communicate among themselves - the "language of chemistry". (Weininger, 1998, p. 18 - 19)*

Les symboles en chimie et leurs règles combinatoires constituent un code très ancien (Crosland, 1980). Depuis Dagognet, ce système de représentation est étudié du point de vue sémiologique (Mounin, 1981, p. 216). Peut-on alors le considérer comme une langue ou un langage ?

2.1 La nomenclature

Sliwka (2003) envisage la nouvelle nomenclature comme un exemple de construction de la langue à la manière de Zamenhof, cent ans plus tard, quand il construit l'esperanto. Mestrallet, reprise par (Mounin, 1981, p. 217), propose quatre niveaux distincts dans la nomenclature chimique moderne.

- On trouve en premier lieu les termes de la langue naturelle comme eau ou ammoniac ou des néologismes de l'alchimie tels que l'eau forte ou la teinture de tournesol. Ces noms sont arbitraires, ne donnant aucune indication de la composition chimique de la substance.

- On a ensuite des termes qui combinent à la fois la langue naturelle et des suffixes et préfixes qui vont commencer à donner des indications de structure chimique. On peut citer les noms comme méthane, éthylène, etc. Ces noms ne donnent encore aucune indication sur la composition ou l'arrangement des atomes, par exemple. Au mieux, ils permettent de regrouper et classer.

- Le troisième niveau est qualifié de « *fonctionnel* » (Mestrallet citée par Mounin, 1981, p. 217) avec des exemples tels que le chlorure d'argent, l'acide phosphorique. Ce niveau, en plus du classement, donne des indications sur les propriétés chimiques des substances en faisant apparaître la principale fonction chimique.

- Enfin, le quatrième niveau, ou la nomenclature « *systématique* » (Mestrallet citée par Mounin, 1981, p. 217) permet à partir du nom, tel que 2-méthyl pentane, de retrouver la structure chimique sans aucune ambiguïté.

Mestrallet (Mounin, 1981, p. 218) constate que dans la nomenclature chimique, terme qu'elle propose de remplacer par « *champ sémantique* », les chimistes essaient d'accorder au mieux la signification du nom avec le concept chimique et d'élaborer des noms de façon systématique, ce qui n'est pas forcément le cas dans une langue naturelle. Mais comme dans une langue naturelle, on retrouve de l'arbitraire, par exemple dans le choix des préfixes et des suffixes comme ane, ène, ate, etc. Et enfin, comme toute langue vivante, la nomenclature ne cesse d'évoluer.

> *La nomenclature chimique ne saurait être définitive comme la table des déclinaisons d'une langue morte. Elle est sans cesse rectifiée, complétée, nuancée. Le langage de la science est en état de révolution sémantique permanente. (Bachelard, 2010, p. 209)*

2.2 Les formules chimiques

Les chimistes ont élaboré ce que certains considèrent comme une véritable langue avec un alphabet, une syntaxe et des règles sémantiques. Jacob (2001) effectue un parallèle avec la langue ordinaire, en considérant que :

- les symboles des éléments chimiques figurent l'alphabet ;

- les formules chimiques, élaborées à partir d'associations de symboles, correspondent aux mots ;

- les équations chimiques, enfin, constituent l'équivalent de phrases, puisqu'elles peuvent être vues comme association des « mots » (les formules).

Comme toute langue, celle des chimistes possède un ensemble de règles syntaxiques pour former les mots et les phrases qui sont :

- les règles orthographiques avec par exemple la valence pour les molécules et l'électronégativité pour les ions ;

- des règles de grammaire avec la conservation des éléments chimiques et la conservation de la charge électrique.

Les formules chimiques peuvent être disséquées « *comme s'il s'agissait de vocables* » (Laszlo, 1993, p. 41). Nous pouvons reconnaître dans une formule chimique telle que $(CH_3)_2C_3H_5OH$,

ou dans son nom le 2,2-diméthylpropan-1-ol, les racines, les préfixes et les suffixes comme le ferait un grammairien avec les mots. Dans les formules de la soude (NaOH) et de l'eau (H_2O), le symbole O représente l'atome d'oxygène. Il a bien la même signification, qu'il soit uni avec le sodium ou avec deux hydrogènes. Mais si l'atome d'oxygène est invariant dans ces différentes situations, il l'est sans être tout à fait identique, notamment dans son organisation électronique.

> *Cette transférabilité fait de la manipulation des symboles chimiques une langue très proche du langage usuel. […] Le langage de la chimie est plus qu'un code, il a le « bougé » sémantique d'une langue (Laszlo, 1993, p. 64‑65)*

Cette langue a aussi ses règles sémantiques basées sur l'expérience et sur l'existant, même s'il n'y a aucune ressemblance entre les signes utilisés et les molécules qui sont représentées (Edeline, 2009).

> *Les symboles du chimiste ne sont pas uniquement des « représentations » qui peuvent être jetées quand elles ne fonctionnent plus. Le chimiste y met également de la « réalité ». (Bachelard, 2010, p. 156)*

Une langue scientifique est censée être un système univoque dépouillé de connotations et de significations implicites (Mounin, 1981). Comme dans une langue ordinaire, la signification des « mots » en chimie (les formules) dépend du contexte. Plusieurs signifiés peuvent être associés à un signifiant[1]. Seul le contexte nous permet de dire si la formule H_2O représente une molécule ou une quantité quelconque, un gaz, un liquide ou un solide, un acide ou une base, un nucléophile ou un électrophile (Weininger, 1998, p. 22). Dans l'équation chimique rendant compte de la combustion du carbone : $C(s) + O_2 (g) = CO_2(g)$, la même lettre C symbolise à la fois le graphite quand elle est seule et l'atome de carbone dans la formule du gaz dioxyde de carbone. Dans les deux cas, elle représente également l'élément chimique, ce qui permet d'ajuster l'équation de la réaction.

Le code chimique possède également une véritable flexibilité avec la possibilité d'élision de symboles, les H et C dans les formules organiques, ou le remplacement des chaînes organiques : un R pour les chaînes aliphatiques et un A pour les chaînes aromatiques (Mounin, 1981). Comme dans toutes les langues, on peut observer des variations « régionales» (Taber,

[1] « Pour Ferdinand de Saussure, le signe linguistique est pour ainsi dire double et se compose d'un élément conceptuel (signifié) et d'un élément "expressif" ou d'expression (signifiant) » (Wunderli, 2016, p. 1).

2009). Entre l'organicien et le thermochimiste, les équations ne prennent pas nécessairement la même forme. L'un va préférer des formules semi-développées alors que l'autre travaillera de façon privilégiée à partir des formules brutes. Des choix de représentation peuvent être décidés dans les programmes pour faciliter les apprentissages comme la notion de l'ion HO^- plutôt qu'OH^- facilitant ainsi le repérage de l'atome portant la charge, ces différentes variations sembleront d'une importance mineure pour l'expert mais cela peut s'avérer beaucoup plus difficile pour le novice de distinguer si un symbole légèrement différent est destiné à impliquer une différence dans le signifié (Taber, 2009).

À partir des règles syntaxiques, il est possible de former de nouveaux « mots » (les formules) désignant des espèces chimiques qui n'existent pas. On peut réaliser dans les équations chimiques une infinité de permutations de symboles dont certaines sont correctes et représentent véritablement de la chimie. D'autres sont un non-sens dont certaines respectant bien les règles mais ne reflétant pas de processus chimique connu (Taber, 2009). Les chimistes sont capables à partir de très peu de signes de décrire tout à la fois le réel dans son ensemble mais également de prévoir l'inconnu et l'inexistant.

> *The ability to evoke a fictional world indistinguishable from the real one is another characteristic that the chemical codes shares with natural languages. (Weininger, 1998, p. 23)*

La sémantique chimique est idéalement adaptée pour décrire les relations entre les substances existantes à travers les formules et les équations chimiques. La syntaxe permet aux chimistes de constituer de nouvelles formules pour représenter des substances non encore synthétisées (Kaya & Erduran, 2013, p. 1746).

Weininger (1998, p. 4) considère qu'il est possible d'aborder la langue de la chimie comme une langue ordinaire. Pourtant Jacob (2001) relève quelques écarts. À la différence d'une langue ordinaire, qui semble se construire à partir de conventions et de conceptions plus ou moins rationnelles, la symbolique en chimie n'est pas dépourvue de signification, à l'inverse d'un alphabet « classique ». La formule (ou le nom dans une langue ordinaire) sert à désigner les espèces chimiques, mais pas uniquement. Elle nous permet également de connaître leur composition et parfois leur structure. Jacob (2001, p. 37) compare la formule NaCl au mot tournevis (screwdriver). Nous savons que l'une correspond au sel qui est constitué de sodium et de chlore. L'autre désigne un outil dont nous connaissons par hasard la fonction à l'aide de

la structure du mot mais nous n'avons aucune indication sur sa constitution. Rien ne nous permet d'affirmer qu'il y a un manche et une lame. Mais la compréhension des noms et des formules chimiques, comme dans une langue, dépend des préfixes et des suffixes et de l'ordre des mots (Laszlo, 2011). Dans la nomenclature le marqueur distinctif est souvent à la fin du nom ou de la formule chimique. Les noms et les formules chimiques peuvent également subir de nombreuses combinaisons (Laszlo, 2011). Les familles chimiques partent d'un squelette unique et se dérivent en de nombreuses substances. Laszlo (2011, p. 1697) donne ainsi l'exemple du cycle cyclohexyle qui peut donner le cyclohexane, le cyclohexanol, l'acétate de cyclohexyle, le chlorure de cyclohexyle, etc.

> *Chemistry and language are both combinatorial arts. Combinatorial substitution is indeed a prime mover in chemistry and in linguistics alike. (Laszlo, 2011, p. 1697)*

2.3 Langue ou langage ?

Laszlo (2011, p. 1676) fait le parallèle entre toutes les règles de syntaxe chimiques applicables à l'étude de la structure moléculaire et la science de la linguistique. En premier, il faut observer et formuler une règle puis trouver une raison à cela et enfin chercher des exceptions et les utiliser pour définir le domaine d'application de la règle et ses limites de validité.

> *In like manner chemistry demonstrates its creativity by assembling novel structures from perceived or postulated elements. That these are, to a very large extent, arbitrary figments of the imagination only reinforces the notion of chemistry as a language-infused science. (Laszlo, 2011, p. 1695)*

L'asymétrie entre les règles syntaxiques et sémantiques est la base de la planification de nouvelles réactions. La distinction entre les propriétés syntaxiques et sémantiques du symbolisme chimique permet l'introduction de formules chimiques qui sont syntaxiquement correctes mais n'ont pas (encore ?) un fondement empirique (Jacob, 2001). Pour Mestrallet citée par Weininger (1998, p. 24), le système symbolique chimique a « *subi une évolution parallèle à celle des langues […] parce que les conditions nécessaires pour la communication en chimie sont semblables à celles des langues »*.

Comme une langue, les chimistes ont élaboré un code, système de mots, de symboles et de formules, qui est partagé par l'ensemble de la communauté des chimistes et qui a sa propre histoire.

> *Les langues peuvent se définir comme des systèmes de signes « vivants », dans leurs unités comme dans leurs structures, dans la mesure où elles ont une histoire, inscrite dans l'Histoire des peuples qui les parlent, les imposent, les défendent ou les récusent comme source d'identité culturelle. (Weil-Barais, 1994, p. 232)*

Mais ce code a permis l'élaboration d'un langage. Une définition de la composante individuelle et psychologique du langage est « *la faculté cognitive que possède chaque locuteur compétent d'une certaine langue donnée, qui fait qu'il est capable de produire et comprendre des énoncés* » (Team, s. d.).

> *La propriété essentielle du langage, selon Chomsky, c'est qu'il nous rend capables de produire et comprendre en principe une infinité d'énoncés, à partir d'un nombre fini de mots. (Team, s. d.)*

Le symbolisme de la chimie, comme un langage, participe à la production d'une infinité d'énoncés. Considérer uniquement le registre symbolique de la chimie comme une langue peut entraîner le focus sur le code au cours de son apprentissage.

> *Si on considère plutôt la langue comme un code, l'accent sera mis, de manière privilégiée, sur les unités de « codage » et de transmission définies en elles-mêmes indépendamment des relations qu'elles entretiennent. (Weil-Barais, 1994, p. 233‑234)*

Or, même s'il est indispensable de maîtriser le code, nous souhaitons nous intéresser à la compréhension du langage en lien avec l'apprentissage des concepts microscopiques auxquels renvoient les symboles et du registre empirique qui est contenu dans ces représentations. Traiter les équations chimiques uniquement sous le seul aspect mathématique, ferait passer à côté de la véritable chimie. Il y a donc un langage de la chimie et il existe plusieurs usages du langage : affectifs, émotionnels, conatifs ou dialectiques (Weil-Barais, 1994, p. 236). Nous nous intéressons au langage symbolique de la chimie et à son apprentissage en tant que langage dans sa fonction cognitive de représentation :

> *- soit comme une fonction complexe de symbolisation, de construction de significations à divers niveaux d'abstractions des phénomènes sensibles, en interaction avec des contraintes liées à l'appropriation des systèmes symboliques ; c'est alors le contenu des représentations qui est pris en compte ;*
>
> *- soit comme l'apprentissage de symboles, formes renvoyant par « simples » correspondances aux choses et aux concepts ; l'intérêt se focalise alors sur les règles qui en*

> *permettent la manipulation (règles, logiques, calcul proportionnel). (Weil-Barais, 1994, p. 236‑237)*

L'apprentissage du langage symbolique de la chimie demande la maîtrise d'un vocabulaire et d'une grammaire mais ils sont l'un et l'autre étroitement liés aux principes conceptuels de la chimie tout en se référant au registre empirique.

> *The symbols and grammar of the language of chemistry are closely tied to its basic conceptual principles, and so the language of chemistry has to be constructed on an abstract and less familiar knowledge base. (Taber, 2009, p. 101)*

L'apprentissage de la chimie nécessite de tenir compte du sémiosis et de travailler conjointement signifié et signifiant.

3. Les registres et niveaux de la chimie

Nous allons dans un premier temps reprendre différents travaux qui présentent le registre empirique et le registre des modèles en sciences avec une déclinaison particulière pour la chimie. Nous présenterons dans un deuxième temps les liens qui ont été formulés avec le registre symbolique et comment celui-ci correspond à un niveau singulier.

3.1 Registre empirique et registre des modèles dans la recherche en France

Plusieurs chercheurs, dans une approche épistémologique ou psychologique, soulignent l'importance dans l'apprentissage des sciences d'un travail autour de la modélisation. Ils proposent alors différents cadres mettant en lien le registre empirique et le registre des modèles, caractéristiques d'une science expérimentale (Kermen & Méheut, 2009, 2011 ; Laugier & Dumon, 2003 ; Martinand, 1998 ; Tiberghien & Vince, 2005). Tiberghien, pour la physique décompose les savoirs en deux grandes catégories : les théories/modèles et la description des objets/événements (Figure 3) (Tiberghien & Vince, 2005). Elle s'appuie sur l'hypothèse épistémologique selon laquelle les processus de modélisation sont centraux dans la compréhension de la physique. Le monde des objets/événements du monde matériel est lié par des processus de modélisation au monde des théories/modèles distinctifs pour interpréter, prédire ou expliquer des événements dans le monde matériel (Ruthven, Laborde, Leach & Tiberghien, 2009). La distinction des deux mondes permet de rendre explicites ces

processus en confrontant « *les faits expérimentaux et leurs prévisions issues des théories et modèles* » (Tiberghien & Vince, 2005, p. 4).

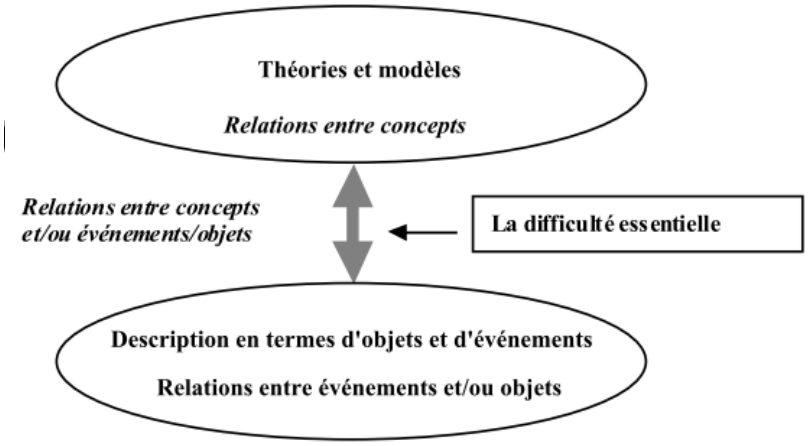


Figure 3 Distinction entre deux mondes et les relations établies dans le cas du savoir enseigné en physique (Andrée Tiberghien & Vince, 2005)

On peut identifier une théorie scientifique à partir de son domaine d'application puis la caractériser par « *ses buts qui consistent en la description, l'explication et la prédiction des phénomènes qui tombent dans son domaine* » (Barberousse, Kistler & Ludwig, 2000, p. 296). Le modèle va se distinguer de la théorie « *par le caractère localisé de la réalité sensible qu'il permet d'étudier* » (Robardet & Guillaud, 1997, p. 104). L'accord entre les théories admises et les modèles peut être imparfait, ces derniers étant élaborés « *dans un but prospectif ou dans le cadre de la mise à l'épreuve de certaines hypothèses plus simples que celles des théories admises, au sens où leur traitement mathématique est plus facile* » (Barberousse, Kistler & Ludwig, 2000, p. 288). Pour le travail à venir, nous allons nous situer au niveau du modèle plutôt qu'à celui de la théorie et nous nous référons à la définition proposée ci-dessous par Robardet et Guillaud (1997).

> *Un modèle est une construction théorique dont le rôle est de contribuer à la connaissance scientifique d'une réalité locale, concernant un ensemble de phénomènes. Dans cette perspective, on attribue à un modèle deux fonctions principales : l'interprétation et la prédiction. (Robardet & Guillaud, 1997, p. 103 - 104)*

Il est également nécessaire de distinguer les savoirs du physicien et ceux de la vie quotidienne qui peuvent être différents pour chacun des mondes, les propos des élèves pouvant être issus des deux catégories (Tiberghien & Vince, 2005). Il y a apprentissage quand les élèves construisent les relations aussi bien à l'intérieur de chaque monde qu'entre les deux mondes (Figure 3) C'est dans l'établissement de ces relations que vont intervenir les différents

registres sémiotiques, dont la langue naturelle notamment pour tout l'aspect descriptif. Tiberghien et Vince concluent alors sur « l'importance des aspects langagiers aussi bien dans la conception de séquences ou de situations d'enseignement que dans leur analyse » (2005, p. 16).

Martinand (1998), dans une approche plus psychologique, propose de distinguer le référent empirique à partir duquel les modèles peuvent s'élaborer (Figure 4). Celui-ci contient la phénoménographie, objets et phénomènes de la description première de la situation expérimentale, mais qui *« comporte aussi des connaissances sur les objets* » (Martinand cité par Kermen, 2016, p. 28). C'est une « *description empirique mais déjà conceptualisée* » (Martinand, 1992). La matrice cognitive, quant à elle, est nécessaire à la maîtrise du modèle et correspond aux ressources mobilisables pour la modélisation par la communauté scientifique ou les élèves : *« paradigmes épistémiques »* (connaissance, formes, « bonnes pratiques » théoriques ou empiriques*),* et ressources théoriques (langages, schémas, théories)) (Martinand, 1998, p. 10). C'est à ce niveau que nous pourrions voir apparaître le langage de la chimie.

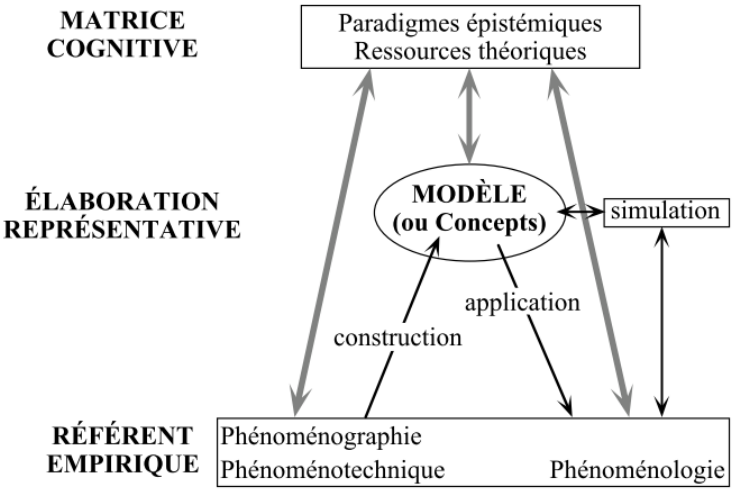


Figure 4 Schéma de la modélisation (Martinand, 1998)

Kermen (2015) reprend l'articulation du registre des modèles et du registre empirique pour catégoriser le savoir à enseigner en l'adaptant à une situation particulière de la chimie : les transformations chimiques (Figure 5).

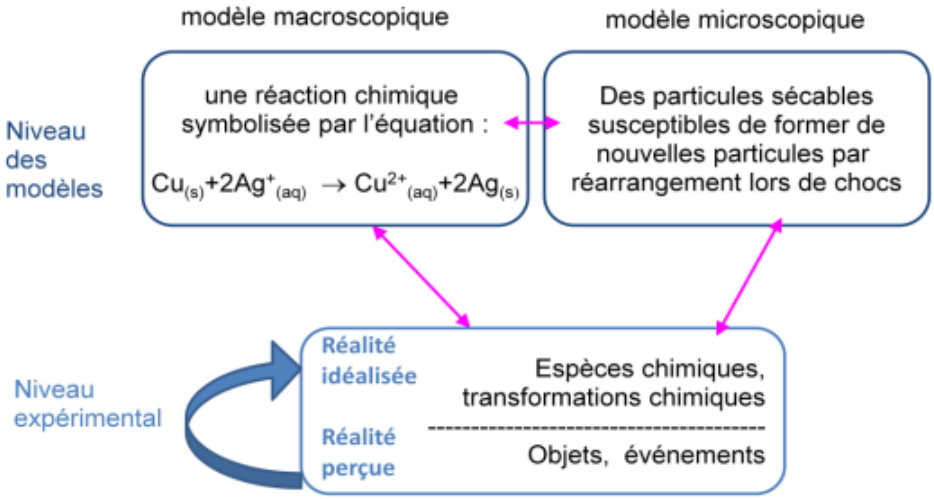


Figure 5 Articulation du niveau expérimental et du niveau des modèles (Kermen, 2015)

Le terme « niveau » est ici utilisé pour suggérer une hiérarchie allant vers une abstraction croissante alors que le terme « registre » évoque plutôt un ensemble de connaissances ; de même le terme « expérimental » à la place d'« empirique » évoque les expériences « intentionnelles » construites pour tester des hypothèses (Kermen, 2016). Enfin est distingué dans le schéma la « réalité perçue » et la « réalité idéalisée ». La « réalité perçue » est une première description du monde tel qu'on l'expérimente (Gilbert, Pietrocola *et al*. cités par Kermen, 2016). Pour ce premier niveau, les élèves peuvent utiliser le langage de la vie quotidienne : changements de couleur, formation ou disparition de solide, dégagement de chaleur, etc. La « réalité idéalisée » fait intervenir des « *objets-modèles* » dérivés d'objets réels mais avec une description idéalisée de la réalité dont notamment les espèces chimiques et les transformations chimiques (Gilbert, Pietrocola & *al.* cités par Kermen, 2016). Le langage symbolique de la chimie est nécessaire pour décrire ce niveau. Le niveau expérimental ne met en jeu que des concepts macroscopiques, Kermen considérant que l'on ne dispose pas de « *faits empiriques atomico-moléculaires en milieu scolaire* » (2016, p. 45). Ce n'est par contre pas le cas dans les modèles où il est nécessaire de distinguer ce qui relève du microscopique et du macroscopique (Kermen & Méheut, 2009, 2011).

Nous pouvons observer dans ces différents cadres l'absence explicite de référence aux registres sémiotiques. Pourtant leur importance est chaque fois signalée dans les différents cadres et celle-ci a été repérée depuis longtemps dans les travaux de recherche en didactique à la fois comme outil de communication et d'interprétation des phénomènes et des modèles.

> *L'appropriation d'un modèle, comme son utilisation, nécessitent des activités de codage et de décodage de schémas, images, graphes. […] Ces représentations ne pourront être des outils que si l'élève en contrôle l'utilisation. Inversement, le contrôle de ces outils permet de s'assurer que la représentation qu'on se fait d'un phénomène est correcte. (Larcher, 1996, pp. 174-175)*

Il faut donc aller regarder du côté des travaux anglo-saxons pour voir explicitement apparaître ce registre pour la première fois.

3.2 Registre du langage symbolique : un méta-niveau

En didactique de la chimie, Johnstone (1993) adopte une approche qui se réfère à la psychologie cognitive. Il a été l'un des premiers à s'intéresser aux difficultés rencontrées par les étudiants en chimie face à un enseignant se déplaçant constamment entre le registre symbolique, les faits expérimentaux et leur interprétation en termes d'entités microscopiques. Ces trois aspects du savoir en chimie ont été portés aux sommets d'un triangle (Figure 6), dont Talanquer (2011) a souligné le rôle heuristique pour la recherche et l'enseignement durant les vingt-cinq dernières années. Les sommets « Macro » et « Submicro » (Figure 6) ne sont pas associés aux modèles mais à l'échelle du monde dans laquelle on se situe pour le décrire.

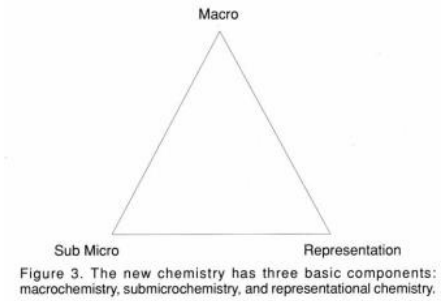


Figure 6 Le triangle de Johnstone (1993)

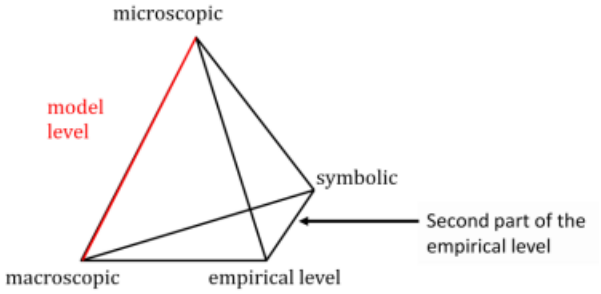


Figure 7 Registres des modèles et registre empirique liés au registre des représentations symboliques (Kermen & Méheut, 2009)

Kermen & Méheut (2009), s'appuyant sur le triangle de Johnstone, ont souhaité mettre en évidence l'existence de modèles autres que microscopiques, et ont présenté quatre niveaux de savoirs en chimie qui interagissent : deux niveaux pour les modèles (macroscopique et microscopique), un niveau empirique et un niveau symbolique. Ce dernier est repris par Mzoughi-Khadhraoui et Dumon (2012) mais avec un niveau macroscopique plus proche de la réalité idéalisée que des modèles macroscopiques (Figure 8). Le concept d'espèces chimiques

n'ayant aucun caractère prédictif, celui-ci ne peut pas être considéré comme un modèle (Kermen, 2016). Mais il ressort de la Figure 8 que le langage symbolique sert à la fois à nommer les objets microscopiques (atome et molécules) et au niveau macroscopique les espèces chimiques.

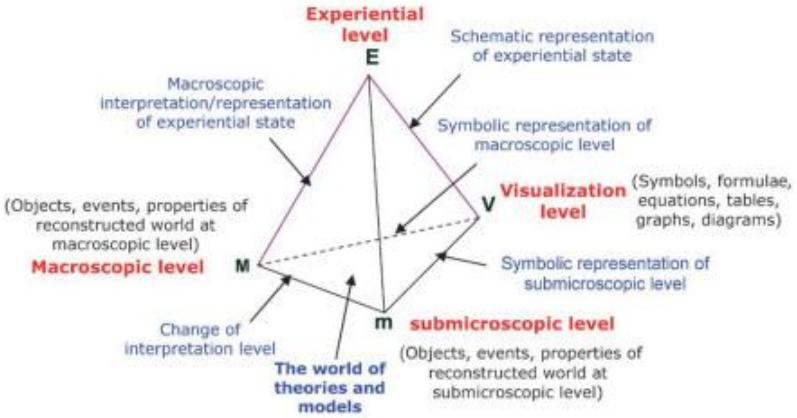


Figure 8 Triplet de la chimie revisité (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014)

La substance pure possède deux niveaux d'interprétation essentiels dans le travail autour de la réaction chimique : un macroscopique issu des « *données manipulatoires et qui se résume à la carte d'identité d'une substance* » et l'autre microscopique à partir des concepts d'atomes et de molécules (Solomonidou & Stavridou, 1994, p. 86). Cette notion est essentielle pour la transformation chimique, et le langage symbolique pour l'écriture d'une équation de réaction où les élèves devraient à la fois mobiliser des concepts macroscopiques et microscopiques.

On peut au final se demander si le registre des représentations a le même statut que le registre empirique ou que celui des modèles. Talanquer (2011), reprenant et faisant évoluer le triangle de Johnstone produit un espace des savoirs en chimie dans lequel on peut retrouver ce qui relève de l'expérience, des modèles et des « *visualisations* ». Mais par rapport aux deux autres registres de savoir, le registre des représentations est aussi un outil de communication. Taber (2013) considère que le domaine symbolique ne doit pas être vu comme un niveau discret des connaissances chimiques au même titre que les domaines macroscopiques et microscopiques. Dans le cas de la réaction chimique, il considère le langage du chimiste comme un méta-niveau (Canac & Kermen, 2016) entre le macroscopique (les substances) et le microscopique (les particules) (Figure 9).

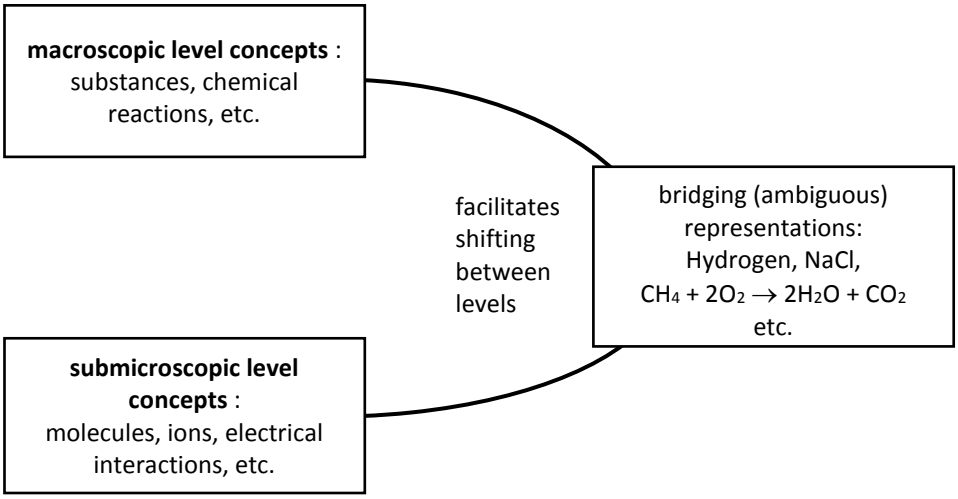


Figure 9 Deux niveaux de concepts reliés par une même représentation symbolique (Taber, 2013)

Dans les deux niveaux, les mêmes formules représentent aussi bien la molécule que l'espèce chimique. Ce système de représentation unique favorise le travail du chimiste en lui permettant de travailler simultanément dans le registre macroscopique et le registre microscopique. L'équation chimique dans sa forme symbolique peut être lue et utilisée par l'expert à la fois au niveau de l'expérience mais également aux niveaux macroscopique et microscopique.

> *Le registre symbolique permet de circuler entre les deux niveaux (macroscopique / microscopique) de description de la transformation chimique (Laugier & Dumon, 2004, p. 54).*

Ce qui peut être considéré comme une imprécision (un même registre de représentation pour plusieurs interprétations) est en fait une richesse. Comparé aux mathématiques où l'élève doit apprendre à changer de registres sémiotiques pour un même concept (Duval, 1993), en chimie le même registre permet d'illustrer différents concepts. Pour rappel, le symbole C illustre à la fois l'atome, l'élément et l'espèce chimique. On a dans ce domaine sans doute une spécificité de la chimie par rapport aux mathématiques ou à la physique. Mais cette richesse peut très vite devenir une difficulté pour l'apprenant qui devra nécessairement être guidé entre les différents niveaux.

Que celui-ci ait ou n'ait pas le même statut que les autres registres de savoir, nous pensons que l'enseignement du langage symbolique doit se faire en dialectique avec celui des niveaux[2]

[2] Nous associons le terme « niveau » pour signifier une hiérarchie entre l'échelle macroscopique et microscopique

macroscopique et microscopique et à la fois du registre[3] empirique et de celui des modèles. Au plan psychologique, le développement des concepts s'effectue conjointement avec celui de la signification des mots (Vygotski, 2013) et, dans l'histoire des sciences, le langage, les connaissances empiriques et les modèles se sont développés de façon conjointe. L'apprenant ne peut mener seul ce travail entre les symboles et les autres registres. Un élève peut en effet devenir assez compétent pour manipuler une équation chimique mais sans véritablement comprendre les concepts sous-jacents et modèles associés (Talanquer, 2011). Que peut comprendre un élève de l'équation chimique s'il n'a pas une compréhension appropriée du concept scientifique de substance et n'a pas disponible l'imagerie mentale appropriée du modèle particulaire (Taber & Bricheno, 2009) ?

> *[…] dans cette discipline peut-être plus qu'ailleurs, le langage interagit fortement avec le concept, la moindre représentation de symboles renvoie à une représentation spatiale ou conceptuelle souvent décalée entre apprenants et enseignants. Le langage chimique véhicule un "déjà-là" conceptuel très fort par où peuvent pénétrer les ambiguïtés et se renforcer les conceptions. (Barlet & Plouin, 1994, p. 50)*

Chapitre 2 : Concepts en chimie et langage symbolique

Pour Vygotski (2013), les concepts scientifiques, à distinguer des concepts quotidiens, et leur apprentissage seraient étroitement liés au langage. Ceci peut s'appliquer au langage symbolique de la chimie mais sa réciproque également : le langage symbolique de la chimie, ainsi que son apprentissage, sont étroitement liés aux concepts qu'ils représentent. Après avoir repris dans un premier temps ce que l'on entend par concept, nous nous intéressons à ceux représentés par le langage symbolique et les idées des élèves à leur propos repérées par différentes recherches en didactique de la chimie, en particulier espèce chimique, ou substance pure, et transformation chimique pour le niveau macroscopique, puis atomes et molécules pour le niveau microscopique. Nous présentons ensuite le bilan des difficultés des élèves et la manière dont les enseignants envisagent l'apprentissage du langage symbolique, déjà repérés dans différents travaux. Nous indiquons enfin les différentes progressions

[3] Nous associons le terme « registre » aux différents savoirs de la chimie : empirique, modèles et représentations.

proposées en didactique de la chimie pour l'apprentissage de ces différents concepts et ce vers quoi nous souhaitons tendre.

1. Qu'est-ce qu'un concept ?

Selon Vergnaud cité par Weil-Barais (1994, p. 458), les concepts peuvent être définis comme « *un triplet de trois ensembles* » :

- l'ensemble des situations de référence qui donnent du sens au concept ;

- l'ensemble des invariants opératoires qui sont constitutifs du concept ;

- l'ensemble des signifiants (systèmes symboliques) qui permettent de symboliser le concept ainsi que ses propriétés et les situations qu'il permet de traiter (le plan du signifiant).

La formation des concepts nécessite pour l'élève la mise en relation de ces trois niveaux. Le sens des symboles est dans un premier temps associé aux situations de référence. La diversité des situations rencontrées permet d'élaborer les invariants opératoires. Ceux-ci permettent de définir le sens des symboles dans un deuxième temps. Si nous transposons à la chimie, les noms, les symboles et les formules arrivent dans un premier temps et permettent de représenter les espèces chimiques pour le niveau macroscopique, les atomes et les molécules pour le niveau microscopique. À partir des situations rencontrées, les invariants opératoires caractérisant les espèces chimiques, les atomes et les molécules sont élaborés. Cette deuxième étape permet de donner tout son sens au langage symbolique. Les modèles, outils interprétatifs et prédictifs, sont ensuite élaborés à partir du réseau des concepts *(Ruthven et al*., 2009, p. 335). Espèces chimiques, atomes, molécules participent à l'élaboration du modèle particulaire de la matière et du modèle de la réaction chimique. Les représentations chimiques vont s'enrichir du travail permettant l'adéquation progressive entre les objets et les invariants. Avec la prise en compte de propriétés nouvelles, le chimiste va développer ses représentations, par exemple de la formule brute à la formule développée et aux représentations spatiales en lien avec l'isomérie.

Lemeignan et Weil-Barais (1993) distinguent deux types de concepts : les catégoriels et les formels.

- Les concepts catégoriels :

ils sont définis dans la « *tradition empiriste* » à partir d'une collection d'objets représentatifs (Weil-Barais, 1994, p. 455) qui ont en commun des attributs qui permet de les caractériser, « *malgré les différences qu'ils peuvent avoir par ailleurs* » (Barth, 2001, p. 38). Barth définit la structure opératoire du concept (Figure 10) par une « étiquette », des attributs et des exemples. Prenons le concept de la particule élémentaire en chimie. Sa dénomination, ou « *étiquette* » (Barth, 2001), est « atome ». Sous la dénomination atome, on retrouve toutes les particules caractérisées par les attributs suivants pour un élève du second degré : un numéro atomique, un nombre de masse, une charge nulle et une valence. L'étiquette n'a pas d'importance à elle seule, l'essentiel étant de savoir « *pourquoi on appelle un objet par ce nom et comment il est relié à d'autres concepts* » (Barth, 2001, p. 48). Les exemples sont pour les principaux issus des premières lignes du tableau périodique. L'atome est différent de l'ion par sa charge et de l'élément chimique par son nombre de masse. On pourrait ainsi dire qu'un concept offre une règle de classification (Barth, 2001).

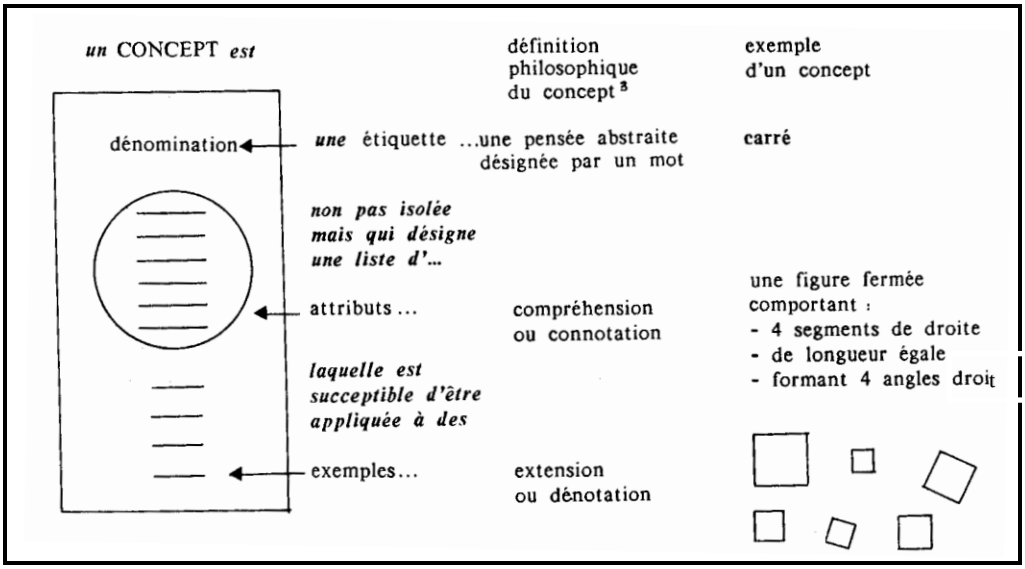


Figure 10 Structure opératoire du concept (Barth, 2001, p. 38)

Cependant à la différence du carré (Figure 10), le nombre d'atomes, ou d'« exemples » est limité avec une « *étiquette* » qui lui est également propre, son symbole, et ses propriétés, « *attributs* », qui le caractérisent. Chaque atome, à la différence du carré, a sa propre « carte d'identité ». Les concepts catégoriels sont souvent en mémoire sous la forme « de prototype » ou exemplaire réunissant l'ensemble des caractéristiques les plus saillantes du concept » (Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p.53). Pour l'atome, le carbone ne jouerait-il pas ce rôle ?

- Les concepts formels :

Pour les « *rationalistes* », les régularités ne sont pas premières pour définir le concept. Le concept est avant tout « *une entité mentale élaborée en vue de pouvoir expliquer et agir* » (Weil-Barais, 1994, p. 456). Dans les disciplines scientifiques, il a souvent le « *statut d'outil intellectuel »* qui permet *« d'agir autrement sur le savoir* » (Cohen-Azria, Daunay, Delcambre-Derville, Lahanier-Reuter & Reuter, 2013, p. 37). Les concepts répondent à des besoins d'explication et de prédiction. Cassirer (cité par Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p.55) les qualifie de « *formels* ». Pour leur élaboration, ils nécessitent un passage par l'abstraction mais ils n'auront de sens que confrontés à l'expérience. Fabre reprenant la vision de Bachelard indique que « *la conceptualisation n'est ni une abstraction ni une épuration de l'expérience, mais bien une émergence »* (Fabre, 2005, p. 62). Les élèves ne peuvent les construire seuls. Il est sans doute nécessaire de les amener à poser les hypothèses pour interpréter ou pour prédire des situations expérimentales (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Les concepts « *formels* » peuvent à leur tour être de plusieurs types. Certains, par exemple, sont de « *nature relationnelle* », se définissant par leurs relations avec les autres comme les concepts de force ou d'accélération en mécanique (Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 55). D'autres renvoient à des « *entités hypothétiques* » et on retrouve à nouveau dans cette catégorie l'atome (Lemeignan & Weil-Barais, 1993, p. 55).

Le cas du concept atome est singulier. Il peut à la fois être interprété comme un concept catégoriel dans la vision empiriste : les atomes existent et il faut les caractériser par leurs attributs. On peut aussi le comprendre comme une construction de la pensée, hypothèse structurante du modèle particulaire de la matière permettant d'interpréter aussi bien les changements d'état que les transformations chimiques à travers le modèle de réaction chimique.

Enfin, qu'ils soient catégoriels ou formels, les concepts scientifiques ne sont jamais définis de façon isolée mais toujours à travers un réseau, ce qui permet notamment de les distinguer des concepts quotidiens (Cohen-Azria *et al*., 2013). Pour Bachelard, tout savoir doit être systématique en s'inscrivant dans des corps théoriques, les concepts se définissant alors les uns par rapport aux autres (Fabre, 2005). Quel est alors ce réseau entre espèces chimiques, atomes et molécules pour des élèves de collège au cycle 4 ? Les atomes sont les briques élémentaires de la molécule et se conservent au cours des réactions chimiques. Les molécules

sont les plus petits composants des espèces chimiques et sont constituées d'atomes. Elles ne se conservent pas au cours des réactions chimiques. Les espèces chimiques sont constituées d'un nombre gigantesque[4] de la même molécule. Ce modèle particulaire permet d'interpréter les différents états de la matière. Les espèces chimiques se caractérisent au niveau macroscopique par un ensemble de propriétés physiques et chimiques, leurs attributs. Elles se modifient au cours de processus générant (souvent) des événements perceptibles dont la description conduit à définir une transformation chimique (Kermen, 2016). Ces dernières sont modélisées par des réactions chimiques. Le modèle de la réaction chimique, modèle macroscopique, permet d'interpréter les proportions dans lesquelles les espèces chimiques réagissent et se forment. Ces proportions différencient les transformations chimiques des mélanges. Elles apparaissent dans l'équation chimique qui représente la réaction chimique. Au niveau microscopique, les atomes se conservent au cours des réactions chimiques. A l'aide de la double lecture possible de l'équation chimique, macroscopique et microscopique, le principe de conservation des atomes[5] permet de prédire les proportions dans lesquelles les espèces chimiques réagissent. Ces concepts ont tous leur représentation : noms et symboles pour les atomes, noms et formules chimiques pour les molécules et les espèces chimiques, et équations chimiques pour les réactions chimiques. Ces dernières peuvent se lire et s'interpréter au niveau macroscopique et au niveau microscopique. Nous avons essayé de représenter cet ensemble de concepts, modèles, niveau et symbolisation un peu plus loin dans la thèse (Figure 12). Nous allons maintenant balayer les représentations des élèves à propos de ces différents concepts déjà repérés par la recherche en didactique de la chimie.

2 Les concepts en chimie en lien avec le langage symbolique : représentations des élèves

La façon dont les élèves disposent des différents concepts va déterminer la manière dont ils vont aborder un nouvel apprentissage et les situations problématiques (Weil-Barais, 1994). Nous présentons maintenant différents travaux ayant repéré les idées des élèves à propos des concepts de substances, de transformation chimique et de particules.

[4] Le nombre d'Avogadro n'est donné aux élèves qu'à partir de la seconde au moment de l'introduction de la mole.
[5] La notion d'élément n'est pas définie avant la seconde.

2.1 Concept macroscopique : substance pure, corps pur ou espèce chimique

De nombreuses recherches ont mis en évidence le fait que la notion d'espèce chimique ou de substance pure ou de corps pur ne va pas de soi pour les débutants et qu'elle pose des problèmes aux étudiants. Roletto et Piacenza (1994) montrent que les élèves italiens associent spontanément des critères de sens commun pour identifier les substances pures. On trouve notamment celui de mélange/non mélange et pour certains élèves ce critère est exclusivement visuel. Ils observent également l'opposition corps composé/corps simple. Une substance pure serait alors composée d'un seul élément chimique. Les élèves utilisent très peu le critère particulaire et, quand c'est le cas, ils associent très souvent la substance pure à un seul type d'atomes. Ils relèvent également un critère écologique et naturaliste véhiculé selon eux par les media comme pollué ou non pollué, pour non pur et pur. Solomonidou et Stavridou (1994) montrent à la même époque que « *la construction et le fonctionnement du concept de réaction chimique dépendent du concept scientifique de substance »* et constatent que les élèves français n'ont toujours pas construit ce concept à la fin du secondaire. Elles montrent que le cadre de la vie quotidienne ne permet pas les observations qui pourraient amener le concept de substance pure (Stavridou & Solomonidou, 1998). C'est bien à l'enseignant de proposer les conditions permettant l'élaboration de ce concept.

> *Il revient donc à l'enseignement de la chimie la responsabilité de favoriser l'extension catégorielle des élèves, en assurant les conditions qui leur permettront de se familiariser avec les substances, leurs diverses propriétés et changements, et qui vont préparer la construction du concept de substance chez eux. (Solomonidou & Stavridou, 1994, p. 86)*

Johnson (2000, 2002) parvient aux mêmes conclusions. Le concept scientifique de substance, à différencier du « concept quotidien » (Vygotski, 2013), n'est pas naturel pour les enfants. Ils ne peuvent en effet imaginer que celles-ci peuvent se transformer en d'autres substances et perdre ainsi leur identité. L'idée que les substances dihydrogène et dioxygène n'existent plus dans l'eau et qu'il n'y a plus qu'une seule substance, l'eau, ne va pas de soi. Les élèves n'acceptent pas non plus spontanément l'idée qu'un corps composé est une substance à part entière. Il est perçu comme un mélange de corps simples conservant leurs propriétés (Fillon, 1997 ; Furio, Bullejos & de Manuel, 1994 ; Talanquer, 2007). Johnson (2000) constate que les enseignants ne reconnaissent pas l'idée de substance comme essentielle à enseigner, considérant que le concept est compris, et se contentant souvent de détailler uniquement les

propriétés. Pourtant l'étude historique indique que la notion ne va pas de soi. Celle-ci, reliée à la notion de substance simple et pure au début du XIXe siècle, est définie soixante ans plus tard comme constituée d'une seule entité microscopique, la molécule. Les formules chimiques (brutes puis développées) qui apparaissent avec les entités microscopiques (atomes puis molécules) deviennent l'outil de représentation de l'espèce chimique. La notion de substance pure évolue à nouveau avec le développement de la chimie du XXe siècle : formes allotropiques, composés non stœchiométriques, chimie des solutions, etc. L'eau « pure » est composée bien évidemment de molécules d'H_2O mais on y trouve également des ions hydronium et hydroxyde provenant de l'équilibre acido-basique de l'eau réagissant avec elle-même. La définition, une seule entité microscopique, ne peut plus être considérée comme correcte. Comment peut-on alors définir une substance pure ? Pour (Bachelard, 2010), la pureté est une œuvre humaine et en a alors la relativité.

> *En fait puisque la science positive solidarise la notion de pureté avec la notion d'opération de purification, on ne peut écarter le relativisme de la pureté. [...]la ligne des purifications n'est jamais sûre de viser une purification absolue […]. La pureté d'une substance est donc une œuvre humaine. Elle ne saurait être prise pour une donnée naturelle. Elle garde la relativité essentielle des œuvres humaines. (Bachelard, 2010, p. 78 -79)*

La substance pure est donc une notion idéale mais nécessaire pour les chimistes (Schummer, 1998). van Brakel (2014) différencie la substance pure de l'espèce chimique : « *A material, phase, or substance has a (macroscopic) chemical composition and a (molecular) species composition* » (2014, p. 21).

Dans la suite de ce travail, nous allons nous intéresser à l'introduction de la notion de substance pour les élèves de collège. Nous ne ferons pas la distinction entre substance pure et espèce chimique au sens proposé par Van Brakel (2014). Nous serons également amenée à utiliser le terme de corps pur puisque la notion d'espèce chimique est introduite sous cette dénomination dans les programmes de cycle 4. Nelson (2003) considérant qu'il est nécessaire de proposer un enseignement progressif aux novices propose de débuter avec différentes définitions se référant au niveau macroscopique et basées sur des observations expérimentales. Il caractérise une substance pure par les températures de changement d'état, leur état physique à température et pression données, la couleur, la densité, la solubilité et par les actions chimiques avec d'autres substances, ce que Stavridou et Solomonidou (1998) pourraient qualifier de carte d'identité. Johnson (2000) propose de centrer l'enseignement du

concept d'espèce chimique sur l'utilisation de ses propriétés et d'éviter de se contenter de leur énumération. Les substances peuvent être divisées en deux classes : les corps simples et les corps composés qui peuvent eux-mêmes se décomposer en corps simples (Nelson, 2003, p. 21). Cet auteur propose la définition suivante, tout en restant ouvert à toutes suggestions :

> *Substance : homogeneous basic material that cannot be separated (by the methods chemists usually employ) into components that can be recombined in varying proportions as for a solution (Nelson, 2003, p. 23)*

2.2 Concepts microscopiques : hypothèses des élèves à propos des structures de la matière

À partir d'un bilan des recherches effectuées au cours des trente dernières années, Talanquer (2009) identifie les différentes hypothèses implicites que l'on peut attribuer aux élèves et aux étudiants à propos de la structure de la matière. Il élabore une classification indiquant l'évolution possible des raisonnements à plusieurs stades de l'apprentissage de façon générale et dans différentes catégories spécifiques (Figure 11).

Implicit Assumptions					
Domain	*Type*	*Dimension*			
		Novice →			*Advanced*
General					
	Categories	Surface Similarity →			Structural Similarity
Specific	*Structure*	Continuity →	Granularity →		Corpuscularity
			Embedding →		Vacuum
	Properties	Inheritance →			Emergence
		Substantialism →	Elementalism →		Emergence
	Dynamics	Static →	Causal-Dynamic →	Contingent-Dynamic →	Intrinsic-Dynamic
	Interactions	Contact-Interactive →	Contingent-Interactive →		Intrinsic-Interactive

Figure 11 Hypothèses implicites limitant la réflexion des élèves et des étudiants à propos de la structure de la matière d'après Talanquer (2009, p. 6)

Les débutants semblent particulièrement influencés par l'apparence physique des objets (« Surface Similarity » - Figure 11). Le solide suivant, qu'il soit en poudre ou en bloc, ne va pas avoir les mêmes propriétés. Avant de pouvoir considérer la matière comme constituée de particules séparées par du vide, un novice l'imagine d'abord comme une structure continue puis comme une substance constituée de petits morceaux du même matériau (« Granularity Embendding » - Figure 11). Même quand les élèves acquièrent une bonne connaissance de

l'hypothèse atomique et moléculaire, ils ont encore du mal à admettre que les propriétés de la substance émergent (« *Emergence* » - Figure 11) des interactions entre particules. Ils ont tendance à penser pendant longtemps que les particules héritent des propriétés de la substance (« *Inheritance Substantialism* » - Figure 11). La notion d'élément chimique , si celle-ci n'est pas définie, peut entraîner de nouvelles difficultés (Johnson, 2000). Lorsqu'un scientifique affirme que l'eau « contient les éléments hydrogène et oxygène », il fait référence aux atomes qui constituent la molécule. Un élève peut interpréter cela comme l'eau en tant que mélange de gaz dihydrogène et dioxygène. Le raisonnement à partir des substances pour le novice peut évoluer vers une sorte « d'élémentarisme » (« *Inheritance Elementalism* » - Figure 11). Les substances deviennent des mélanges de composants élémentaires et leurs propriétés sont basées sur les quantités relatives de ces éléments. L'idée que les propriétés des substances ou des éléments sont additives et se combinent au cours des transformations chimiques dans les nouvelles espèces formées semble résister.

Talanquer (2009) précise que la présentation linéaire du tableau ne doit surtout pas induire un apprentissage linéaire. Un même élève peut changer de mode de raisonnement en fonction de la situation qu'il est amené à étudier à propos de la structure de la matière. Il suggère alors en conclusion de suivre différentes voies plutôt qu'une progression linéaire pour un apprentissage plus adapté aux différents modes de pensée des apprenants (Talanquer, 2009).

Enfin on constate chez de nombreux enseignants régulièrement une dérive anthropomorphique pour décrire les atomes et les molécules. Ils utilisent des arguments que (Talanquer, 2007) qualifie de téléologiques pour expliquer les évolutions telles que les atomes qui perdent ou gagnent des électrons car ils veulent satisfaire la règle de l'octet. Les enseignants pensent aider les élèves dans la compréhension de ces concepts non accessibles à la perception en utilisant de tels arguments mais pour (Talanquer, 2007) cela génère une illusion de compréhension qui peut nuire à long terme à l'apprentissage en démotivant les élèves à rechercher les véritables explications chimiques.

2.3 Concepts de transformation chimique et réaction chimique

En rendant compte d'observations expérimentales macroscopiques mais qui s'interprètent à l'échelle microscopique, et en s'appuyant sur de nombreux concepts de la chimie (espèces

chimiques, modèles particulaires, stœchiométrie, quantité de matière, équilibre chimique, etc.), la réaction chimique est un concept intégrateur qui cumule un grand nombre de difficultés propres à la chimie (Barlet & Plouin, 1994). Le transfert de l'observable au modélisable nécessite une grande capacité d'abstraction qui n'est pas toujours acquise par les étudiants. Les élèves n'utilisent jamais spontanément le niveau microscopique pour interpréter ce qui se passe au cours d'une transformation chimique (Barlet & Plouin, 1994). Le modèle particulaire ne semble pas opératoire pour interpréter la transformation chimique (Fillon, 1997 ; Talanquer, 2007). S'il n'y a pas de demande explicite à utiliser le modèle particulaire, les étudiants ne sont pas tous capables de fournir une explication macroscopique/microscopique cohérente d'une transformation chimique (Solsona, Izquierdo & De Jong, 2003). Par contre Johnson (2000, 2002) constate que l'utilisation du modèle particulaire aide les élèves à reconnaître un changement de substance, ce qu'ils n'arrivaient pas à faire à partir des seules propriétés macroscopiques. Méheut (1989) avait déjà indiqué qu'il est nécessaire de renforcer l'apprentissage des techniques de séparation et d'identification des substances pour vérifier s'il y a ou non apparition de nouvelles espèces chimiques, ce que les élèves ont du mal à percevoir.

Nombreuses sont les recherches qui ont montré les difficultés des élèves dans ce domaine. En Israël en fin d'étude secondaire, Ben-Zvi, Eylon et Silberstein (1987) montrent que 10% des élèves continuent à ne pas savoir répondre à des questions élémentaires à partir des équations chimiques. Laugier et Dumon (2000) observent la primauté des aspects perceptifs à partir de raisonnements analogiques primitifs. Si le système réactionnel noircit, alors on a formé du charbon. Ils notent également dans une autre recherche l'absence d'interaction des réactifs (Laugier & Dumon, 2003). Cela peut conduire à l'idée que les produits se forment à partir des réactifs sans interaction entre eux par des processus indépendants (Furio *et al.*, 1994).

La transformation chimique est parfois interprétée comme la séparation des propriétés d'une substance et de la substance (Laugier & Dumon, 2000 ; Solomonidou & Stavridou, 1994) ou comme le résultat de l'action d'un agent (qui n'est pas modifié) sur un patient (qui subit une modification) (Solomonidou & Stavridou, 1994). On peut également trouver dans les explications des élèves la préexistence des produits à l'intérieur des réactifs (Laugier &

Dumon, 2000 ; Solomonidou & Stavridou, 1994). Laugier et Dumon (2004) constatent la difficulté d'acquisition de la notion de réactif limitant.

Au moment des programmes de lycée entrés en vigueur à la rentrée 2000, les concepteurs ont renouvelé l'approche du concept de réaction chimique en introduisant celui de transformation chimique. Nous pouvons qualifier ce dernier de concept « scolaire », « *construit et travaillé dans l'espace scolaire* » (Cohen-Azria *et al*., 2013, p. 37). Ils introduisent donc la distinction entre la « *transformation, menant un système chimique d'un état à un autre, et la réaction chimique, responsable de cette transformation chimique, et qui est un modèle à l'échelle macroscopique* » (Davous *et al*., 1999). Kermen et Méheut (2009, 2011) situent la transformation chimique dans la réalité idéalisée, la réaction chimique étant placée quant à elle dans le registre des modèles macroscopiques. À partir d'observations en classe, Kermen (2016) constate qu'il est difficile pour les élèves de séparer la réalité idéalisée d'un élément de modèle qui l'interprète. Elle suggère que la difficulté est peut-être accentuée « *du fait qu'on utilise les mêmes symboles (les formules chimiques) pour décrire la situation expérimentale (la composition qualitative du système initial, la réalité idéalisée) et écrire l'équation de réaction* ».

3. Difficultés d'apprentissage du langage symbolique

Nous présentons dans ce paragraphe les difficultés repérées chez les élèves et la non prise de conscience de celles-ci par les enseignants à propos de l'enseignement du langage.

3.1 Un bilan des difficultés des élèves

> *« La non maîtrise du registre symbolique conduit les élèves à rechercher des solutions alternatives » (Laugier & Dumon, 2004, p. 65)*

Taskin et Bernholt (2014) ont fait un bilan des recherches dans les pays anglo-saxons au cours de ces trente dernières années relevant à la fois des difficultés d'ordre syntaxique et d'ordre conceptuel dans l'utilisation des symboles. Les symboles chimiques peuvent être compris comme une simple abréviation du nom de la substance (Al-Kunifed, Good & Wandersee, 1993). Les élèves éprouvent des difficultés syntaxiques pour coder ou décoder les différents types de représentation ou pour interpréter le modèle sous-jacent à la représentation utilisée. CH_2O est par exemple considéré comme un carbone lié à de l'eau ou SiO_2 est équivalent à

Si_2O_4 (Keig & Rubba, 1993). Les élèves, à partir des formules brutes, ont une vision des composés additive plutôt qu'interactive (Ben-Zvi *et al*., 1987). Dehon et Snauwaert (2015) relèvent la faible capacité des élèves à tirer une information microscopique correcte à partir des symboles.

Des travaux en France et en Tunisie montrent également des difficultés dans l'application des conventions et des règles pour les formules brutes dans le cadre des réactions chimiques (Carretto & Viovy, 1994; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Fillon (1997) montre notamment comment les élèves recherchent à la fois dans les noms scientifiques et dans les formules des effets de permutation par symétrie. Les élèves éprouvent des difficultés pour passer d'un niveau d'interprétation macroscopique à un niveau microscopique dans le cas des équations chimiques. Ne maîtrisant pas la phénoménologie macroscopique, ils sont incapables d'en donner une représentation au niveau microscopique et ne peuvent alors utiliser le registre symbolique pour rendre compte de la transformation chimique (Laugier & Dumon, 2000). Certaines équations peuvent amener les élèves à penser qu'un composé est un mélange de corps simples conservant leurs propriétés (Fillon, 1997; Furio *et al*., 1994; Talanquer, 2007) comme dans « $C+O_2$ » et « $S+O_2$ », en cohérence avec les difficultés syntaxiques déjà citées. L'utilisation des formules brutes se rapporte parfois à une simple manipulation arithmétique dans les équations chimiques (Nakhleh & Mitchell, 1993; Sanger, 2005) et celles-ci, de par leur symbolique, peuvent entraîner une confusion avec l'équation mathématique (Barlet & Plouin, 1994). Il y a souvent confusion entre les indices et les nombres stœchiométriques (Dehon & Snauwaert, 2015). Les élèves ont tendance à se focaliser sur l'équation de réaction au détriment de la situation expérimentale (Solomonidou & Stavridou, 2000). Gauchon (2005) montre que des élèves de seconde interprètent à partir de l'équation la composition initiale du système chimique comme étant la partie de droite et celle du système final la partie de gauche.

Le Maréchal et Cross (2010) classent en trois catégories l'origine des difficultés des élèves et étudiants dans l'utilisation du langage du chimiste : la gestion des règles du registre, le passage d'un registre à l'autre, le choix du ou des registres qui permettent de résoudre efficacement un problème. Le chimiste peut passer d'une représentation à l'autre car il maîtrise l'ensemble des connaissances. Mais l'élève, qui ne possède pas cette maîtrise, éprouve de nombreuses difficultés sur l'utilisation des différents registres et le passage de l'un à l'autre. Dans une

recherche récente, Dehon et Snauwaert (2015) propose « *l'existence de trois niveaux de signification pour une visualisation donnée : un niveau de signification macroscopique dans lequel l'élève fait référence à l'observable via des observations empiriques ou via des concepts macroscopiques, un niveau de signification microscopique dans lequel l'élève fait référence aux entités constitutives de la matière et un niveau de signification symbolique dans lequel l'élève se limite par exemple à une lecture du signe en tant que signifiant ou en tant que signifié hors du cadre de la chimie.* » Ils observent que :

> *Selon le symbole considéré, les propositions des élèves semblent se situer a priori dans un niveau de signification préférentiel (recours massif aux symboles pour décrire réactifs et produits, référence majoritaire au niveau microscopique pour le coefficient stœchiométrique, termes à dominante macroscopique pour la réaction chimique). (Dehon & Snauwaert., 2015, p. 231)*

Les élèves ne semblent pas parvenir à passer d'un niveau de signification à l'autre ou à les relier.

3.2 Des enseignants qui n'ont pas conscience des difficultés

Pour Sliwka (2003), le langage symbolique constitue une langue seconde pour les élèves. Pourtant les enseignants ne semblent pas travailler avec leurs élèves les difficultés pour arriver à distinguer l'objet du signe qui le représente et les changements de registre sémiotique (Le Maréchal & Cross, 2010), difficultés déjà étudiées en mathématique (Duval, 1993), ainsi que le choix du bon registre. Ils ne prennent pas en compte les difficultés que peuvent rencontrer les élèves dans l'application des conventions ou des règles (Boilevin, Davous & Thibault, 1996 ; Laugier & Dumon, 2004 ; Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012). Kaya et Erduran (2013) relèvent dans les ouvrages scolaires turcs qu'il n'y a aucune utilisation explicite des fonctionnalités du langage chimique pour en distinguer les différents aspects comme la grammaire, la syntaxe et les symboles. L'équation chimique « $2Na + Cl_2 \rightarrow 2NaCl$ », souvent proposée dans les programmes turcs, n'est jamais interrogée à partir de ses aspects linguistiques : orthographe (Cl_2, NaCl) et grammaire (2Na, 2NaCl). Dumon et Mzoughi-Khadhraoui (2014), reprenant le tétraèdre proposé par Kermen et Méheut (2009), montrent le faible nombre de connexions faites par les enseignants entre le registre expérimental et le registre des modèles. Ils n'ont pas conscience de devoir expliciter le niveau dans lequel se situe leur discours (Dehon & Snauwaert, 2015) de la même façon qu'ils n'ont pas conscience

des difficultés du concept de substance en pensant qu'il s'agit là « *d'une notion banale* » (Roletto & Piacenza, 1994). Enfin l'intérêt d'une approche sémiologique en chimie est sans doute peu prise en compte dans la formation des enseignants. Nous pensons pourtant que les enseignants doivent proposer un apprentissage progressif du symbolisme en consolidant et en rendant explicites les liens avec les différents registres et niveaux de la chimie.

> *The reference to a chemical language is intended to be more than an analogy (Taber, in press) and, unless teachers are able to take full account of the demands made of students, then—for many learners—the study of chemistry may well be an experience of learning unfamiliar ideas through the medium of an unfamiliar language, as taught by a subject expert who is fluent in both the ideas and the language used to present them. (Taber & Bricheno, 2009, p. 2024)*

Comme tout matériel complexe à apprendre, il faut être attentif à l'introduction de ces notions. Ne pas comprendre les subtilités du langage symbolique rend difficile l'apprentissage des idées. Ne pas comprendre les idées entraîne des interprétations erronées de ce qui est représenté à travers le langage.

> *The symbols are not just labels for words, but closely linked to concepts, which may themselves offer considerable challenge to learners. (Taber, 2009, p. 102)*

Quelle progression peut-on alors proposer pour l'enseignement du langage symbolique et des concepts associés ?

4. Une progression tenant compte de l'apprentissage du langage symbolique

4.1 Des propositions de progression dans les travaux de recherche

Plusieurs travaux proposent des progressions pour l'enseignement du concept de substance chimique en indiquant les liens à construire entre les différents registres : empirique, modèle microscopique et registre des représentations. Dans les différentes propositions, on peut trouver :

- Du macroscopique au microscopique :

Solomonidou et Stravidou (2000) proposent de travailler en premier lieu au niveau empirique pour passer du concept de « *substance – objet (inerte)* » ayant une seule propriété caractéristique à l'idée de substance chimique caractérisée par un ensemble de « *propriétés*

– *interactions* » et de ne traiter qu'ensuite les modèles microscopiques. Elles considèrent ceux-ci comme privilégiés de manière excessive dans les progressions actuelles. (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014 ; Sevian & Talanquer, 2014) suggèrent de poser en question centrale le concept d'« identité chimique » dans les programmes de chimie Ce concept repose sur l'hypothèse que chaque substance chimique peut se différencier des autres parce qu'elle possède une propriété spécifique « *qui la rend unique* » (Enke, 2001 cité par Sevian & Talanquer, 2014). Ces chercheurs proposent une progression d'apprentissage visant à aider « *les étudiants à établir des liens entre l'expérience macroscopique et les modèles submicroscopiques de la matière* » et « *le développement d'une vision interactionniste de la matière* » (Ngai *et al*., 2014). La progression conçue (Ngai *et al.*, 2014) mentionne les différents types de modèles à utiliser, la façon d'analyser les propriétés de l'espèce chimique, l'évolution de la notion d'identité chimique du débutant à l'apprenant avancé.

- Du microscopique au macroscopique :

de Vos et Verdonk (1987) proposent de débuter par les molécules avant de définir le concept de substance.

- Allers retours entre le macroscopique et le microscopique :

Larcher, Chomat et Lineatte (1994) ont montré qu'à partir d'un travail de représentation symbolique, articulé à une étude des propriétés des substances, le concept d'espèces chimiques a pu évoluer et qu'un modèle de particules sécables a pu être élaboré par les élèves. Sanger (2000) fait des propositions de séquences pour travailler du microscopique à partir de dessins de particules au macroscopique.

Dans ces différentes propositions, il n'y a pas d'utilisation spécifique de l'apprentissage du langage symbolique.

- Allers retours entre le macroscopique (à partir des réactions chimiques) et le langage symbolique (les noms et les formules)

Pour Fillon (1997), les idées erronées des élèves peuvent être renforcées par le langage (nom ou formules) mais celui-ci n'est pas présenté comme un obstacle à part entière. Il propose une séquence travaillant à partir de la réaction chimique en lien avec les noms et les formules.

- Allers retours entre le microscopique et le langage symbolique (les formules)

Roletto et Piacenza (1994) proposent d'élaborer ensemble formules et modèles microscopiques.

- Allers-retours entre le microscopique et le macroscopique à l'aide de représentations symboliques.

Nous n'avons pas trouvé, dans les différentes progressions que nous avons pu étudier, de proposition centrée sur l'élaboration du langage symbolique.

4.2 Créer une dialectique entre langage symbolique et concepts de la chimie

Il est nécessaire que les enseignants passent du temps à l'apprentissage du langage symbolique.

> *L'utilisation d'un signe sans explication par un enseignant peut référer à la fois aux concepts macroscopiques et aux concepts microscopiques alors qu'un élève ne peut y voir qu'une lettre ou un chiffre sans aucun lien avec le phénomène chimique observé. (Dehon & Snauwaert, 2015)*

Mais l'enseignement du langage symbolique peut-il permettre l'apprentissage des autres registres ? Comme le suggère Johnstone (1993), l'apprentissage de la chimie doit se concevoir par aller retours entre les trois registres : symbolique, empirique et des modèles. L'enseignement du registre symbolique nécessite de créer les liens avec les concepts macroscopiques et microscopiques et de permettre à l'élève de se retrouver dans l'ensemble de ces registres et niveaux. Les travaux en psychologie semblent indiquer que l'apprentissage du langage symbolique permet d'enrichir celui des concepts.

> *L'apprentissage de tout système symbolique s'accompagne nécessairement d'un enrichissement des connaissances au plan des contenus. (Weil-Barais, 1994, p. 448)*

Pour Vygotski (2013), développement des concepts et développement du langage vont de pair.

> *Du point de vue psychologique le développement des concepts et celui des significations des mots sont un seul et même processus. (Vygotski, 2013, p. 297)*

Régis, Roletto, Soudani et Soudani (2014) pensent que le signe iconique « *pourrait être un maillon et un traceur de la pensée chimique chez l'élève*. » Pour développer ce point de vue, ils proposent un cadre d'analyse peircien des représentations en chimie. Dans le dictionnaire de sémiotique générale,

> *Pour Peirce, le processus sémiotique est un rapport triadique entre un signe ou representamen (premier), un objet (second) et un interprétant (troisième). Le representamen est une chose qui représente une autre chose. L'objet est ce que le signe représente. […] Le signe ne peut que représenter l'objet, il ne peut pas le faire connaître. […] Il peut exprimer quelque chose à propos de l'objet, à condition que cet objet soit déjà connu de l'interprète. (Hébert, 2016, p. 232)*

Avec comme « interprétant », le concept de corps simple/corps composé, la formule H_2O, symbole ou « *representamen »* de « l'objet » eau, nous permet d'interpréter cette espèce chimique comme corps composé décomposable en dihydrogène et dioxygène. Avec la connaissance des règles définissant les proportions dans la réaction chimique, la formule nous indique que l'eau se décompose en donnant deux fois plus de gaz dihydrogène que de gaz oxygène. Et avec les concepts d'atome et de molécule, nous pouvons indiquer à partir de la formule que la molécule d'eau est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Et si nous écrivons cette formule HOH, nous pouvons alors l'interpréter comme une molécule constituée de deux atomes d'hydrogène reliés à un atome d'oxygène.

Seul l'interprétant peut permettre à l'interprète de connaître l'objet à partir du *representamen.* Le symbole ou la formule chimique ne nous dit rien des objets qu'ils représentent sans la connaissance des concepts espèces chimiques, atomes, molécules, transformation chimique ou réaction chimique. Le processus sémiotique édifié par Peirce est théoriquement illimité, le *representamen* déclenchant un interprétant qui devient un *representamen* à son tour. Mais dans la pratique, ce processus prend fin avec l'habitude d'attribuer une signification à un signe dans un contexte familier.

> *L'habitude fige provisoirement le renvoi infini d'un signe à d'autres signes, permettant à des interlocuteurs de se mettre rapidement d'accord sur la réalité dans un contexte donné de communication. (Hébert, 2016, p. 232)*

Il semble donc capital, dans un processus d'apprentissage de créer ces habitudes pour éviter un processus sans fin qui ne peut être que source de difficultés pour l'apprenant. Et pour cela, le travail sur les signes paraît incontournable.

> *Ce sont les signes qui provoquent le renforcement ou la modification des habitudes. (Hébert, 2016, p. 232)*

Les novices ne maîtrisent pas le langage de la chimie car ils ne possèdent ni les connaissances du symbolisme, ni les connaissances théoriques supposées implicites dans le symbolisme, ni

le répertoire empirique suffisant servant de référent aux représentations symboliques (Taber, 2009). L'apprentissage du langage symbolique ne peut se faire qu'à partir de la connaissance des règles syntaxiques issues des modèles. Le signifiant est en effet construit à partir des lois issues des modèles.

> *Ce procédé symbolique permet la manipulation formelle des symboles indépendamment de leurs signifiés empiriques […]. La rigueur scientifique réside désormais dans la maîtrise des définitions des symboles, des mots que l'on peut composer à partir de ceux-ci et de leurs permutations, suivant un ensemble de règles strictes. (Laszlo, 1993)*

Mais le signifié prend aussi appui sur les connaissances empiriques. Le langage symbolique ne peut s'utiliser correctement qu'à partir de ces dernières qui définissent les règles sémantiques.

> *La fonction heuristique des signes consiste à permettre un aller retour constant entre les signes et l'expérimentation. (Edeline, 2009)*

Nous nous intéressons à l'apprentissage de la triade en début de collège :

- *representamen* : noms, formules chimiques et équations chimiques ;
- objets : espèces chimiques, atomes et molécules, transformation chimique et réaction chimique ;
- interprétants : les concepts d'espèces chimiques, d'atomes et de molécules, de transformation chimique et de réaction chimique.

Cette triade se situe dans deux niveaux, macroscopique et microscopique, et dans trois registres, représentation, empirique et modèle. Les schémas déjà cités en lien avec l'apprentissage de la chimie ne nous semblent pas complets ou adaptés pour visualiser un apprentissage de la chimie s'appuyant sur l'apprentissage des noms et des formules.

- Figure 5 Articulation du niveau expérimental et du niveau des modèles (Kermen, 2015) : le langage symbolique semble absent car incorporé à l'équation de réaction.
- Figure 8 Triplet de la chimie revisité (Dumon & Mzoughi-Khadhraoui, 2014) : le registre symbolique est bien relié au registre empirique et aux différents niveaux du registre des modèles, microscopique et macroscopique, mais tous ces registres semblent équivalents dans cette représentation. Or nous pensons comme Taber (2013) que le langage n'est pas du même niveau de connaissances que le registre empirique et les registres des modèles. Le langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau

est absent de ce schéma. Il manque également dans le registre empirique la différence entre réalité perçue et réalité idéalisée, cette dernière étant la seule rattachée au langage symbolique.

- Figure 9 Deux niveaux de concepts reliés par une même représentation symbolique (Taber, 2013) : les concepts liés au langage symbolique et les deux niveaux de la chimie, macroscopique et microscopique, apparaissent explicitement. Mais le registre empirique et le registre des modèles ne sont pas clairement identifiés ainsi que réalité perçue et réalité idéalisée.

Nous essayons de faire apparaître dans un schéma (Figure 12) la complexité des différents liens entre registres, niveaux, concepts, signifiant/signifié ou signe/objet/interprétant. Nous repartons du schéma de Vergnaud à propos de la représentation des concepts cité par Weil-Barais (1994, p. 459) pour l'adapter aux concepts chimiques et au langage symbolique. Du point de vue sémiotique, nous avons conservé l'espace des signifiants qui regroupe les différents « symboles »[6] du langage de la chimie que nous souhaitons étudier : les noms scientifiques, les symboles chimiques, les formules chimiques et les équations chimiques, et l'espace des signifiés qui regroupe les « objets » représentés par les symboles de l'espace des signifiants : les atomes, les molécules, les espèces chimiques, les transformations chimiques et les réactions chimiques. Nous avons de plus tenu compte :

- des quatre registres du tétraèdre proposé par Kermen et Méheut (2009). Ils sont représentés par des cadres de couleurs différentes : noir pour le registre symbolique, vert pour le registre empirique et jaune pour le registre des modèles, qu'il soit microscopique ou macroscopique. Les concepts sont regroupés dans ces cadres ;

- des deux niveaux macroscopique et microscopique faisant du langage symbolique un méta-niveau (Canac & Kermen, 2016). Ils correspondent aux « objets » et « symboles » écrits en rouge pour le niveau macroscopique, en bleu pour le niveau microscopique et en mauve pour les deux niveaux, ce qui est le cas des noms, symboles, formules et équations. On trouve les deux niveaux dans chaque espace (signifié et signifiant).

- de la réalité perçue et de la réalité idéalisée dans le registre empirique (Kermen, 2015). La réalité idéalisée fait appel à des concepts différents de ceux de la réalité perçue. Elle n'est

[6] Le mot « symbole » est pris ici au sens de Peirce car envoyant à son objet en vertu d'une loi (Hébert, 2016).

donc pas dans le même plan. Mais la réalité perçue pourra être déduite de la réalité idéalisée, elle -même prédite des modèles.

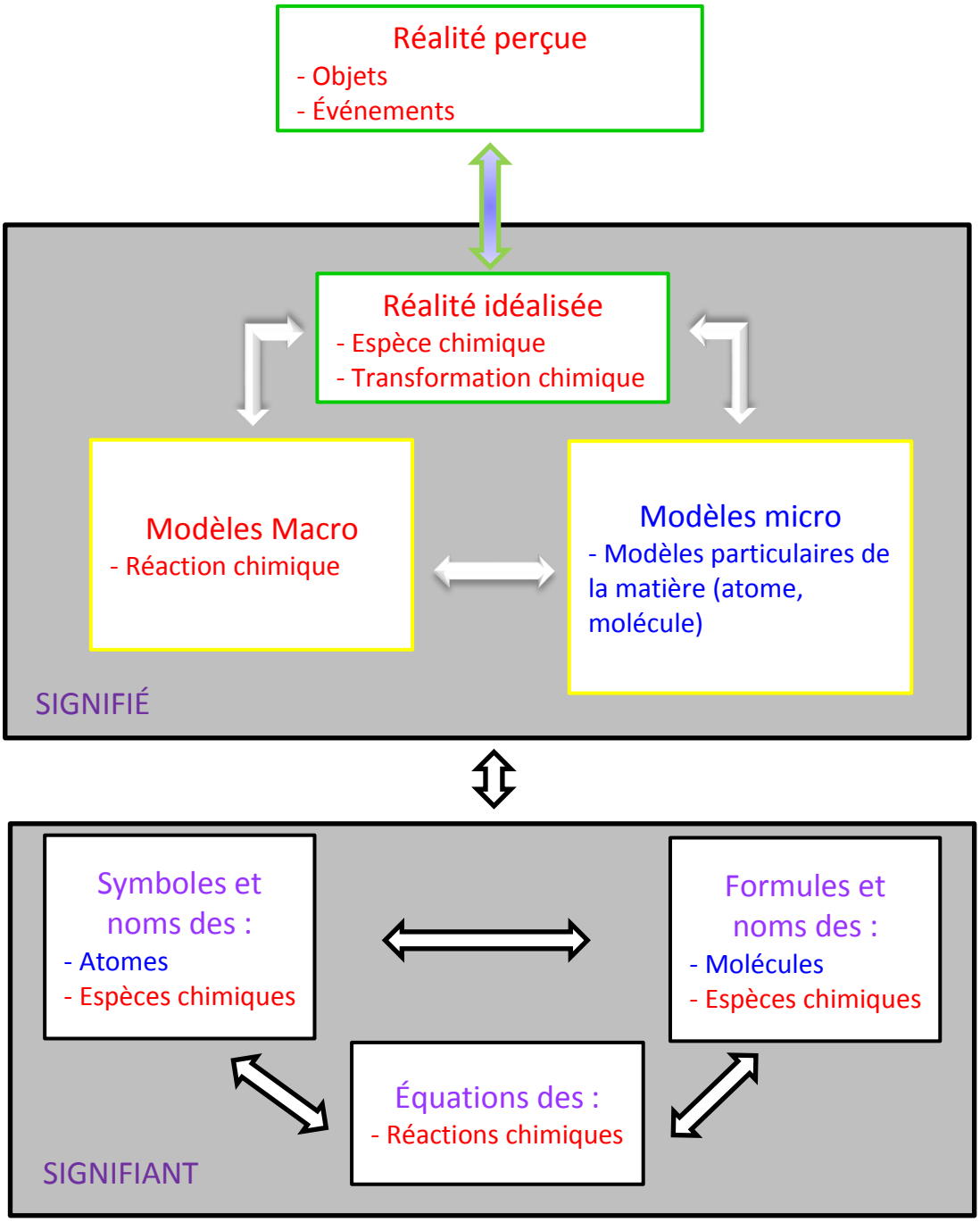


Figure 12 Les liens entre langage symbolique et les registres et niveaux de la chimie

Les concepts, ou les interprétants, qui donnent sens aux objets et permettent une interprétation du symbole, sont issus du réseau de relations entre registre empirique et registre des modèles à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique. Le réseau est symbolisé par les flèches entre les différents registres dans l'espace des signifiés. Celles-ci correspondent aux différentes relations entre les concepts que nous avons présentés au

paragraphe 1 de ce chapitre. Dans ce schéma, l'espace des signifiés regroupe les objets et les interprétants au sens de Peirce.

Comme tout schéma, il est certainement incomplet et perfectible. Nous essayons avant tout de rendre compte de la complexité des différentes relations entre les registres, les niveaux et les deux types de réalité. Le registre symbolique en tant que méta-niveau est séparé des autres registres. C'est le plan du « signifiant ». Il est en relation, à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique, avec le plan du « signifié » contenant le registre empirique et le registre des modèles, eux-mêmes incontournables pour une science expérimentale. Enfin, dès qu'il y a expérimentation, il est nécessaire de se déplacer entre réalité idéalisée et réalité perçue.

Barlet (1999, p. 1433) indique que l'approche de la chimie ne peut-être que « *multifactorielle* » et doit se mener dans une « *approche holistique et systémique fondée sur la diversité des interactions* ». Est-il alors possible d'envisager un enseignement proposant une mise en dialectique du plan du signifiant et du plan du signifié pour aider les élèves à se déplacer dans cette complexité ? Pour Soudani, Soudani-Bani, Roletto et Regis (2014) « *la relation Signe-Objet-Interprétant » est une relation d'investigation scientifique […] dans le domaine de l'enseignement – apprentissage* ». Peut-on envisager cette investigation en quatrième à partir de l'élaboration des formules chimiques ? À partir de quelles ressources ? Le modèle de l'atome disponible chez les élèves de quatrième nous semble proche de celui des chimistes du début du XIXe siècle qui ont commencé à élaborer les premières formules chimiques. Dans ce cas, l'histoire des sciences, notamment l'élaboration par les chimistes du langage symbolique, peut-elle être une ressource pour l'élaboration d'une investigation mettant en lien les deux plans, Signifiant/Signifié ? Nous ne cherchons surtout pas à refaire en classe ce qui s'est produit au cours de l'histoire. Ce serait aller à l'envers du travail que doit faire l'élève.

> *Les représentations externes des substances adoptées actuellement dérivent donc d'un cheminement tortueux suivi par les chimistes qui ont dû se représenter mentalement le monde microscopique permettant d'interpréter leurs observations macroscopiques. Ils en ont déduit des représentations externes pour communiquer entre eux. Les élèves ont une partie du chemin inverse à décrypter, soit à partir des représentations externes qui leur sont fournies pour se construire les représentations mentales qui correspondent au monde microscopique. (Le Maréchal & Cross, 2010)*

Mais nous référant à Tiberghien (2017), la référence épistémologique nous semble essentielle pour sélectionner les objets les plus pertinents à étudier et pour pouvoir élaborer des ressources d'enseignement.

Chapitre 3 : Cadres méthodologiques

Nous présentons dans ce chapitre trois cadres que nous souhaitons utiliser pour nos travaux : la reconstruction didactique pour l'utilisation de l'histoire des sciences en vue de proposer une investigation en cycle 4 au collège pour élaborer les formules chimiques, l'apprentissage par la problématisation et les espaces de contraintes, et la double approche didactique et ergonomique pour l'étude des pratiques des enseignants.

1. Enseigner le langage symbolique par l'histoire des sciences : une reconstruction didactique

> *Chemistry teaching should be revised according to contemporary demands of schooling. In order to move forward towards new teaching proposals, we must identify the genuine questions that generate 'chemical criteria' and we should focus on them for teaching. We think that a good strategy is to look for those criteria in the philosophy and history of chemistry, from the perspective of didactics of science. (Izquierdo-Aymerich, 2012)*

Pour commencer ce paragraphe, nous reprenons les fonctions jouées par l'histoire des sciences pour un usage didactique puis nous présentons le cadre développé par de Hosson (2011) que nous souhaitons utiliser dans cette recherche puis nous indiquerons le type de ressources historiques que nous voulons rechercher et leur adaptation possible en tant que « *media* » (de Hosson, 2011).

1.1 Histoire des sciences et didactique des sciences

La raison première des travaux de didactique en France en lien avec l'histoire des sciences est « *de nature épistémologique* » (de Hosson & Schneeberger, 2011). C'est le premier thème que (Martinand, 1993) repère dans la relation entre l'histoire des sciences et la didactique de la physique et de la chimie : l' « *histoire de la pensée scientifique et étude des conceptions* ». Se référant aux échanges d'idées dans la tradition française (Bachelard (1938), Halbwachs (1974),

Piaget et Garcia (1983)) et à plusieurs travaux de didactique (Saltiel et Viennot (1984) sur la mécanique, Benseghir (1989) sur l'électricité, Stavridou (1990) et Solomonidou (1991) sur la chimie), Martinand conclut qu' :

> *à condition de privilégier les obstacles persistants, rencontrés par une pensée adulte et réfléchie, ou par une activité instrumentée, obstacles bien mis à jour et interprétés par les recherches historiques, l'histoire fournit un terme de comparaison solide et suggère des hypothèses fructueuses pour l'étude des obstacles majeurs rencontrés par les étudiants. (Martinand, 1993, p.93)*

Plus récemment, de Hosson et Schneeberger (2011) repèrent trois autres axes thématiques dans le paysage actuel des recherches entre didactique et histoire des sciences.

> *Axe 1 : étude de l'apport de l'histoire des sciences pour l'apprentissage des lois et des concepts scientifiques ;*
>
> *Axe 2 : étude de l'apport de l'histoire des sciences pour approcher la nature de la science ;*
>
> *Axe 3 : étude des rapports entre l'Institution scolaire et l'histoire des sciences.*
>
> *(de Hosson et Schneeberger, 2011, p. 10)*

L'axe 2 se réfère aux travaux développés dans les pays anglo-saxons autour des questions éducatives relatives à la nature de la science (Nature of Science-NOS). En physique, on retrouve les travaux de Beaufils et Maurines qui définissent ainsi leur projet :

> *Notre projet se focalise sur un objectif général qui est de donner à travers l'histoire des sciences une image plus réaliste de l'activité scientifique et de la nature de la science, loin de celle transmise par les présentations iconiques d'illustres savants habituellement rencontrés. (Beaufils, Maurines & Chapuis, 2010, p. 592)*

En chimie, Laugier et Dumon (2000) reprennent à leur compte une remarque des programmes de la rentrée 2000 en seconde à propos de la dimension historique indiquant que « *l'enseignement scientifique doit montrer comment ces contenus sont élaborés* » (programme de seconde de 2000 cité par Laugier & Dumon, 2000). Ils proposent une séquence centrée sur la modélisation de la transformation chimique à partir de l'étude de textes historiques avec pour objectif :

> *de donner à nos élèves le moyen de comprendre comment fonctionne la science, à quelles questions répondent les concepts. En un mot il s'agit de donner du sens aux connaissances scientifiques. (Laugier & Dumon, 2000, p. 1263)*

À propos de l'axe 3, Guedj et Savaton (2007) remarquent que l'histoire des sciences occupe dans les programmes actuels de sciences une place significative mais ils constatent dans les ouvrages scolaires « *une approche caricaturale et anecdotique, voire erronée* » (Guedj & Savaton, 2007, p. 4).

Enfin pour l'axe 1 qui est celui que nous souhaitons suivre en priorité, de Hosson et Schneeberger (2011) écrivent :

> *On attend des travaux qui s'inscrivent sous cette modalité qu'ils éclairent le chercheur sur les difficultés que les élèves risquent de rencontrer au cours de leurs apprentissages, qu'ils permettent l'émergence de problèmes féconds et/ou la création de parcours d'apprentissages appropriés. (de Hosson & Schneeberger, 2011, p. 11)*

La recherche historique a pour nous un usage didactique qui doit nous permettre d'éclairer les difficultés des élèves, sélectionner les objets les plus pertinents à étudier d'un point de vue épistémologique et nous procurer les matériaux historiques pour élaborer un parcours d'apprentissage. Nous souhaitons nous intéresser plus particulièrement aux controverses historiques.

> *Une controverse historique peut être considérée comme un miroir épistémologique, pouvant éclairer les objectifs d'apprentissage dans l'enseignement des sciences en repères essentiels de problématiques, de nécessités et de ruptures épistémologiques. (Crépin-Obert, 2010a)*

1.2 Choix et utilisation des ressources historiques

Nous souhaitons amener les élèves à proposer des raisons entre le registre empirique et le registre des modèles pour élaborer des formules chimiques. Pour déclencher le questionnement, il nous semble nécessaire, en nous inspirant des travaux de De Vecchi et Carmona-Magnaldi (2015) de proposer aux élèves des situations déstabilisantes. Si la controverse historique peut nous aider dans le choix de nos objectifs d'apprentissage, elle peut également constituer une base de débat riche du point de vue des échanges (maître-élèves et élèves-élèves) (Guedj, 2005). La controverse permet, par l'interrogation du statut de l'erreur, de développer chez les élèves les arguments pour convaincre (Brehelin & Guedj, 2007). Nous devons donc rechercher l'existence de controverses au cours de l'élaboration des formules chimiques à partir, si possible, de textes suffisamment ciblés par rapport aux objectifs et rendant possible une mise en débat (Guedj, 2005). Nous observons plusieurs

utilisations possibles des sources primaires autour des controverses historiques pour l'enseignement :

- l'utilisation de plusieurs textes originaux à des fins de comparaison (de Hosson & Décamp, 2014; Laugier, 1998 ; Maurines & Mayrargue, 2007) ;
- l'utilisation d'un dialogue faisant intervenir les protagonistes de la controverse. On trouve dans ce cas l'utilisation en mécanique des extraits des dialogues originaux de Galilée (Guedj, 2005).

> *Indépendamment d'un travail centré sur la controverse, l'étude d'extraits célèbres et simples suscite l'intérêt des élèves qui, en « décodant » et interprétant les travaux d'un auteur, vont s'approprier davantage les résultats mais également le questionnement. (Guedj, 2005, p. 91)*

- la construction d'un dialogue fictif en optique à partir de ressources historiques primaires également sur le modèle des dialogues de Galilée (de Hosson & Kaminski, 2006).

Textes originaux ou dialogues sont souvent accompagnés pour les enseignants d'un scénario indiquant les activités et le type d'organisation pour le travail en classe ainsi que les objectifs poursuivis par la séquence. Mais les dialogues, si on envisage de faire débattre les élèves, présentent plusieurs avantages. Ils sont sans doute d'une forme plus accessible pour les élèves et la forme contradictoire, confrontant deux points de vue en réponse à une même question, peut faciliter l'engagement des élèves dans un débat.

> *Le déclencheur de l'activité argumentative est la mise en doute d'un point de vue (Plantin, 2005, p. 52)*

Les phases de désaccord sont déclenchées par les dialogues. Ils externalisent les prises de position « *en leur donnant une forme langagière et une configuration microsociale* » (Plantin, 2005) et peuvent faciliter celles des élèves. Des dialogues sous le format de ceux proposés par Galilée avec les trois personnages (Sagredo, Salviati et Simplicio) permettent de distribuer « *les rôles argumentatifs en fonction des trois actes fondamentaux, proposer, s'opposer et douter* » (Plantin, 2005). Il peut également y avoir un danger à présenter à des élèves le point de vue contradictoire, les élèves pouvant être amenés à retenir le point de vue non retenu par la science. Là encore, les dialogues peuvent présenter l'avantage de faire porter ce point de vue par Simplicio. On peut penser en effet qu'il y a peu de chances pour que les élèves

s'identifient à ce personnage. Les dialogues présentent toutefois un inconvénient par rapport aux textes originaux. Ils fournissent aux enseignants un document déjà finalisé difficilement modifiable. La proposition de plusieurs textes originaux leur laisse sans doute plus de liberté pour leur permettre de préparer leur séance.

Que ce soit à partir de textes originaux ou de dialogues originaux ou fictifs, nous envisageons d'utiliser les ressources historiques dans le cadre de la reconstruction didactique proposé par de Hosson (2011).

1.3 Le cadre de la reconstruction didactique

Dans le cadre de la reconstruction didactique, de Hosson (2011) propose d'élaborer des parcours d'apprentissage à partir d'idées qui, dans l'histoire des sciences, se sont révélées fructueuses en termes d'avancées conceptuelles. Elle propose d'associer histoire des sciences et enseignement pour « *créer une dialectique de nature épistémologique entre deux enquêtes l'une, centrée sur les raisonnements des élèves, l'autre tournée vers l'évolution des idées dans l'histoire des sciences* » (de Hosson, 2011, p. 33). Le matériau historique est utilisé comme support d'une mise à disposition d'informations, ce que de Hosson, (2011) nomme le « *media* » pour l'acquisition des savoirs scolaires. Pour cela (Figure 13), il est nécessaire de :

- repérer et analyser les difficultés des élèves et les contraintes créées par le cadre scolaire par le biais d'une enquête didactique ;
- réaliser une enquête historique afin d'éclairer certaines difficultés d'élèves et tirer profit de cette proximité pour extraire les informations historiques à réorganiser en lien avec les contraintes didactiques ;
- et enfin proposer une reconstruction didactique distincte des reconstructions historiques de référence.

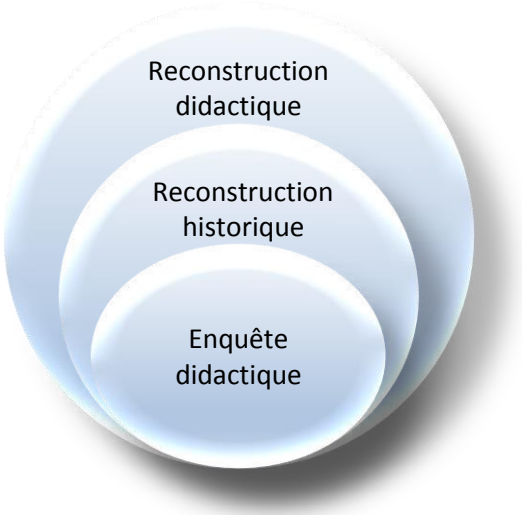


Figure 13 Organisation des projets d'enquête psycho-cognitive, de reconstructions historique et didactique (de Hosson, 2011, p. 35)

Elle conclut :

> *Selon cette perspective, les idées et les formes de raisonnements risquant de faire obstacle à l'apprentissage d'un savoir donné sont venues gouverner une exploration historique dont l'objectif visait à faire ressortir d'une part des situations ou des problèmes susceptibles d'être exploités au sein de la sphère scolaire et d'autre part des stratégies de résolution accessibles aux élèves. Ce travail dialectique entre la sphère didactique et la sphère historique a permis l'émergence de « reconstructions didactiques », nom que nous avons donné aux séquences d'enseignement conçues à partir d'une reconstruction historique et se donnant pour but l'apprentissage d'une loi ou d'un concept scientifique. (de Hosson, 2011, p. 43)*

Notre reconstruction didactique doit porter sur l'élaboration du langage symbolique, et plus particulièrement l'élaboration des premières formules chimiques présentées aux élèves en classe de quatrième. Nous faisons l'hypothèse que cela doit permettre d'aider à construire les concepts d'atome, de molécule puis de réactions chimiques. Cela suppose donc une première enquête du côté des élèves pour caractériser les types de difficultés rencontrées et les raisonnements qu'ils mettent en œuvre. La deuxième enquête est historique pour comprendre comment le langage symbolique s'est élaboré et trouver les ressources historiques potentielles. La dernière étape est alors la transformation de ces ressources en « *media* ». Enfin, nous souhaitons pouvoir rendre opérationnelle cette reconstruction didactique, ainsi que le suggère de Hosson dans sa conclusion (2011), et d'envisager à plus long terme des formations pour les enseignants. Il nous semble nécessaire pour cela de pouvoir caractériser l'écart entre les pratiques actuelles et une utilisation éventuelle de la

reconstruction didactique proposée. Nous envisageons donc de mener, en parallèle de l'enquête didactique avec les élèves, une enquête sur des pratiques enseignantes. Nous nommons l'ensemble « enquête préalable ». Elle doit permettre la reconstruction didactique et son opérationnalisation. Enfin de Hosson (2011) précise l'importance du débat contradictoire dans l'élaboration du savoir scientifique pour la reconstruction didactique.

> *L'un des ressorts pédagogiques récurrents des séquences que nous avons analysées (et qui visent l'apprentissage d'une loi ou d'un concept) est sans aucun doute la création des conditions permettant l'installation d'un débat contradictoire de classe. Il s'agit de choisir une question dont on prévoit qu'elle peut donner lieu à un débat au sein de la classe, et de concevoir un parcours cognitif qui prend appui sur ce débat et qui conduit les élèves vers la construction d'un savoir scientifique donné. (de Hosson, 2011, p. 32-33)*

Nous souhaitons alors utiliser deux nouveaux cadres :

- celui de la problématisation proposé par Orange (2000) en reprenant les espaces de contraintes que ce cadre génère pour nous aider dans l'enquête historique et les choix à effectuer pour le *media* ;

- celui de la double approche didactique et ergonomique proposé par Robert et Rogalski (2002) pour l'enquête sur des pratiques enseignantes.

Nous présentons maintenant ces deux cadres en lien avec notre recherche.

2. Pour l'analyse de l'élaboration historique du langage symbolique : la problématisation

Pour la reconstruction didactique, nous souhaitons repérer dans l'histoire de la chimie ce qui a permis dans le registre empirique et dans le registre des modèles l'élaboration des premières formules chimiques. Nous pensons pouvoir partir de ces raisons pour élaborer les ressources d'enseignement permettant de créer une dialectique entre registres symbolique, empirique et des modèles. Nous présentons dans ce paragraphe les espaces de contraintes développés par Orange (2000) et repris par Lhoste (2008), Crépin-Obert (2010a) et Martinez Barrera (2014) dans leurs thèses. Nous voulons montrer en quoi ces espaces de contraintes semblent adaptés à notre projet, tout en nécessitant quelques adaptations permettant d'inclure le registre symbolique de la chimie. Pour arriver aux espaces de contraintes, nous commençons par présenter brièvement le cadre de la problématisation.

2.1 Problème et problématisation dans l'activité scientifique et dans l'activité pédagogique

Le problème est au cœur de l'activité scientifique. Fabre parle même de paradigme du problème (Fabre, 2009).

> *[…] le sens du problème est caractéristique de l'esprit scientifique.(Bachelard, 1967, p. 51)*

Tout processus de problématisation s'appuie sur un dédoublement, soit des faits et des idées pour Dewey, soit de l'expérience et de la théorie pour Bachelard (Fabre, 2005).

> *Problématiser, c'est donc développer un questionnement visant à identifier les données et les conditions du problème et à les mettre en tensions. (Fabre & Musquer, 2009, p. 113)*

Orange (2000) cherche à définir les caractéristiques des problèmes scientifiques et leurs relations avec les savoirs scientifiques dont l'une d'elles est la dynamique problème – savoir.

> *[…] un savoir scientifique n'est pas seulement un savoir qui permet de résoudre des problèmes ; c'est aussi un savoir qui permet d'en formuler de nouveaux, dont le travail va faire progresser en retour les connaissances et le savoir. (Orange, 2000, p. 20)*

Suivant le point de vue des épistémologues non positivistes (Bachelard, Canguilhem, Popper), « *faire des sciences c'est d'abord chercher des raisons* » (Orange, 2000, p. 24). Avant que la réponse à un problème ne devienne un savoir scientifique, deux questions sont essentielles pour la transformation et le développement de la problématique : « *Comment est-ce possible ? Pourrait-il en être autrement ?* » (Orange, 2005, p. 77)

> *[…] il ne s'agit pas simplement de construire un problème pour produire une solution, mais d'explorer et de « cartographier» le champ des possibles. (Orange, 2005a, p. 77)*

Se référant à Martinand (Figure 4), Orange explique que cela passe par la mise en relation des deux registres : empirique et des modèles. On passe des connaissances ordinaires aux savoirs scientifiques en recherchant les raisons qui articulent contraintes empiriques et nécessités du modèle (Figure 14).

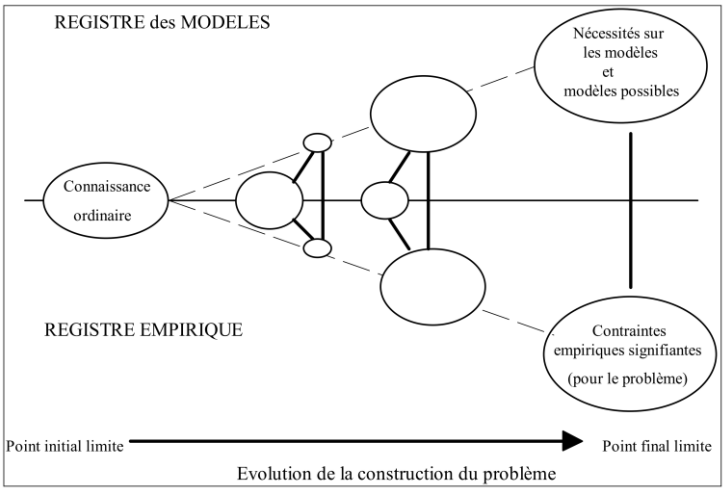


Figure 14 Une représentation de la construction du problème : de la connaissance ordinaire au savoir scientifique(Orange, 2000, p. 27)

Les nécessités se construisent par la mise en tension du registre empirique et du registre des modèles. Elles permettent ainsi de prendre conscience de ce qui est possible et de ce qui ne l'est pas (Orange, 2005a).

> *[…] les trajets problèmes-solutions permettent de construire la carte de la problématisation, celle du champ des possibles et des nécessités qui l'organisent. Et c'est ce qui institue les concepts scientifiques. (Orange, 2005a, p. 87)*

Il s'agit ici des concepts formels, et non catégoriels, dont la nécessité s'impose et qui prennent ainsi un caractère apodictique (Orange, 2005a).

> *Faire des sciences c'est donc abandonner une connaissance d'opinion, une connaissance mal questionnée, assertorique, c'est-à-dire réduite à un simple constat, pour une connaissance qui, une fois problématisée, sera fondée en raison, deviendra apodictique. (Fabre & Orange, 1997, p. 40)*

2.2 Espace des contraintes

Orange propose de visualiser les contraintes et les nécessités qui sont mobilisées par les scientifiques au moment de l'élaboration des savoirs scientifiques ou des élèves au moment de la construction des connaissances dans un espace dit des contraintes (Orange, 2000). Il l'utilise notamment dans le cas de la construction du concept de « milieu intérieur » par Claude Bernard (Figure 15). Cette représentation est également reprise par Crépin-Obert (2010a) dans sa thèse pour étudier une controverse historique sur l'origine des fossiles entre Voltaire et Guettard.

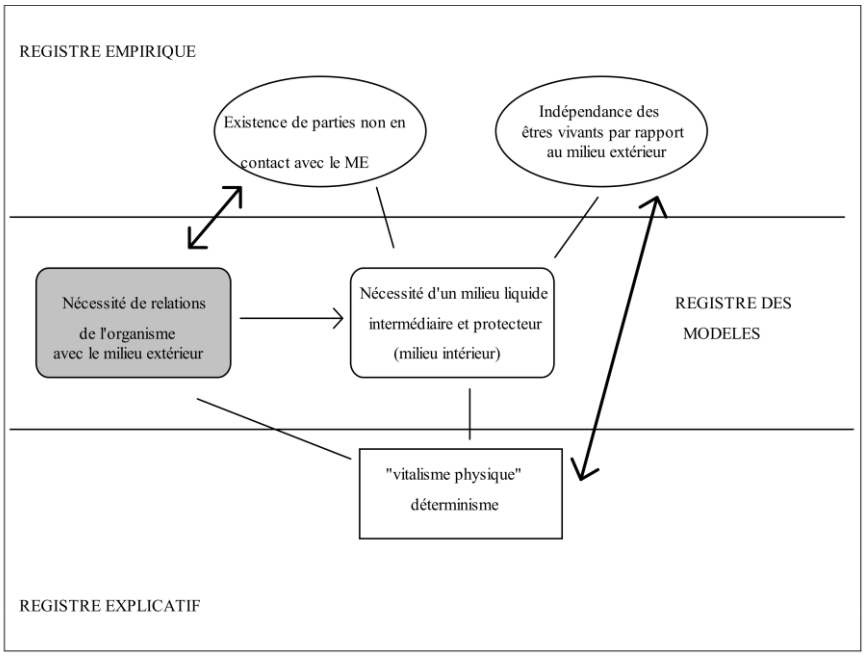


Figure 15 Espace des contraintes de la deuxième problématisation du milieu intérieur par Claude Bernard (Orange, 2000)

Lhoste et Peterfalvi (2009) utilisant ce cadre pour analyser un débat en classe et les raisonnements des élèves, observent dans leurs formulations qu'il n'y a pas « *de correspondance directe entre l'appartenance d'une proposition à tel ou tel registre (empirique ou des modèles) et son statut épistémique de contrainte ou nécessité* » (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 49). L'usage de ces espaces fait apparaître des contraintes théoriques pour le processus de problématisation et qui ne sont donc pas discutées. Ces auteurs proposent alors :

> *de considérer comme nécessité un construit nouveau sur la base d'un raisonnement actuel, alors qu'une contrainte serait un déjà-là convoqué dans un tel raisonnement. Ainsi une nécessité relève de l'apodictique et vient contraindre les solutions possibles. Cela nécessite la mise en œuvre d'un raisonnement qui a une prétention à une certaine généralité. (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 49)*

Les idées et les faits relèvent de leur côté de l'assertorique. Les contraintes théoriques peuvent correspondre à des idées qui font obstacle à la construction des connaissances visées (Lhoste & Peterfalvi, 2009). Lhoste (2008) propose dans sa thèse un espace des contraintes modifié : les espaces contraintes et nécessités (Figure 16).

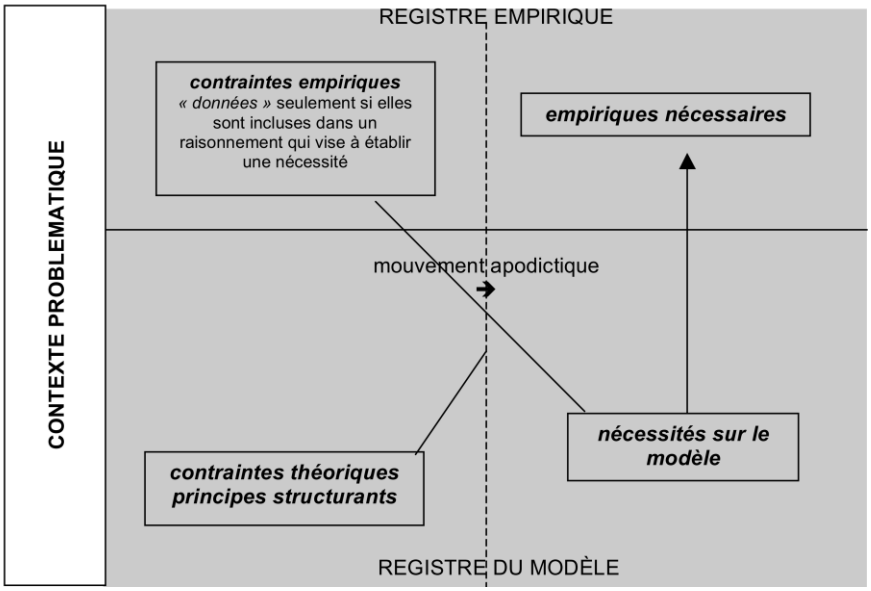


Figure 16 Une représentation modifiée des « espaces de contraintes » : les « espaces contraintes et nécessités » (Lhoste, 2008, p. 79)

Il ajoute une séparation permettant de distinguer les contraintes dans la partie gauche, des nécessités dans la partie droite. Les nécessités empiriques correspondent aux objets empiriques trouvés au sein de questionnements à partir de nécessités sur les modèles construits (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 84).

Dans les différentes représentations, figure soit le registre explicatif (Orange, 2000), soit le contexte problématique (Lhoste & Peterfalvi, 2009), soit le cadre épistémique (Crépin-Obert, 2010b ; Orange, 2005a).

Le registre explicatif intervient pour organiser la mise en tension entre les registres et fonde une ou plusieurs grandes logiques explicatives (Orange, 2000).

> *Les modèles sont liés à un troisième registre, dont ils tirent leur valeur heuristique et leur intelligibilité, et qui correspond aux références explicatives spontanées ou habituelles du modélisateur : c'est ce que nous avons appelé le registre explicatif. (Orange, 2000, p. 25)*

Pour les scientifiques, on peut comparer le registre explicatif au paradigme défini par Kuhn, (1989) puisque partagé par une communauté, ce qui n'est plus le cas pour les élèves (Orange & Orange-Ravachol, 2013). Il nous semble que doivent apparaître dans ce cadre les théories scientifiques auxquelles se réfèrent les modèles proposés en tant que contraintes ou nécessités. Lhoste et Peterfalvi (2009) soulignent qu'à l'usage le registre explicatif semble devenir une simple caractérisation du mode de raisonnement.

Le cadre épistémique correspond à celui défini par Piaget et Garcia (1983). L'activité intellectuelle entre le problème perçu et la solution met en jeu les connaissances de la personne mais également des aspects plus larges qui font partie de son cadre épistémique (Orange, 2005a). Crépin-Obert (2010b) et Orange (2005a) utilisent le cadre épistémique dans l'analyse des situations historiques et les registres explicatifs en contexte scolaire. Le terme cadre indique de plus un ensemble structuré, ce qui n'est pas nécessairement le cas pour les registres explicatifs des élèves.

Le contexte problématique est « *l'ensemble des ressources disponibles (conceptuelles, sémiotiques, langagières…) qui permettent d'entrer dans le processus de problématisation et de l'orienter de différentes façons* » (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 85).

Registre explicatif et contexte problématique peuvent sans doute être rapprochés de la matrice cognitive de Martinand (1998).

2.3 Pour l'analyse du corpus historique : un espace des contraintes et nécessités pour le langage symbolique de la chimie

Nous nous intéressons, au cours de l'enquête historique, aux raisons qui ont permis l'élaboration des différentes formules. Nous souhaitons utiliser les espaces de contraintes et nécessités pour faire émerger à partir de l'enquête historique les raisonnements tenus par les chimistes du XIXe siècle et mettre ainsi en évidence les controverses autour du langage symbolique. Nous faisons l'hypothèse que ces formules se sont élaborées en tension entre les registres des modèles et le registre empirique, au moins pour les atomistes de la première moitié du XIXe siècle. Nous voulons mener cette enquête en suivant l'évolution d'un « construit nouveau » et nous pensons alors retrouver des contraintes théoriques et des nécessités empiriques (Lhoste & Peterfalvi, 2009). Nous décidons de reprendre l'espace des contraintes et des nécessités de Lhoste et Peterfalvi (2009) mais en remplaçant le contexte problématique par le cadre épistémique (Figure 17). Ce dernier doit contenir les différents registres explicatifs utilisés par chaque chimiste en tant que fondements de leur logique explicative. Pour l'adapter à la chimie, nous ajoutons un registre symbolique. Notre enquête historique porte sur l'élaboration des formules chimiques. Nous supposons que cela s'est construit par la recherche de possibles entre registre empirique et registre des modèles. Nous plaçons alors le registre symbolique au centre (Figure 17). Nous illustrons également ainsi le

langage en tant que méta-niveau entre le niveau macroscopique (registre empirique) et le niveau microscopique (registre des modèles). Les modèles utilisés dans la première moitié du XIXe siècle sont microscopiques, les modèles thermodynamique et cinétique n'apparaissant que bien plus tard.

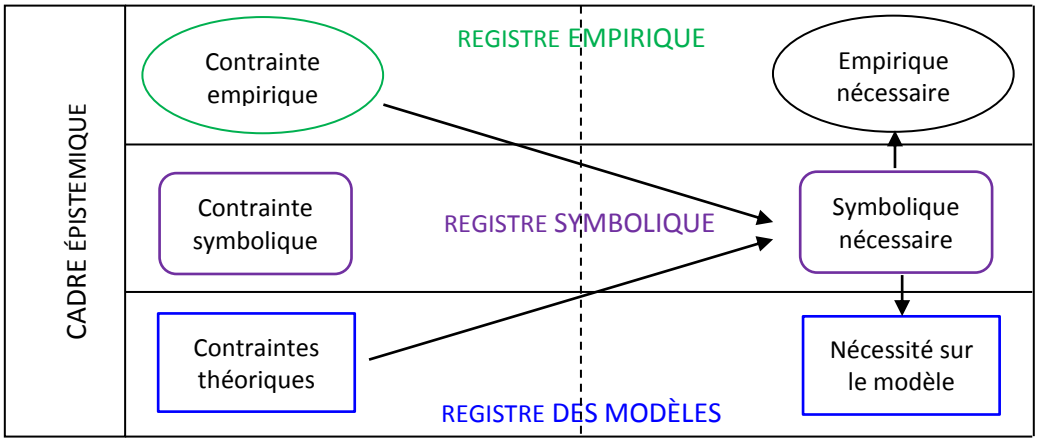


Figure 17 Espace des contraintes et des nécessités pour le langage symbolique de la chimie

Nous recherchons en priorité les contraintes empiriques et théoriques qui ont conduit à des nécessités pour le registre symbolique. Mais le symbolique a aussi été un outil pour de nouvelles connaissances (Klein, 2001b). Nous pensons alors qu'il est possible que le symbolique soit à l'origine de nécessités dans le registre des modèles ou dans le registre empirique. Les contraintes symboliques correspondent à ce qui est « *déjà là* » pour l'écriture de la formule finale (Lhoste & Peterfalvi, 2009).

2.4 Pour l'élaboration du « media »

L'élaboration d'un savoir scientifique doit passer par la construction de nécessités. Orange propose de mettre au centre de l'activité scolaire les problèmes explicatifs : « *ceux qui mettent en concordance des faits et de la théorie* » et qui vont relier registre empirique et registre des modèles (Orange, 2000, p. 26).

> *En caractérisant la problématisation scientifique par la construction de nécessités et en menant des recherches empiriques qui déterminent, pour un domaine donné, les nécessités accessibles aux différents niveaux de la scolarité, nous pouvons fournir aux enseignants des repères pour conduire la problématisation des élèves.(Orange, 2005a, p. 87)*

Nous souhaitons nous placer dans ce cadre pour la reconstruction didactique. Celle-ci doit pouvoir proposer aux élèves des données expérimentales et un ou plusieurs registres explicatifs leur permettant de rechercher les contraintes et les nécessités pour l'élaboration

des formules. Nous pensons que les controverses historiques peuvent déclencher le questionnement des élèves. Pour cela, il faut également pouvoir s'appuyer provisoirement sur des bases stables : « *les données du problème et le savoir-déjà là pour leur traitement* » (Fabre, 2005, p. 57).

> *Une problématique - aussi vaste soit-elle – ne peut s'engager que sur un horizon de certitudes au moins provisoires : l'ensemble des constats, concepts ou théories qui constituent les points fixes, les points d'appui du questionnement. Toute problématique possède donc un caractère local : une question ne peut surgir que si tout n'est pas mis en question. (Fabre, 1999, p. 63)*

Le choix de la situation et des questions initiales à poser aux élèves est donc fondamental dans la démarche et doit pouvoir s'appuyer sur ce déjà-là. Et c'est ce savoir requis initialement pour introduire les formules chimiques, le concept atome et le concept de molécule, que le questionnement sur les formules chimiques en lien avec les faits empiriques doit faire évoluer. Dans l'élaboration du « media », et pour permettre aux élèves l'accès à un savoir problématisé, il nous faut rechercher des raisons accessibles aux élèves dans leurs connaissances déjà-là, identifier les conditions permettant aux élèves d'accéder à ces raisons et étudier les conditions de faisabilité dans la classe.

La problématisation en classe passe par un débat argumenté. Nous touchons alors à ce qui se joue en classe. Il nous semble nécessaire de faire également un état des lieux de ce qui se fait en classe au moment de l'élaboration du langage symbolique. Pour analyser les pratiques enseignantes, nous allons nous placer dans le cadre de la double approche didactique et ergonomique.

3. Pour l'analyse des pratiques enseignantes : la double approche didactique et ergonomique

L'activité réelle d'un enseignant ne peut être de l'ordre du « *dire* ». Elle est ce qui est développé au moment du « *faire* » et donc en classe (Robert & Vivier, 2013, p. 116). Pour pouvoir être au plus près des pratiques, nous prévoyons de filmer des enseignants au cours de leur séance d'introduction des formules chimiques en quatrième. Nous cherchons à travers l'analyse de ces vidéos à repérer les choix didactiques des enseignants à propos de l'apprentissage du langage symbolique. Pour explorer cela, nous nous plaçons dans le cadre

de la double approche dérivée des théories de l'activité de Léontiev et définie par Robert et Rogalski (2002) en didactique des mathématiques comme cadre d'analyse du travail de l'enseignant et repris en didactique de la chimie (Kermen & Barroso, 2013 ; Kermen & Colin, 2017). Ce cadre se réfère aux théories de l'apprentissage « *centrées sur le développement des connaissances (incluant la conceptualisation) par l'activité du sujet directement ou via la médiation d'autrui (les lignées de Piaget et Vygotsky)* » (Rogalski, 2015, p. 68).

> *Dans une autre voie constructiviste, la théorie articule deux dynamiques référant à la fois à Piaget et à Vygotsky : un mouvement de connaissance émergeant de l'activité propre de l'élève et un mouvement où c'est l'activité de l'enseignant qui « tire vers le haut » la connaissance de l'élève vers les contenus visés (pour nous les savoirs scientifiques, en mathématiques et sciences de la nature). L'enseignant « étaye » la construction de savoirs nouveaux, non seulement en disant quoi faire et comment (« aides procédurales ») mais aussi en aidant l'élève à repérer « à quoi on joue dans la situation », à identifier ce qu'il a déjà su produire, à lui donner des outils pour réfléchir à ce qu'il a fait (« les aides constructives » dans le cadre de l'analyse de l'activité enseignante par A.Robert). Ici les cadres théoriques de Piaget et de Vygotsky sont articulés, aussi bien pour analyser le couple « enseignement / apprentissage », en donnant toute leur place à la fois à l'activité de l'élève et à celle de l'enseignant, que pour outiller la formation des enseignants. (Rogalski, 2015, p. 70)*

3.1 Recherche des régularités et variabilités

Tous les ergonomes font l'hypothèse qu'une activité professionnelle est nécessairement cohérente. « Elle combine invariance et variabilité » (Pastré, 2007, p. 82). Nous allons donc chercher ce que nous pouvons considérer comme robuste dans les pratiques des enseignants en considérant que celles-ci sont assez stables (Robert & Rogalski, 2002). Cette robustesse peut provenir des contraintes institutionnelles mais aussi d'une même vision de la chimie, des habitudes prises, d'un même niveau de connaissances des enseignants. L'analyse par la double approche des pratiques a permis dans plusieurs recherches portant sur l'enseignement des mathématiques et de la chimie de montrer des régularités et des variabilités dans les pratiques à la fois inter-personnelles entre plusieurs enseignants placés dans des contextes identiques et également intra-personnelles pour un même enseignant (Horoks, 2008 ; Kermen & Barroso, 2013 ; Kermen & Colin, 2014 ; Masselot & Robert, 2007 ; Robert & Vivier, 2013 ; Roditi, 2003). Pour ce qui relève de l'intra-personnel, Robert (2007) fait l'hypothèse qu'il est

plus difficile pour un enseignant expérimenté de changer sa gestion de classe plutôt que le contenu de la séance. En inter-personnel, Roditi (2003) montre que les choix en termes de savoir sont très contraints alors qu'il y a une plus grande latitude dans les choix de déroulement des séances.

Nous faisons alors l'hypothèse que le cadre de la double approche peut nous permettre d'étudier les pratiques ordinaires stabilisées des enseignants expérimentés en identifiant les contraintes existantes quand ils enseignent le langage symbolique de la chimie et en mettant en évidence la cohérence de leur démarche. Nous pensons pouvoir effectuer cette étude à partir des vidéos.

> *Nous postulons que cette cohérence est repérable dans les préparations de séances, les déroulements, les discours des enseignants et des enseignantes, par des régularités entre épisodes dans une séance, entre séances, des routines dans la classe (répétitions quasi-automatiques d'actions, de discours, d'enchaînements). (Robert & Rogalski, 2002, p. 518)*

3.2. Une démarche pour aborder l'activité de l'enseignant

La double approche didactique et ergonomique s'appuie à la fois sur la didactique de la discipline à enseigner et sur les cadres et méthodes d'analyses développés en psychologie du travail, l'enseignant étant considéré comme un professionnel avec des « buts » à atteindre (Rogalski, 2000). Elle vise à analyser les pratiques des enseignants. On entend par pratiques « *tout ce qui se rapporte à ce que l'enseignant pense, dit ou ne dit pas, fait ou ne fait pas, sur un temps long, que ce soit avant, pendant ou après les séances de classe* » (Masselot & Robert, 2007, p. 17). Les pratiques peuvent s'interpréter au regard des contenus chimiques à enseigner, l'enseignant ayant comme objectif leur apprentissage par les élèves, mais cela reste insuffisant pour expliquer l'ensemble des choix effectués par celui-ci. L'enseignant exerce en effet un métier avec ses contraintes, notamment institutionnelles avec les programmes et les horaires, et sociales avec « *l'organisation sociale de l'enseignement dans l'établissement* » (Robert, 2010, p. 91). Il est de plus une personne singulière. Ses connaissances personnelles telles que les connaissances disciplinaires, didactiques et épistémologiques, vont avoir un effet sur ses pratiques. L'enseignant en tant qu'individu gère à la fois « *les contraintes auxquelles il fait face (aspect ergonomique) et les particularités des situations d'enseignement-apprentissage (aspect didactique)* ». (Kermen, 2016)

Nous ne cherchons pas à analyser les pratiques des enseignants dans leur globalité mais les choix qu'ils vont faire au moment où ils vont introduire en classe les formules chimiques. Nous nous situons donc plutôt au niveau des activités considérées comme des moments identifiés dans le temps et l'espace des pratiques. L'activité est « *la manière dont un acteur s'approprie la tâche et l'effectue* » (Pastré, 2007, p. 81 référant à Leplat, 1997). C'est ce qui est provoqué par la tâche, celle-ci étant « *un but dans des conditions déterminées* » (Pastré, 2007, p. 81 citant Léontiev, 1975). L'activité de l'enseignant a pour but de transformer l'activité des élèves. Cette dernière correspond à l'analyse de leur travail pour réaliser la tâche, soit tout ce qu'ils doivent faire en classe. Écouter, recopier, faire un schéma, une expérience, … et résoudre un exercice en sont des exemples. Chacune des étapes nécessaires à la résolution de l'exercice peut être considérée comme une sous-tâche. L'analyse des tâches permet notamment de déterminer les connaissances et savoir-faire que l'élève doit mobiliser. On peut distinguer des tâches simples et des tâches complexes. Les premières mettent en jeu « *une connaissance ou un savoir-faire cité dans la formulation de la tâche* » (Kermen & Colin, 2017). Les deuxièmes demandent à l'élève d'organiser ses connaissances (Horoks, 2008) et d'aller chercher parfois lui-même les outils nécessaires pour pouvoir réaliser la tâche en réorganisant ses connaissances, en reformulant le problème posé pour le ramener à des tâches simples, en recherchant les données nécessaires à la résolution de la tâche, etc.

L'activité de l'enseignant est régulée par ce qu'il veut faire au cours de la séance et donc par la situation qu'il va élaborer. Mais ce qui va se passer en classe dans l'interaction avec les élèves va avoir des effets sur son activité. Il s'agit de la double régulation de l'activité (Figure 18) (Robert, 2010 ; Robert & Rogalski, 2002 ; Roditi, 2003 ; Rogalski, 2000).

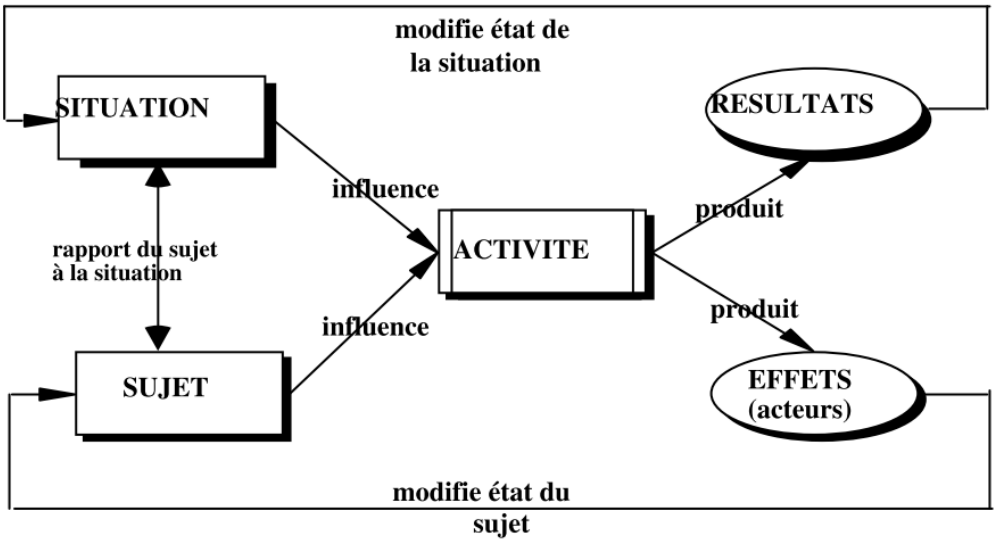


Figure 18 La double régulation de l'activité (Rogalski, 2000, p. 4)

Pendant la séance, l'activité de l'enseignant va produire des effets d'une part « sur le rapport des élèves avec le contenu enseigné, et d'autre part, sur l'enseignant lui-même » (Rogalski, 2000, p. 4). Les réactions des élèves, leur investissement dans les tâches proposées, leurs réponses et leurs éventuelles difficultés par rapport au contenu proposé, peuvent amener l'enseignant à adapter l'action *in situ* mais peuvent aussi enrichir ses connaissances du contexte scolaire et didactiques, ce qui peut alors l'amener à reprendre la situation.

> *S'ensuivent trois ordres de conséquences pour l'activité de l'enseignant : il lui faut préparer et gérer la « route didactique » conçue pour faire agir les élèves sur des tâches visant leur apprentissage ; il lui faut aussi « enrôler » les élèves dans le procédé didactique retenu ; enfin, l'enseignant a une fonction de médiation directe entre les élèves et le contenu enseigné. (Rogalski, 2000, p. 14)*

Analyser l'activité effective des élèves, ce qu'ils vont faire pour résoudre les tâches, en tenant compte de la gestion effective de la classe doit nous permettre d'approcher l'activité de l'enseignant. Celle-ci n'est pas observable en tant que telle mais peut être inférée à partir des actions et des opérations.

> *- l'activité est orientée par un motif / un mobile : c'est ce qui mobilise le sujet pour s'engager dans l'action ; elle n'est pas observable en tant que telle ;*
>
> *- l'activité s'accomplit par les réalisations de buts, à travers des actions sur les objets de la tâche ; les actions sont médiatisées par des instruments ;*
>
> *- les opérations sont les moyens par lesquels l'action est réalisée ; elles sont organisées dans l'action pour modifier l'objet vers le but visé : les actions et les opérations peuvent être*

observables dès lors qu'elles produisent des traces, sur l'objet de l'action ou sur les instruments utilisés (Rogalski, 2015, p. 65).

3.3. Trois niveaux d'analyse

Dans ce cadre, les pratiques peuvent s'analyser suivant trois niveaux d'échelles (Masselot & Robert, 2007) :

- un niveau « micro » où on retrouve les automatismes dans les gestes professionnels et dont les enseignants n'ont sans doute plus conscience ;
- un niveau « local » qui est celui du quotidien dans la classe (Robert, 2010, p. 91) ;
- un niveau « macro » qui correspond à la progression de l'enseignant et qui inclut ses intentions mais également ses conceptions et ses valeurs (Pastré, 2007, p. 89).

Le niveau « micro » doit nous permettre d'observer au plus près les habitudes des enseignants dans l'utilisation du langage symbolique et notamment l'utilisation en tant que méta-niveau. Il aurait fallu pour réaliser cette étude suivre les enseignants sur plusieurs séances de chimie après l'introduction des formules chimiques en quatrième. Nous n'avons pas pu matériellement mettre cela en place. Nous avons alors décidé de travailler pour l'essentiel à partir d'une enquête au niveau « local ». Pour l'enquête préalable, nous sommes allée observer deux enseignants dans leur classe au moment où ils introduisent les formules chimiques à partir de leur propre scénario. Nous avons pu filmer deux enseignants, dont un ayant participé à l'enquête préalable, au moment où ils ont utilisé une partie des ressources historiques que nous leur avons proposées. Un des enseignants a participé aux deux enquêtes. Nous disposons donc pour lui d'un suivi à un an d'intervalle. Enfin, avant et après chaque séance filmée, nous avons mené un entretien avec les enseignants au cours duquel nous leur avons demandé de nous décrire leurs intentions. Nous cherchons à avoir accès à certaines connaissances du niveau macro, dont leurs conceptions à propos du langage symbolique et des difficultés des élèves sur ce point.

3.4 Les cinq composantes

La double approche propose d'analyser les pratiques à travers cinq composantes. Celles-ci doivent permettre d'avoir accès aux « déterminants des pratiques par des descriptions de

pratiques en classes » (Robert, 2003, p. 111). Kermen (2016, p. 79) rassemble les déterminants des pratiques dans la figure ci-dessous.

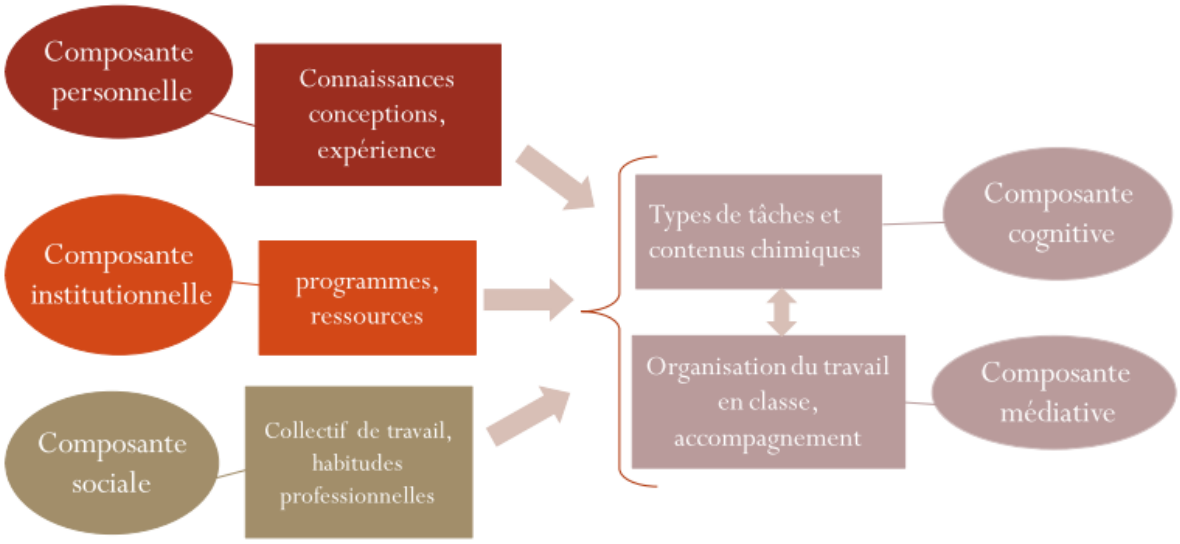


Figure 19 Une représentation des cinq composantes des pratiques (Kermen, 2016, p. 79)

Les composantes cognitive et médiative (Figure 19) sont reliées aux choix des enseignants en termes de contenu chimique, de tâches proposées aux élèves et de gestion de la séance en lien avec le contenu et les tâches. La composante cognitive donne accès aux scénarios prévus. Elle donne les informations sur l'environnement chimique dans lequel l'élève est placé et sur *« l'itinéraire cognitif »* choisi par l'enseignant (contenu chimique, tâches prescrites) (Robert & Rogalski, 2002, p. 507). La composante médiative donne accès aux déroulements, forme de travail et accompagnement des élèves par les enseignants dans le déroulement de la tâche (Robert & Rogalski, 2002).

Les composantes institutionnelle, sociale et personnelle des enseignants (Figure 19) permettent de comprendre les choix des enseignants en termes de déterminants institutionnel, social ou personnel. Dans cette dernière, on essaie notamment de repérer les connaissances didactiques et épistémologiques de l'enseignant à propos des contenus à enseigner. La composante institutionnelle permet de comprendre comment l'enseignant tient compte de ce type de contraintes dont notamment les horaires, les programmes, les ressources telles que les manuels scolaires. Pour les enseignants en sciences expérimentales, il convient de prendre en compte l'aspect organisationnel concernant l'utilisation des salles de travaux pratiques (Kermen, 2016).

Enfin on étudie les habitudes professionnelles dans la communauté disciplinaire et dans l'établissement qui sont associées à la composante sociale. Les élèves de la classe, en ce qu'ils

appartiennent à des groupes sociaux, font partie des déterminants des pratiques de l'enseignant (Masselot & Robert, 2007 ; Robert & Rogalski, 2002). L'analyse *a priori* (ce que dit l'enseignant de ce qu'il va faire), *a posteriori* (ce que dit l'enseignant de ce qu'il a fait) et l'analyse de l'action dans la classe peuvent se faire au regard de ces cinq composantes mais non par une simple juxtaposition de ces dernières. Prendre en compte la complexité des pratiques revient à les analyser à partir d'une recomposition des composantes (Robert, 2010). Comme nous l'avons déjà signalé, nous nous intéressons uniquement à l'activité des enseignants. Mais il s'agit bien d'une partie des pratiques, ce qui légitime pour Kermen et Colin (2017) de conserver les mêmes critères d'analyse et donc de travailler à partir des mêmes composantes.

Chapitre 4 : Problématique et questions de recherche

1. Problématique

Les chimistes ont élaboré ce que nous pouvons considérer comme un véritable langage.

> *[…] language is an essential aspect of chemistry and there can be no doubt that chemical language in more than one way influences the course taken by chemical research. It is therefore essential to understand how chemists' use their language, what rules govern its use, and what consequences the utilization of this language has for chemistry as a whole. (Jacob, 2001, p. 31)*

Pour compléter les propos de Jacob, il nous semble également essentiel de comprendre comment le langage est enseigné et comment il pourrait être enseigné. Nous nous intéressons plus particulièrement au premier niveau de langue décrit par Jacob (2001), celui qui permet de nommer les substances, le langage symbolique. Outil de communication (Taber, 2013) ou « *constituant un niveau à part entière au même titre que d'autres niveaux* » (macroscopique, expériences, modèles, empirique, etc.) comme le suggèrent Talanquer et Dumon (Dehon & Snauwaert, 2015, p. 213), il est également un outil pour penser la chimie (Bachelard, 2010 ; Klein, 2001b). Il permet de communiquer et de raisonner simultanément dans le niveau macroscopique et dans le niveau microscopique. Il s'agit d'un méta-niveau (Canac & Kermen, 2016). Toutes ces raisons en font un registre des représentations à part dans les disciplines scientifiques. Nous faisons l'hypothèse que les spécificités du langage symbolique et les

difficultés qu'elles peuvent entraîner pour l'apprentissage de la chimie ne sont pas suffisamment prises en considération par l'institution scolaire et les enseignants.

Il n'y a pas de chimie sans concept d'espèce chimique. Celui-ci est donc introduit dès les premières années d'enseignement de la chimie et nécessairement avec ses exemples. Il faut donc pouvoir les nommer. L'apprentissage du langage symbolique est donc incontournable pour tout novice en chimie, au moins pour communiquer. Mais nous pensons qu'il est aussi l'outil qui peut permettre de faire le lien entre le registre empirique avec l'espèce chimique et la transformation chimique, et le registre des modèles, avec le modèle particulaire de la matière et le modèle de la réaction chimique. En tant qu'outil à la fois pour communiquer mais aussi pour penser les concepts tels qu'espèce chimique, atome, molécule, transformation et réaction chimique, nous faisons l'hypothèse que sa non-maîtrise est un des facteurs concourant aux difficultés rencontrées par les élèves en chimie. Nous faisons l'hypothèse que l'apprentissage du langage symbolique, en dialectique avec les faits empiriques et les modèles de la chimie, peut constituer un outil didactique pour améliorer la compréhension des concepts scientifiques qu'ils représentent.

Nous faisons le choix de cibler notre travail sur l'introduction des formules chimiques en classe de quatrième. Nous allons montrer que les formules chimiques sont données aux élèves en cycle 4 comme un fait arbitraire. Pour que les élèves donnent du sens aux combinaisons d'atomes dans les formules chimiques des molécules associées aux espèces chimiques, nous pensons que la recherche des outils théoriques et des connaissances empiriques qui ont permis l'élaboration de ces formules est plus importante que la connaissance de la « bonne » formule. Nous nous intéressons à la position et à la définition du problème avant sa solution.

> *[…] l'élève ne peut donner sens aux connaissances scientifiques qu'en les appréhendant comme solutions possibles de problématiques élaborées en classe. (Fabre & Orange, 1997, p. 55)*

Les formules chimiques se sont élaborées historiquement autour de plusieurs controverses à partir de contraintes empiriques, en lien avec les espèces chimiques et leurs transformations chimiques, mais également à partir des contraintes du registre des modèles, notamment avec le concept d'atome et celui de molécule. Nous souhaitons donc à partir d'une reconstruction didactique élaborer un media à partir de ces controverses historiques. Nous faisons l'hypothèse que l'utilisation de ce *media* en classe doit permettre aux élèves d'élaborer les

contraintes et les raisons quant à l'élaboration de ces formules, celles-ci prenant appui sur les concepts microscopiques et macroscopiques entre registre empirique et registre des modèles.

Pour vérifier ces hypothèses, nous structurons notre recherche en trois parties (Figure 20).

- Dans la partie 2 (enquêtes préalables) (Figure 20), nous cherchons ce que l'institution propose pour l'enseignement du langage symbolique et ce que disent et font les enseignants. Puis nous cherchons à identifier les difficultés des élèves à propos du langage symbolique.

- Dans la partie 3 (enquête historique) (Figure 20), nous étudions comment le langage symbolique s'est élaboré puis nous recherchons les éventuelles controverses historiques à propos des premières formules chimiques.

- Dans la partie 4 (reconstruction didactique) (Figure 20), nous concevons des outils didactiques ou « *media* » (de Hosson, 2011) et réalisons les premières expérimentations d'une séquence d'enseignement : la reconstruction didactique proposant un travail de problématisation entre les différents registres de la chimie.

Partie 1 :
Enjeux de la recherche
- Langage symbolique de la chimie
- Registres de la chimie
- Cadres théoriques
  - Reconstruction didactique
  - Problématisation
  - Double approche didactique et ergonomique

Hypothèses de travail :
- L'enseignement du langage symbolique de la chimie en tant que méta-niveau n'est pas pris en compte par l'institution scolaire et les enseignants.
- Sa non-maîtrise peut être source de difficultés pour les élèves dans la compréhension des concepts chimiques.
- Un enseignement mettant en dialectique l'élaboration du langage symbolique avec le registre empirique et le registre des modèles doit pouvoir constituer un outil didactique permettant l'élaboration des concepts d'atome, de molécule et de réaction chimique dans le registre des modèles, et d'espèce chimique et de transformation chimique dans le registre empirique.
- Une reconstruction didactique doit permettre, à partir des controverses historiques, l'apprentissage du langage symbolique en dialectique avec les registres empirique et des modèles.

Partie 2 :
Études préalables
- Institution
- Élèves
- Enseignants

Partie 3 :
Enquête historique
- Élaboration du langage symbolique de la chimie dans l'histoire
- Les controverses autour des formules chimiques pour une reconstruction didactique

Partie 4 :
Une reconstruction didactique
- Apports de l'enquête historique pour l'élaboration du media
- Élaboration du media
- Premiers essais avec les enseignants

Figure 20 Hypothèses de travail et plan de la thèse

2. Questions de recherche

Dans ce dernier paragraphe, nous présentons les questions de recherche développées dans les trois prochaines parties.

2.1 Partie 2 : les enquêtes préalables

2.1.1 L'enquête institutionnelle

Dans cette enquête, nous étudions à partir des programmes et des ouvrages scolaires de collège, la façon dont la nomenclature et les formules chimiques sont introduites. Quelles raisons donne-t-on pour justifier les noms scientifiques et les formules chimiques que les élèves doivent connaître ? À quel(s) concept(s) le langage symbolique de la chimie est-il rattaché et comment ces concepts sont-ils introduits ? L'institution scolaire tient-elle compte de ses spécificités en le présentant comme un méta-niveau ? Propose-t-on aux enseignants une progression historique de ce langage ?

2.1.2 L'enquête didactique ou les difficultés des élèves

> *[…] l'élaboration d'une séquence d'enseignement utilisant l'histoire des sciences comme media d'apprentissage nécessite la prise en compte d'un certain nombre de contraintes parmi lesquelles le « profil conceptuel » des élèves (Chauvet 1996) (de Hosson, 2011, p.16).*

Nous menons une enquête du côté des élèves pour caractériser les types de difficultés et les raisonnements mis en œuvre dans l'interprétation et l'utilisation du langage symbolique de la chimie. Nous avons fait passer un questionnaire papier de la quatrième à la première année universitaire. Vygotski (2013) explique que le sens que les élèves donnent aux mots est différent du sens conventionnel donné par l'enseignant. Nous recherchons si les élèves interprètent les noms et les formules chimiques au moyen des concepts d'espèces chimiques, d'atomes et de molécules. Le langage symbolique est-il perçu comme représentatif à la fois du niveau macroscopique et du niveau microscopique ?

2.1.3 L'enquête sur les pratiques des enseignants

Nous pensons qu'il existe des contraintes à la fois institutionnelles, épistémologiques et didactiques qui mettent les enseignants en difficulté au moment de l'introduction du langage symbolique. Pour corroborer cette hypothèse, nous recherchons ce que proposent les enseignants en classe de quatrième au moment où ils introduisent les formules chimiques. Pour cela, nous faisons passer un questionnaire à une dizaine d'enseignants puis nous étudions l'activité en classe de deux enseignants parmi ceux interrogés au moment de l'introduction du langage symbolique.

Dans un premier temps et à l'aide du cadre de la double approche didactique et ergonomique, nous analysons :

- le scénario élaboré, soit l'ensemble des contenus chimiques, les stratégies d'enseignement, les tâches chimiques prescrites par l'enseignant pendant la séance et le déroulé avec les rôles entre enseignant et élèves ;
- l'organisation du travail — Qui fait quoi ? Quand ? Comment ? — en spécifiant les activités effectives des élèves ;
- l'étayage apporté par l'enseignant en particulier l'ensemble des aides, leur nature et leurs formes.

Nous cherchons ce qui est stabilisé pour un même type de tâches en inter-personnel (nous avons observé deux enseignants) au moment de l'introduction des formules chimiques.

Dans un deuxième temps, nous analysons le discours des deux enseignants, à la fois dans la forme et dans le contenu proposé.

Ces deux analyses devraient nous permettre de répondre aux questions suivantes :

- Au moment où ils introduisent les formules chimiques, quelles similitudes et différences observe-t-on dans les scénarios et les logiques d'action des enseignants dans l'utilisation des registres de la chimie et dans la présentation des concepts ?
- Quels liens font-ils entre le registre empirique et celui des modèles et le registre symbolique ?
- Les liens entre les différents registres conduisent-ils les enseignants à proposer le langage symbolique comme un méta-niveau ?
- Quelles raisons proposent-ils quant à l'élaboration des formules chimiques ?

Les réponses à ces questions devraient nous donner un premier aperçu des connaissances didactiques et épistémologiques des enseignants pour l'enseignement du langage symbolique de la chimie.

2.2 Partie 3 : l'enquête historique

Dans le cadre de la reconstruction didactique, nous cherchons à mener une analyse épistémologique et historique de l'élaboration du langage.

> *Il s'agit d'un travail d'exploration et de tri sous-tendu par un projet didactique spécifique : l'élaboration d'un matériau d'enseignement. Par voie de conséquence, une reconstruction historique n'est ni objective et encore moins exhaustive (de Hosson, 2011, p. 34)*

Ainsi les éléments sélectionnés à travers les écrits des chimistes du XIXe peuvent ne pas être les plus pertinents aux yeux d'un historien des sciences. Mais pour éviter tout contre-sens historique, nous complétons l'étude des textes originaux par celle des ouvrages de référence sur la période qui part de Lavoisier jusqu'au congrès de Karlsruhe (1860). Dans le premier temps de cette enquête, nous étudions comment le langage symbolique s'est élaboré. Quels ont été les liens entre cette élaboration et le développement des connaissances empiriques et des concepts ? Puis nous recherchons les controverses historiques qui ont traversé le début du XIXe siècle dans l'élaboration des formules chimiques. Elles doivent en effet venir éclairer nos choix (Crépin-Obert, 2011) dans l'élaboration du *media*.

2.3 Partie 4 : la reconstruction didactique

2.3.1 Apports de l'enquête historique pour l'élaboration du media

Il n'est pas question pour nous de rechercher dans l'histoire « *un isomorphisme illusoire ou un récapitulationnisme des savoirs* » à propos du langage symbolique entre les chimistes du XIXe siècle et des élèves d'aujourd'hui (Crépin-Obert, 2010b). Malgré cela, nous pensons que l'étude de la pensée préscientifique peut apporter un éclairage sur la compréhension de certaines idées des élèves. Quel(s) parallèle(s) peut-on faire entre certaines difficultés des élèves repérées au cours de l'enquête didactique et l'histoire des sciences ?

Pour élaborer les ressources, nous reprenons l'enquête historique au crible des espaces de contraintes et nécessités pour rechercher les raisons données par les chimistes quand ils ont proposé les premières formules. Quelles sont celles qui, dans l'élaboration historique des formules, mettent en dialectique registre symbolique, registre empirique et registre des modèles ?

2.3.2 Élaboration du *media*

La séquence d'enseignement doit répondre à une double exigence : « *la préservation de l'historicité en jeu et la possible appropriation d'un savoir scientifique (un concept, une loi…) par les élèves* » (de Hosson, 2011, p. 16). En cherchant à respecter cette double exigence, nous

avons sélectionné les controverses historiques qui nous semblent respecter les contraintes de l'enquête didactique et les conditions de la problématisation. Puis nous avons élaboré deux scénarios : un premier à partir de ressources historiques brutes et un second à partir d'un dialogue fictif de type galiléen (de Hosson, 2011).

2.3.3 Premières expérimentations

Les ressources sont-elles utilisables par les enseignants et peuvent-elles influencer leurs pratiques ? Nous avons demandé à l'un des enseignants que nous avons suivis pour l'enquête préalable de reconstruire sa séance d'introduction des formules chimiques à partir des textes historiques sélectionnés. Nous cherchons ce qui est stabilisé pour un même type de tâches en intra-personnel. Nous avons ensuite demandé à un enseignant expérimenté d'utiliser avec ses élèves les dialogues reconstruits. Nous voulons en effet déterminer s'ils sont accessibles et réutilisables par des enseignants. Quelles indications l'observation de ces deux enseignants apporte-t-elle quant à la possibilité d'utiliser ces ressources en classe ? Que serait-il nécessaire de développer en formation pour faire évoluer les pratiques des enseignants à propos de l'apprentissage du langage symbolique de la chimie ?

Partie 2 : Enquêtes préalables

CHAPITRE 1 : LE CONTEXTE INSTITUTIONNEL 84
1. LES PROGRAMMES 84
1.1 Programme de cinquième 84
1.2 Programme de quatrième 86
1.3 Programme de troisième 89
1.4 Bilan des programmes de collège 89
2. ANALYSE DES OUVRAGES SCOLAIRES DE CINQUIÈME ET QUATRIÈME 90
2.1 Méthodologie 90
2.2 La nomenclature 91
2.3 Les formules chimiques 95
2.4 Une approche historique de l'élaboration du langage symbolique 101
2.5 Bilan de l'étude des ouvrages scolaires 102
3. CONTEXTE INSTITUTIONNEL : CONCLUSION 103
CHAPITRE 2 : L'ENQUÊTE DIDACTIQUE : ÉLÈVE ET LANGAGE SYMBOLIQUE 103
1. OBJECTIF DU QUESTIONNAIRE 103
2. MÉTHODOLOGIE 104
2.1 Élaboration du questionnaire 104
2.2 Échantillonnage et collecte des données 113
2.3 Méthodes d'analyse 114
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION 119
3.1 Question 1 119
3.2 Questions 2 et 3 123
3.3 Questions 4 et 6 138
3.4 Question 5 143
3.5 Question 7 145
4. LES DIFFICULTÉS ÉLÈVES : CONCLUSION 146
CHAPITRE 3 : CE QUE DISENT ET FONT LES ENSEIGNANTS 148
1. UN QUESTIONNAIRE ENSEIGNANT 148
1.1 Présentation 149
1.2 Résultats 149
1.3 Discussion 151
2. OBSERVATION DE DEUX SÉANCES DE CLASSE « ORDINAIRES » 152
2.1 Ce que nous cherchons à analyser 153
2.2 Méthodologie 156
2.3 Analyse de l'activité « ordinaire » de deux enseignants au moment de l'introduction des formules chimiques 165
2.4 Analyse de l'utilisation des registres de la chimie, des niveaux et du langage symbolique 193
3. CE QUE DISENT ET FONT LES ENSEIGNANTS : CONCLUSION 221
CONCLUSION PARTIE 2 223

Chapitre 1 : Le contexte institutionnel

Nous commençons cette étude en étudiant comment les noms chimiques et les formules chimiques sont introduits en lien avec les concepts d'atomes, de molécules, d'espèces chimiques et de réaction chimique dans l'enseignement de la chimie en France. Pour cela, nous avons choisi d'étudier à la fois les programmes et les ouvrages scolaires des classes de cinquième et de quatrième[7] ou de cycle 4[8]. Nous avons regardé les liens proposés entre les registres empirique et des modèles, et le registre symbolique et essayé de repérer à quel niveau le langage symbolique est proposé : microscopique ou/et macroscopique ?

1. Les programmes

Les noms dans le langage scientifique et les formules chimiques sont introduits pour la première fois au collège dans les programmes français. Entre le début de ce travail de recherche et sa finalisation, les programmes de collège ont changé. Nous avons donc dans un premier temps étudié ceux de cinquième et quatrième applicables respectivement aux rentrées 2005 et 2006, et qui ont été repris dans le Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008 (Annexes 1). Les séances de classe observées dans cette partie portaient encore sur les anciens programmes que nous avons donc choisis de détailler. De plus, la lecture des nouveaux programmes nous amène à constater très peu de changements dans les thèmes que nous étudions. Nous ne reprendrons pas dans cette étude les programmes de la rentrée 2016. Dans la suite de la thèse, nous nommerons indifféremment programmes les anciens ou les nouveaux.

1.1 Programme de cinquième

Le titre de la partie chimie du programme de cinquième est : « *L'eau dans notre environnement. Mélanges et corps purs* » (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008). On peut lire en introduction de cette partie :

[7] Programmes rentrée 2005 et rentrée 2006.
[8] Programmes rentrée 2016.

> *La finalité de cette partie de programme est d'aborder les notions de mélanges et de corps purs. Elle s'appuie sur l'étude de l'eau, essentielle à la vie et omniprésente dans notre environnement. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 114)*

Alors que la notion essentielle de cette première année de chimie est celle de corps pur en opposition à mélange, aucune suggestion n'est faite aux enseignants pour faire travailler les élèves sur l'association corps pur / nom scientifique. Il est également surprenant de constater que cette notion de corps pur est introduite à partir du nom « eau ». Celui-ci a effectivement un statut ambigu. Il représente en langage scientifique l'espèce chimique mais il est également un mot du langage courant qui est dans ce cas plus souvent associé à un mélange plutôt qu'à un corps pur. Le chimiste sait bien que dans l'eau du robinet ou dans l'eau de source, ou dans l'eau minérale, bref dans l'eau que nous buvons, il n'y pas que de l'eau !

Toujours dans le programme de cinquième, on trouve les titres de paragraphe suivants :

> *Peut-on dissoudre n'importe quel solide dans l'eau (sucre, sel, sable...) ?*
>
> *Peut-on réaliser un mélange homogène dans l'eau avec n'importe quel liquide (alcool, huile, pétrole...) ? (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 117)*

Aucune suggestion n'est faite pour travailler la différence entre sel et chlorure de sodium, sucre et glucose ou alcool et éthanol. Aucune consigne n'est donnée dans le programme pour faire le lien entre espèces chimiques, ou corps pur, et les noms du langage scientifique.

On trouve également cités les noms tels que sulfate de cuivre anhydre, dioxyde de carbone ou dioxygène. L'élève doit en effet connaître les tests de reconnaissance suivants :

> *Réaliser le test de reconnaissance de l'eau par le sulfate de cuivre anhydre. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 114)*
>
> *Réaliser le test de reconnaissance du dioxyde de carbone par l'eau de chaux. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 115)*

Il doit également apprendre qu'il y a des gaz dissous dans l'eau. On peut lire alors dans les commentaires du programme la remarque suivante :

> *Le professeur précise que le dioxygène est également soluble dans l'eau. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 118)*

Nous avons indiqué dans la première partie que la syntaxe du langage symbolique apparaît avec la notion de corps simple de Lavoisier. Les notions de corps simple et de corps composé pourraient permettre de comprendre la construction des noms tels que sulfate de cuivre ou

dioxyde de carbone. Or ces deux notions, corps simple et corps composé, ne sont jamais évoquées dans les programmes de collège. Et alors que les concepts d'atome et de molécule ne sont introduits qu'en quatrième, quelle justification peut-on donner aux élèves du préfixe « di » dans le nom dioxygène alors que le langage courant ne parle que d'oxygène ? Au cours des deux années suivantes, d'autres noms scientifiques sont proposés aux élèves tels que diazote, carbone, méthane, butane, mais nous ne trouvons jamais la moindre remarque quant à l'utilisation de ces noms.

Rien n'est donc proposé dans ce programme de cinquième qui permettrait aux élèves de comprendre que les noms chimiques suivent des règles, en lien avec les corps simples ou composés, et qu'à une espèce chimique on associe un nom scientifique et réciproquement. On est très loin de la philosophie de Lavoisier qui prônait un langage élaboré pour transmettre les connaissances chimiques.

1.2 Programme de quatrième

Le titre du programme de quatrième en chimie est : « *De l'air qui nous entoure à la molécule* ». On peut lire dans l'introduction :

> *Cette rubrique a pour objet d'introduire dans un premier temps la molécule à partir des deux exemples de l'eau et de l'air ; elle permet notamment de réinvestir les notions vues en classe de cinquième concernant la distinction entre mélanges et corps purs […]. Dans un second temps, elle conduit, en s'appuyant sur les combustions, à l'étude des transformations chimiques et à leur interprétation atomique. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 124)*

La deuxième année débute par l'exemple de l'air qui est présenté comme un mélange contenant du dioxygène et du diazote. Encore une fois, aucun travail n'est suggéré à partir du vocabulaire pour comparer le terme « air » et les noms « dioxygène » et « diazote ».

Le modèle particulaire est proposé pour décrire les états de la matière. En quatrième, les particules constituant les espèces chimiques sont exclusivement des molécules. Celles-ci sont décrites comme des assemblages d'atomes pour « comprendre la transformation chimique.

> *La disparition de tout ou partie des réactifs et la formation de produits correspond à un réarrangement d'atomes au sein de nouvelles molécules. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 126)*

Les symboles et les formules sont alors introduits pour représenter les atomes et les molécules. L'utilisation des lettres n'est pas discutée et rien n'est indiqué dans le programme permettant de justifier la composition des formules à connaître. Aucune règle n'est spécifiée précisant le nombre fixe et déterminé d'atomes. Cela semble sans doute une évidence mais est-ce le cas pour un élève ? Est-ce si évident que O et O_2 sont différents ?

Le langage symbolique semble être réduit à la seule représentation du niveau microscopique mais nous trouvons le programme ambigu sur ce point. Dans la colonne « *Connaissances* » (Figure 21), les symboles et les formules sont seulement associés au niveau microscopique, respectivement aux atomes et aux molécules. Ce qui est écrit dans la colonne « *Capacités* » (Figure 21) n'est pas aussi explicite. On y indique que les élèves doivent écrire les équations de réaction pour différentes combustions. La combustion correspond à une transformation chimique avec disparition de réactifs et apparition de produits et la conservation de la masse fait partie des connaissances du programme (Figure 21). On lit également, colonne « connaissances » (Figure 21), que l'équation précise le sens de la transformation.

Connaissances	Capacités	Exemples d'activités
LES ATOMES POUR COMPRENDRE LA TRANSFORMATION CHIMIQUE		
Lors des combustions, la disparition de tout ou partie des réactifs et la formation de produits correspondent à un réarrangement d'atomes au sein de nouvelles molécules.	Réaliser des modèles moléculaires pour les réactifs et les produits des combustions du carbone, du butane et/ou du méthane (aspect qualitatif et aspect quantitatif).	Illustration à l'aide de modèles moléculaires compacts ou de simulations des réactifs et des produits des deux ou trois réactions chimiques suivantes : - carbone + dioxygène → dioxyde de carbone ; - butane + dioxygène → dioxyde de carbone + eau ; - méthane + dioxygène →dioxyde de carbone + eau.
Les atomes sont représentés par des symboles, les molécules par des formules (O_2, H_2O, CO_2, C_4H_{10} et/ou CH_4). L'équation de la réaction précise le sens de la transformation. Les atomes présents dans les produits (formés) sont de même nature et en même nombre que dans les réactifs.	Utiliser les langages scientifiques à l'écrit et à l'oral pour interpréter les formules chimiques Écrire les équations de réaction pour les combustions du carbone, du butane et/ou du méthane et expliquer leur signification (les atomes présents dans les produits formés sont de même nature et en même nombre que dans les réactifs).	Utilisation d'un logiciel de présentation de molécules. [B2i]
La masse totale est conservée au cours d'une transformation chimique.		Illustration de la conservation de la masse sur l'exemple de la réaction, en flacon étanche, du carbonate de calcium avec de l'eau acidifiée.

Figure 21 Extrait du programme de quatrième (rentrée 2007) (p 126).

Dans la colonne « Exemples d'activités » (Figure 21) trois réactions chimiques sont écrites à partir des noms associés aux espèces chimiques depuis le programme de cinquième[9]. Elle semble donc correspondre à un niveau d'écriture macroscopique. Mais le programme

[9] Nous pensons que l'écriture d'une équation à partir des noms pose problème mais nous reprendrons ce point dans l'étude des ouvrages scolaires.

demande de les illustrer à partir des modèles moléculaires et donc à un niveau microscopique. Les enseignants vont-ils prendre les précautions nécessaires pour indiquer ces changements de niveau alors que le programme reste implicite sur ce point ?

Comme nous l'avons signalé dans la partie 1, deux interprétations sont possibles pour le concept d'atomes : soit un concept « *formel* » permettant d'interpréter et prédire soit un concept « *catégoriel* ». Pour Morge (2007), les atomes changent de statut entre les deux générations de programmes : avant et après 2007. Alors que la valeur hypothétique était mise en avant dans les programmes antérieurs à 2007, les programmes actuels semblent plutôt affirmer l'existence de ces particules mais avec semble-t-il évolution du concept formel au concept catégoriel. L'atome est d'abord introduit comme une hypothèse permettant d'interpréter les réactions chimiques mais les commentaires des programmes de 2007 semblent indiquer que l'on bascule ensuite vers l'objet microscopique et donc le concept catégoriel.

> *En ce qui concerne la description moléculaire de la matière, le professeur se rappelle que les concepts de molécule et d'atome, initialement imaginés comme des modèles susceptibles de rendre compte de propriétés macroscopiques de la matière ont acquis progressivement de la fin du XIXe siècle à nos jours le statut de véritables objets microscopiques. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 126)*

Et un peu plus loin, après la recommandation d'utiliser les modèles moléculaires compacts, on peut également lire :

> *Les atomes sont représentés comme des sphères. Certains sont différenciés symboliquement par une couleur de représentation. Ils sont distingués par ailleurs par un symbole : aucune connaissance de leur structure n'est apportée dans cette classe. (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 126)*

Les programmes ne semblent pas avoir tranché clairement entre les deux types de concepts. Enfin, nous avons indiqué dans la partie 1 l'importance d'associer au concept des attributs pour le rendre opératoire. Le seul attribut qui nous semble associé à l'atome en quatrième est sa conservation dans les réactions chimiques, celui-ci étant plutôt caractéristique d'un concept formel. Ce qui semble avant tout caractériser les atomes dans ces programmes est son symbole, et donc son étiquette.

1.3 Programme de troisième

Alors que l'introduction des formules est faite en quatrième et que les premières équations de réactions sont représentées en utilisant les formules chimiques, ce travail n'est pas poursuivi en troisième. Les enseignants doivent traiter la réaction entre le fer et l'acide chlorhydrique mais le choix du programme est de l'écrire exclusivement en toutes lettres. L'extrait ci-dessous du programme à propos de cette réaction montre toute la difficulté à rester rigoureux quant au niveau représenté par le langage symbolique : Fe^{2+} symbolise une « *espèce chimique* » avec la « *transformation* » d'un atome en ion.

> *La mise en évidence parmi les produits de la réaction d'une nouvelle espèce chimique Fe^{2+}, l'ion fer (II), s'interprète par la transformation de l'atome de fer en ion fer (II). (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 137)*

Les enseignants doivent terminer le programme de troisième en illustrant le fait qu'un « *des objectifs premiers de la chimie est de produire de nouvelles espèces chimiques à partir d'autres »* (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 137). Les notions de corps pur, de transformation chimique, de réactifs et de produits sont ainsi réinvesties. Le programme propose la synthèse de l'acétate d'isoamyle ou du nylon® mais il n'est toujours pas proposé de travailler la différence entre nom scientifique et nom courant.

1.4 Bilan des programmes de collège

Les expressions suivantes sont absentes des programmes : langage symbolique, langage chimique, nom scientifique, nom chimique, nom usuel ou nom courant, corps simple, corps composé, formule de l'espèce chimique, etc.

- À propos de la nomenclature, rien n'est indiqué dans les programmes. Nous pensons pourtant que l'on pourrait réaliser une carte d'identité un peu systématique pour chaque corps pur (terme utilisé en première année du programme) ou espèce chimique (terme utilisé par la suite à la place de corps pur) présenté aux élèves avec un nom en nomenclature officielle dès la cinquième. Rien n'est demandé à propos de la notion de corps pur simple et de corps pur composé. Ce travail autour du nom pourrait permettre de commencer à présenter ces notions. Les élèves pourraient continuer à compléter ces cartes d'identité en quatrième et troisième.

- L'introduction de la formule est proposée en lien avec le concept de molécules et d'atomes, donc explicitement au niveau microscopique mais implicitement dans les réactions chimiques au niveau macroscopique. Le double aspect microscopique et macroscopique du langage n'apparaît explicitement à aucun niveau des programmes, ni même dans ceux de lycée. L'élève doit apprendre à communiquer à l'aide du langage scientifique. Il doit être capable d'utiliser une représentation adaptée et de coder ou décoder les formules chimiques, expression que l'on pouvait retrouver dans les programmes antérieurs à ceux de 2008. Mais le langage du chimiste semble être présenté comme une évidence. Rien n'est notamment proposé pour l'élaboration des formules chimiques, à la fois dans le choix des lettres et dans la composition de la formule.

- Le concept d'atomes, d'abord présenté comme une hypothèse, semble ensuite plutôt correspondre à un concept catégoriel. Il est uniquement caractérisé par son symbole au moment de son introduction en quatrième.

- Les modèles sont présentés comme des nécessités (Brehelin & Guedj, 2007). Les programmes partent des phénomènes macroscopiques et font appel aux aspects microscopiques dans un deuxième temps seulement quand cela devient nécessaire pour leur compréhension (Brehelin & Guedj, 2007). L'objectif est très certainement de vouloir partir du concret pour donner du sens. Mais cela peut-il amener les élèves vers un questionnement ?

2. Analyse des ouvrages scolaires de cinquième et quatrième

Nous avons étudié les ouvrages scolaires sur trois générations de programmes, ces derniers ayant peu évolué à chaque changement : quatre ouvrages correspondant au cycle 4 pour les nouveaux programmes, deux ouvrages de quatrième et de cinquième des programmes de 2008 (Annexe 1) et à nouveau deux ouvrages de cinquième et de quatrième pour les programmes de la génération antérieure à 2008.

2.1 Méthodologie

Pour rappel, nous cherchons les raisons données dans les ouvrages scolaires pour justifier les noms scientifiques et les formules chimiques utilisés puis nous déterminons à quel niveau, macroscopique et/ou microscopique, est associé le langage symbolique et comment sont introduits les concepts associés à ce langage : atomes, molécules et réaction chimique. Enfin,

l'existence de l'évolution historique du langage est-elle mentionnée ? Pour cette étude, nous procédons en trois étapes : la nomenclature, les formules et les références historiques. Pour chacune de ces étapes, nous indiquons ci-dessous les critères d'analyse qui permettront de répondre aux questions de recherche.

- Nous regardons ce qui est fait en lien avec la nomenclature. Nous recherchons tout ce qui pourrait indiquer qu'une nomenclature a été élaborée pour désigner les corps purs ou les espèces chimiques. Les élèves sont-ils sensibilisés à la différence entre un nom scientifique et un nom du langage courant ? Y a-t-il un lien dans les ouvrages scolaires entre un nom issu du langage scientifique et le concept de corps pur ? Nous regardons plus particulièrement les utilisations du nom « eau » celui-ci servant d'exemple central pour l'introduction de la chimie en cinquième. Des précautions sont-elles prises quant au statut ambigu de ce nom ? Cette étape concerne majoritairement les ouvrages de cinquième.

- Nous étudions l'introduction des formules chimiques. Les formules présentées aux élèves en quatrième sont-elles justifiées ? Quel travail est demandé aux élèves par rapport aux formules chimiques ? Quel niveau de lecture, macroscopique ou microscopique, peut-on faire des formules ou des équations chimiques ? Nous présentons pour cette dernière un point qui nous pose problème : les équations à partir des noms scientifiques pour illustrer les transformations chimiques. Nous étudions pour cette étape les ouvrages de quatrième.

- Nous regardons si les ouvrages scolaires proposent une présentation historique de l'élaboration des noms et des formules.

Ne pouvant quantifier ce qui n'apparaît pas dans les ouvrages scolaires, notre analyse reste qualitative.

2.2 La nomenclature

2.2.1 Nom scientifique ou nom courant

On trouve régulièrement des expressions du type : l'air est un mélange de gaz constitué de 21% de dioxygène et de 78% de diazote. Le mot « air » est bien associé à mélange mais on laisse l'élève comprendre que les mots diazote et dioxygène correspondent à des corps purs. Quand les premières équations de réaction sont proposées dans les ouvrages et que celles-ci sont écrites à partir des noms « chimiques », il n'est jamais explicitement indiqué que les

réactifs et les produits correspondent à des corps purs. Dans de nombreux exercices, les noms d'usage courant ou scientifique sont mis sur le même plan (Figure 22).

ex n°1 Recopie le tableau en mettant une croix si la substance est soluble dans l'eau :

Substance	Sel	Sucre	Verre	Bois	Sulfate de cuivre	Sable	Fer
Soluble dans l'eau							

Figure 22 Nom d'usage courant ou scientifique au même plan (Dulaurans et al., 2017, p. 117)

On pourrait parfois penser qu'un nom scientifique ne correspond pas toujours à un corps pur. Il est précisé dans l'exercice (Figure 23) la pureté de l'acide acétique avec, juste à côté, l'alcool isoamylique pour lequel l'adjectif pur n'est pas ajouté. Et que peut signifier en quatrième la précision « concentré » pour l'aide sulfurique ?

Introduire 5 mL d'acide acétique pur, 5 mL d'alcool isoamylique et quelques gouttes d'acide sulfurique concentré.

Figure 23 Un nom scientifique pas nécessairement associé à une substance pure (Durandeau, Bramand, Comte, Cuisset & Collectif, 2007, p. 60)

Nous n'avons trouvé dans l'ensemble des ouvrages que deux remarques indiquant explicitement aux élèves qu'il existe des noms scientifiques et des noms d'usage courant. Dans l'un de ces exemples (Figure 24), aucune exploitation n'est proposée en lien avec cette indication. La deuxième remarque (non rapportée ici) correspond aux cartes d'identité proposées par Solomonidou et Stavridou (1994).

9 Noms usuels et noms scientifiques.

Dans la vie des tous les jours, nous n'utilisons pas toujours les noms scientifiques des composés chimiques !

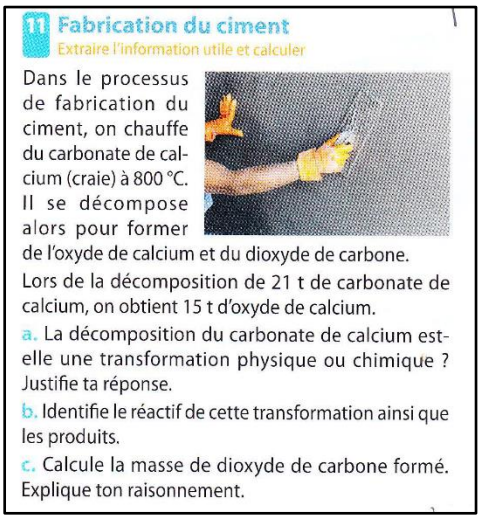
• Vous viendrait-il à l'idée, par exemple, de demander à votre voisin de table de vous passer le « chlorure de sodium » ? Ce nom savant désigne en effet un assemblage d'ions chlorure et d'ions sodium qui, au contact de l'eau, se dispersent en solution. Ce composé est communément appelé... sel !

Figure 24 Exemple de différentiation nom usuel et nom scientifique (Collectif & Meneret, 2017, p. 105)

2.2.2 Nom scientifique et espèce chimique

Les ouvrages de cinquième ne proposent aucun travail reliant la notion de corps pur et le nom scientifique. Pourtant de nombreux exercices utilisent implicitement le fait qu'un nom scientifique correspond nécessairement à une espèce chimique (Figure 25). Ou au contraire, un nom courant tel que le vinaigre (réalité perçue), en tant que réactif dans une

transformation chimique, est utilisé au même titre que le carbonate de calcium (réalité idéalisée) et pourrait être considéré comme étant celui d'une espèce chimique (Figure 26).


11 Fabrication du ciment
Extraire l'information utile et calculer

Dans le processus de fabrication du ciment, on chauffe du carbonate de calcium (craie) à 800 °C. Il se décompose alors pour former de l'oxyde de calcium et du dioxyde de carbone.

Lors de la décomposition de 21 t de carbonate de calcium, on obtient 15 t d'oxyde de calcium.

a. La décomposition du carbonate de calcium est-elle une transformation physique ou chimique ? Justifie ta réponse.

b. Identifie le réactif de cette transformation ainsi que les produits.

c. Calcule la masse de dioxyde de carbone formé. Explique ton raisonnement.

Figure 25 Nom scientifique et espèce chimique (Daujean & Massa, 2017, p. 155)

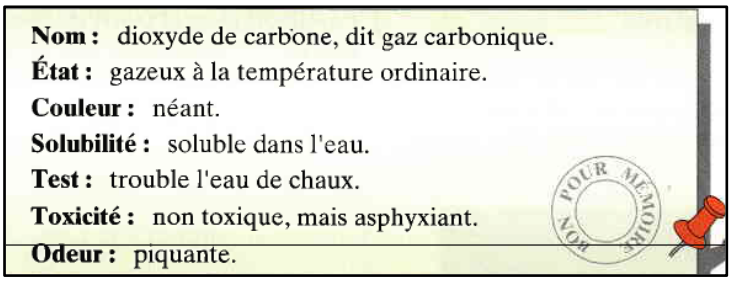
16 Je pratique la démarche scientifique
Concevoir un protocole expérimental

Après avoir mis en contact du carbonate de calcium (craie) et du vinaigre, un gaz se forme et gonfle le ballon (photo ci-contre). Eliot émet l'hypothèse que ce gaz est du dioxyde de carbone.

- Propose un protocole expérimental permettant de vérifier l'hypothèse d'Eliot. Illustre ce protocole avec un ou des schémas légendés.

Figure 26 Nom courant et espèce chimique (Daujean & Massa, 2017, p. 156)

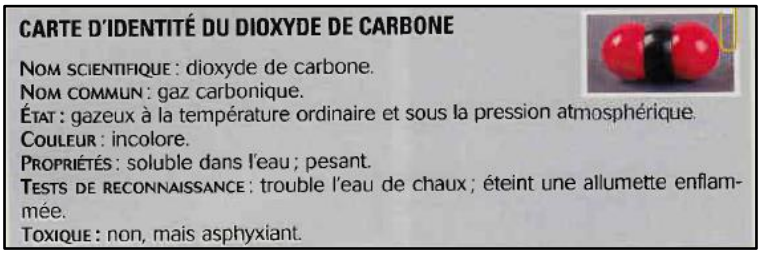
Nous n'avons trouvé que dans les ouvrages scolaires les plus anciens, deux éditions proposant une carte d'identité pour deux espèces chimiques : le dioxyde de carbone (Figure 27 et Figure 28) et l'eau (Figure 29).


Nom : dioxyde de carbone, dit gaz carbonique.
État : gazeux à la température ordinaire.
Couleur : néant.
Solubilité : soluble dans l'eau.
Test : trouble l'eau de chaux.
Toxicité : non toxique, mais asphyxiant.
Odeur : piquante.

NON POUR MÉMOIRE

Figure 27 Exemple de carte d'identité : le dioxyde de carbone (Collectif & Durandeau, 1998, p. 47)

Cela correspond aux seuls cas où des noms sont explicitement associés à une espèce chimique identifiée comme telle expérimentalement. Mais seul un des deux ouvrages (Figure 28) différencie le nom scientifique du nom commun.


CARTE D'IDENTITÉ DU DIOXYDE DE CARBONE

NOM SCIENTIFIQUE : dioxyde de carbone.
NOM COMMUN : gaz carbonique.
ÉTAT : gazeux à la température ordinaire et sous la pression atmosphérique.
COULEUR : incolore.
PROPRIÉTÉS : soluble dans l'eau ; pesant.
TESTS DE RECONNAISSANCE : trouble l'eau de chaux ; éteint une allumette enflammée.
TOXIQUE : non, mais asphyxiant.

Figure 28 Exemple de carte d'identité : le dioxyde de carbone (Collectif, 1999, p.36-)

2.2.3 Le nom « eau »

Le programme de cinquième ou de début de cycle 4 utilise comme exemple central l'espèce chimique eau. Mais le nom « eau » pose un problème. Il est à la fois le terme scientifique et celui d'usage courant. Dans un même ouvrage (Bazin, 2006), nous trouvons la liste des termes suivants comportant le mot « eau » : eau liquide, vapeur d'eau, eau sous forme de glace, eau du robinet, eau salée, eau sucrée, eau de pluie, eau douce, eau usée, eau minérale, eau minérale naturelle, eau pétillante, eau pure, eau distillée, eau de chaux, eau dure, eau oxygénée. On note également les termes comme glaçon ou glace pour désigner l'eau. On parle des propriétés de « certaines eaux ». Les auteurs, pour pouvoir signifier l'espèce chimique, sont en fait obligés d'accoler l'adjectif « pur » au nom « eau ».

> *[…] on peut obtenir un corps pur par distillation : par exemple de l'eau pure en distillant une eau minérale » (Bazin, 2006, p. 97)*

On trouve dans un autre ouvrage (Durandeau, Bramand, Comte, Farloubeix & Collectif, 2006, p. 5) une activité à partir d'une étiquette d'eau minérale « Volvic » sur laquelle on peut lire : « *très pure et faiblement minéralisée* ». Cette contradiction n'est pas interrogée. Quels que soient les ouvrages, le nom « eau » n'est jamais explicité comme étant à la fois le nom scientifique associé à l'espèce chimique et le nom usuel parfois associé à des mélanges, comme pour les « eaux » minérales. Au mieux on trouve que « *dans le langage courant, le mot eau désigne l'eau liquide* » (Donadei *et al.*, 2010). De plus, là où dans l'ouvrage édité par Belin un nom scientifique était indiqué dans la carte d'identité du dioxyde de carbone (Figure 28), cette spécificité disparaît dans celle de l'eau (Figure 29). On trouve même différents noms pour l'espèce chimique en fonction de son état physique, le terme « eau » étant alors réservé à l'état liquide (Figure 29). Ce problème se retrouve encore dans les ouvrages récents (Annexe 2.1).

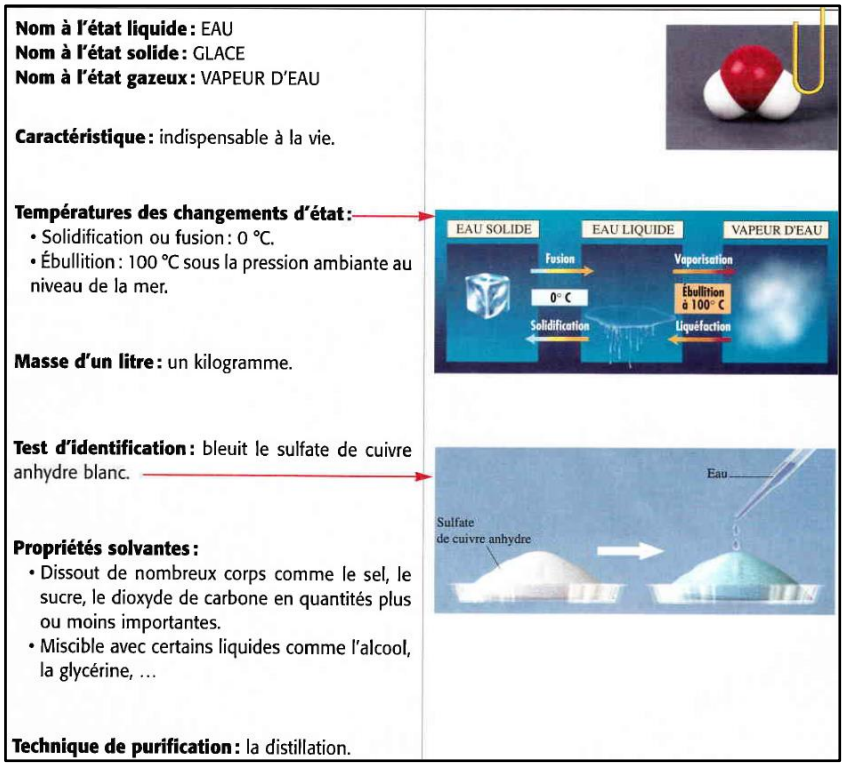
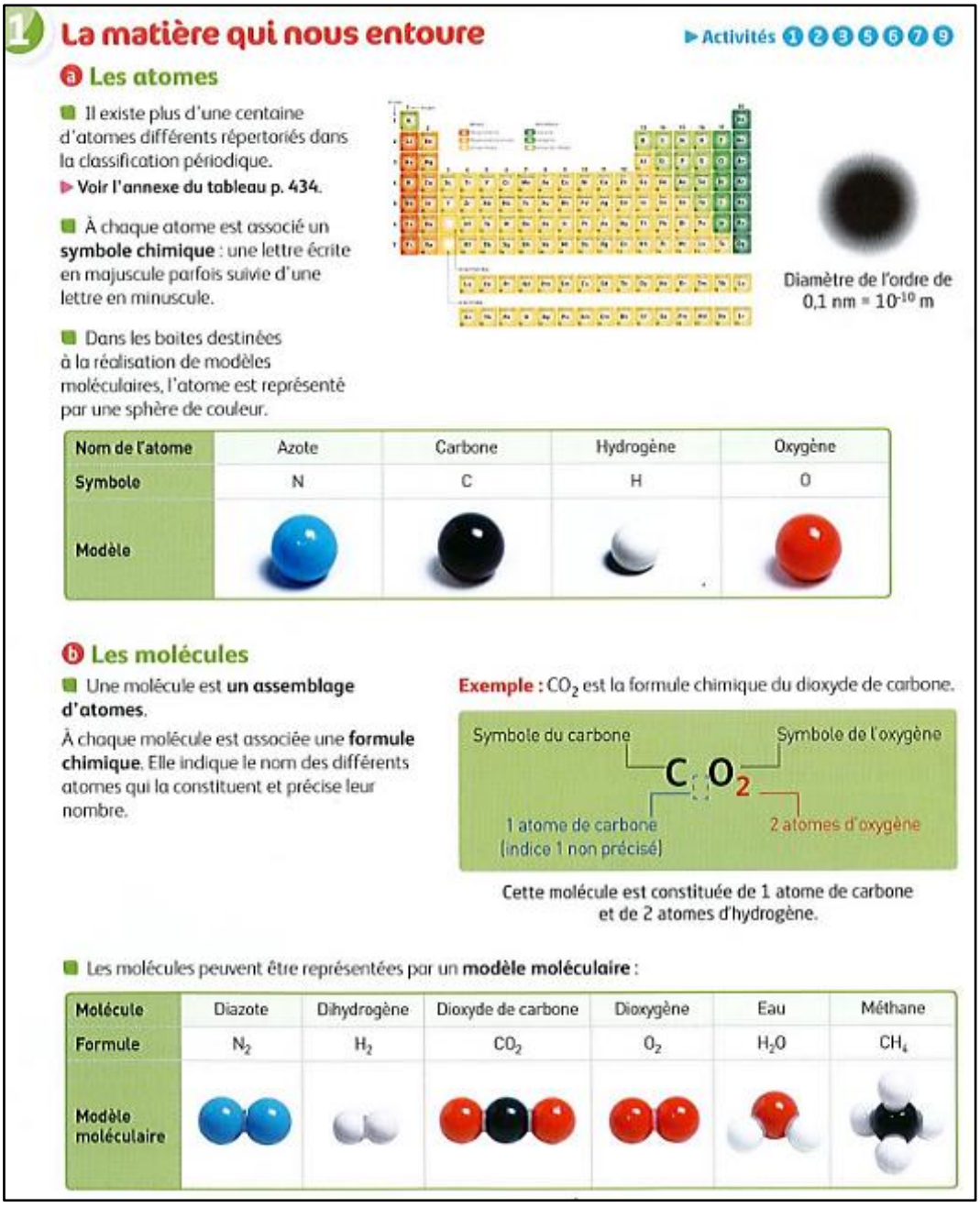


Figure 29 Exemple de carte d'identité de l'eau : l'eau (Collectif, 1999, p. 101)

2.3 Les formules chimiques

2.3.1 Introduction des formules

Les symboles et les formules sont introduits dans tous les ouvrages pour représenter respectivement les atomes et les molécules (Figure 30 ou Annexe 2.2). À ce niveau l'atome est exclusivement présenté comme un concept catégoriel. De plus aucun attribut ne lui est associé. Le lien avec l'interprétation d'une réaction chimique en tant que réarrangement d'atomes, ainsi que le préconise le programme, n'apparaît qu'un ou deux chapitres plus loin dans les ouvrages. S'il existe des différences entre les atomes, elles proviennent du symbole qui les représente ou des sphères colorées des modèles moléculaires. Les sphères sont bien de taille différente mais ce point n'est jamais soulevé.



1 La matière qui nous entoure

▶ Activités 1 2 3 5 6 7 9

a Les atomes

- Il existe plus d'une centaine d'atomes différents répertoriés dans la classification périodique.
  ▶ Voir l'annexe du tableau p. 434.
- À chaque atome est associé un **symbole chimique** : une lettre écrite en majuscule parfois suivie d'une lettre en minuscule.
- Dans les boites destinées à la réalisation de modèles moléculaires, l'atome est représenté par une sphère de couleur.

Diamètre de l'ordre de 0,1 nm = 10^{-10} m

Nom de l'atome	Azote	Carbone	Hydrogène	Oxygène
Symbole	N	C	H	O
Modèle				

b Les molécules

- Une molécule est **un assemblage d'atomes**.

À chaque molécule est associée une **formule chimique**. Elle indique le nom des différents atomes qui la constituent et précise leur nombre.

Exemple : CO_2 est la formule chimique du dioxyde de carbone.

Symbole du carbone — Symbole de l'oxygène

$C\,O_2$

1 atome de carbone (indice 1 non précisé) — 2 atomes d'oxygène

Cette molécule est constituée de 1 atome de carbone et de 2 atomes d'hydrogène.

- Les molécules peuvent être représentées par un **modèle moléculaire** :

Molécule	Diazote	Dihydrogène	Dioxyde de carbone	Dioxygène	Eau	Méthane
Formule	N_2	H_2	CO_2	O_2	H_2O	CH_4
Modèle moléculaire						

Figure 30 Introduction des symboles et des formules (Collectif & Meneret, 2017, p. 106)

La molécule est de son côté un assemblage d'atomes. À chaque molécule, un nom apparaît mais il n'est précisé nulle part si c'est celui de la molécule ou de l'espèce chimique qui lui est associée. Les liens avec les espèces chimiques n'apparaissent plus dans ces bilans et sont donc totalement implicites. Rien ne justifie les formules à ce niveau, notamment le nombre d'atomes. Et par la suite nous n'avons trouvé aucune activité proposant une justification. Pourquoi la molécule d'eau est-elle H_2O et non HO, comme l'avait d'ailleurs proposé Dalton ? Cela semble une évidence qui ne repose sur aucun modèle justificatif ni sur aucune raison empirique. De plus la valence des atomes et leur position les uns par rapport aux autres dans

la molécule ne sont jamais évoquées alors que les élèves peuvent les visualiser dans les modèles moléculaires tous représentés dans les ouvrages.

La combustion du carbone est l'exemple le plus utilisé dans les ouvrages pour illustrer les combustions. Pourtant la formule du carbone, ainsi que celles de tous les corps simples monoatomiques, telle que C, S, Fe, etc., est une réelle difficulté qui n'est jamais traitée dans l'enseignement secondaire français. Quelle est la particule élémentaire des espèces chimiques carbone, soufre ou fer ? Sans explication, un élève ne peut répondre que l'atome. Les ouvrages scolaires ne peuvent pas parler des structures cristallines, ce point n'étant pas présenté dans les programmes. Cela entraîne parfois des contre-sens. Nous trouvons dans un exercice d'auto-évaluation à propos du carbone :

> *Une molécule de carbone réagit avec une molécule de dioxygène pour former une molécule de dioxyde de carbone. (Donadei et al., 2011, p. 72)*

Dans cet extrait C représente une molécule[10]. Trois pages plus loin dans un autre exercice, il est demandé de retrouver :

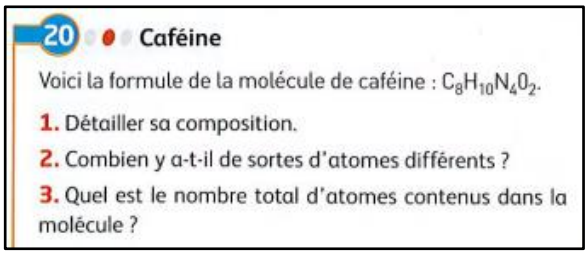
> *[…] les atomes et les molécules dans la liste ci-dessous : C, CH_4 ; H_2O ; O ; O_2 ; CO_2 » (Donadei et al., 2011, p. 75)*

En restant cohérent avec l'énoncé de l'exercice d'auto-évaluation de la page 72, l'élève doit répondre molécule pour C mais la réponse dans le livre du professeur classe le symbole C parmi les atomes.

2.3.2 Ce qu'un élève doit savoir faire

Les seules règles énoncées pour les formules brutes sont la numérotation en indice pour le nombre d'atomes et l'utilisation d'une lettre majuscule ou de deux lettres (majuscule et minuscule) pour nommer les atomes. La plupart des exercices proposés portant sur les formules chimiques demandent aux élèves de les écrire à partir de la composition atomique de la molécule ou l'inverse (Figure 31). Ce travail peut être aussi demandé à partir d'une réaction chimique ou à partir des modèles moléculaires (Figure 32).

[10] Il aurait d'ailleurs été plus correct de parler d'espèces chimiques que de molécules puisqu'il s'agit d'une réaction, modèle macroscopique.


20 Caféine

Voici la formule de la molécule de caféine : $C_8H_{10}N_4O_2$.

1. Détailler sa composition.
2. Combien y a-t-il de sortes d'atomes différents ?
3. Quel est le nombre total d'atomes contenus dans la molécule ?

Figure 31 Exemple d'exercices à partir des formules chimiques (Collectif & Meneret, 2017, p. 113)

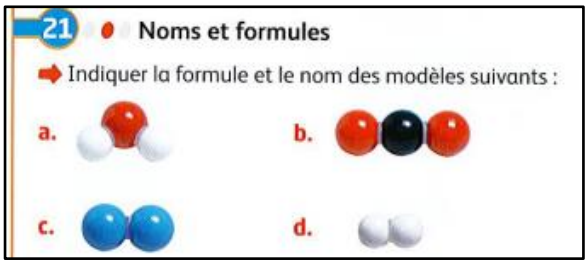


Figure 32 Exemple d'exercices à partir des modèles moléculaires (Collectif & Meneret, 2017, p. 113)

Ne sont jamais explicités dans les ouvrages l'ordre et le nombre invariable des atomes dans la formule. Nous n'avons trouvé ni exercice de décodage faisant varier l'ordre des atomes dans la formule, ni exercice amenant les élèves à s'interroger sur la combinaison fixe des atomes dans la formule, notamment à partir de comparaisons de formules avec des nombres d'atomes proportionnels comme par exemple C_2H_4, C_4H_8 et C_6H_{12}.

2.3.3 Une formule microscopique ou macroscopique ?

Les formules sont introduites exclusivement comme étant celles des molécules et donc comme une représentation *a priori* exclusivement du niveau microscopique (Figure 30 et Annexe 2.2). Pourtant très rapidement dans les activités et dans les exercices proposés, aucune précaution langagière n'est prise pour spécifier le niveau de référence et on trouve des utilisations implicites des formules comme représentation de l'espèce chimique. Les exemples ne manquent pas pour illustrer cette imprécision de langage (Annexe 2.3). Ci-dessous la formule C_4H_{10} semble associée à l'espèce chimique butane gaz dans l'exercice 38 (Donadei *et al*., 2017, p. 76).

Le butane, de formule C_4H_{10}, est un gaz …. (Donadei et al., 2017, p. 76)

La formule est associée aux masses des bilans de matière dans les transformations chimiques comme on peut le constater dans le livre du professeur ci-dessous (Donadei *et al*., 2011, p. 18). Il s'agit bien de la masse des espèces chimiques. La formule ne peut alors plus représenter la molécule.

D'après la conservation de la masse, on a : $mCO_2 = mO_2 + mdiamant$

Nous n'avons trouvé aucun exemple d'exercices où les auteurs essaient de rendre explicite le langage symbolique en tant que méta-niveau. Dans une activité « *Cuisine et chimie* », on trouve la légende suivante sous la photo d'une casserole contenant un fond de caramel :

La transformation du saccharose en caramel. Les molécules qui se forment donnent au caramel son goût et sa couleur. (Donadei et al., 2011, p. 78)

On trouve dans la même phrase le langage courant (caramel) et le langage scientifique (saccharose) puis l'utilisation du niveau microscopique (le terme molécule) pour illustrer un phénomène macroscopique (le changement de couleur et de goût) et tout cela sans aucune précaution langagière. Toujours dans la même activité, on trouve un peu plus loin la question suivante :

Quel est le nom de la molécule qui constitue le sucre de table ? (Donadei et al., 2011, p. 78)

Dans la partie cours du livre, le nom a toujours été associé à l'espèce chimique composée de molécules identiques auxquelles on associe des formules. Il se produit alors un glissement implicite d'un nom qui était réservé *a priori* au niveau macroscopique et qui passe au niveau microscopique.

2.3.4 Les équations chimiques

Pratiquement tous les ouvrages proposent une représentation des transformations chimiques à partir d'équations avec les noms (Figure 33 ou Annexe 2.4). Ce format nous semble beaucoup trop proche de celui de l'équation de réaction écrite à partir des formules chimiques.

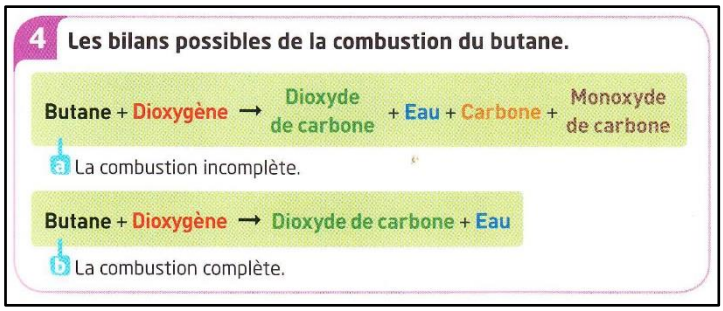
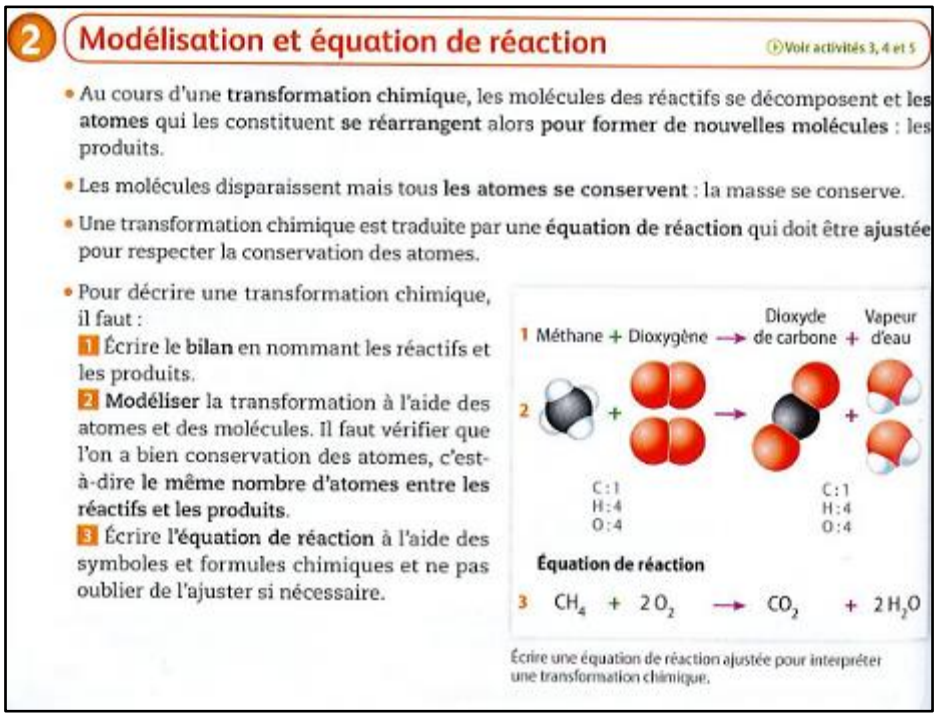


Figure 33 Exemple d'équation avec les noms (Collectif & Meneret, 2017, p. 71)

Nous pensons que cette écriture pose des problèmes. En effet, le nom représente *a priori* l'espèce chimique. L'équation de réaction sans nombre stœchiométrique indique des espèces chimiques qui peuvent réagir dans des quantités identiques. Alors que noms et formules ont la même signification, on propose aux élèves deux types d'équations avec des proportions différentes. Soit on change complètement l'écriture avec les noms en ne représentant pas d'équation ; soit il faut indiquer les nombres stœchiométriques si on souhaite conserver le format de l'équation. Cela permettrait d'ailleurs de montrer aux élèves l'intérêt des formules

chimiques par rapport aux noms. Il est en effet impossible d'ajuster les nombres stœchiométriques à partir de ces derniers.

Enfin, la présentation proposée dans tous les ouvrages des équations à partir des formules chimiques insiste sur l'interprétation microscopique et occulte en général le caractère macroscopique de la réaction chimique qui n'est ni défini ni mentionné (Figure 34).



2 **Modélisation et équation de réaction** (Voir activités 3, 4 et 5)

- Au cours d'une **transformation chimique**, les molécules des réactifs se décomposent et **les atomes** qui les constituent **se réarrangent** alors **pour former de nouvelles molécules** : les produits.
- Les molécules disparaissent mais tous **les atomes se conservent** : la masse se conserve.
- Une transformation chimique est traduite par une **équation de réaction** qui doit être **ajustée** pour respecter la conservation des atomes.
- Pour décrire une transformation chimique, il faut :
  1 Écrire le **bilan** en nommant les réactifs et les produits.
  2 **Modéliser** la transformation à l'aide des atomes et des molécules. Il faut vérifier que l'on a bien conservation des atomes, c'est-à-dire **le même nombre d'atomes entre les réactifs et les produits**.
  3 Écrire **l'équation de réaction** à l'aide des symboles et formules chimiques et ne pas oublier de l'ajuster si nécessaire.

1 Méthane + Dioxygène → Dioxyde de carbone + Vapeur d'eau

2 C : 1, H : 4, O : 4 → C : 1, H : 4, O : 4

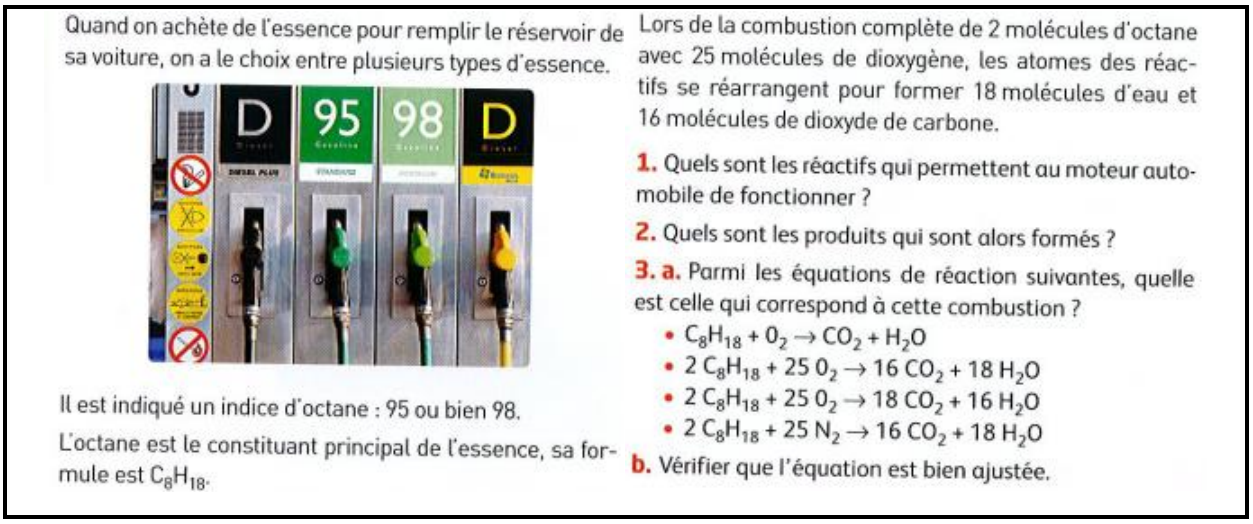
Équation de réaction

3 $CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$

Écrire une équation de réaction ajustée pour interpréter une transformation chimique.

Figure 34 Introduction des équations de réaction (Daujean & Massa, 2017, p. 164)

On observe pourtant un glissement des équations vers le niveau macroscopique dans les exercices (Figure 35 et Annexe 2.4).



Quand on achète de l'essence pour remplir le réservoir de sa voiture, on a le choix entre plusieurs types d'essence.

Il est indiqué un indice d'octane : 95 ou bien 98.

L'octane est le constituant principal de l'essence, sa formule est C_8H_{18}.

Lors de la combustion complète de 2 molécules d'octane avec 25 molécules de dioxygène, les atomes des réactifs se réarrangent pour former 18 molécules d'eau et 16 molécules de dioxyde de carbone.

1. Quels sont les réactifs qui permettent au moteur automobile de fonctionner ?

2. Quels sont les produits qui sont alors formés ?

3. a. Parmi les équations de réaction suivantes, quelle est celle qui correspond à cette combustion ?

- $C_8H_{18} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- $2\,C_8H_{18} + 25\,O_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 18\,H_2O$
- $2\,C_8H_{18} + 25\,O_2 \rightarrow 18\,CO_2 + 16\,H_2O$
- $2\,C_8H_{18} + 25\,N_2 \rightarrow 16\,CO_2 + 18\,H_2O$

b. Vérifier que l'équation est bien ajustée.

Figure 35 Exemple d'équations dans les exercices du niveau macroscopique (Collectif & Meneret, 2017, p. 115)

Parfois les deux écritures, avec les noms et avec les formules, sont réunies dans un même bilan (Figure 36).

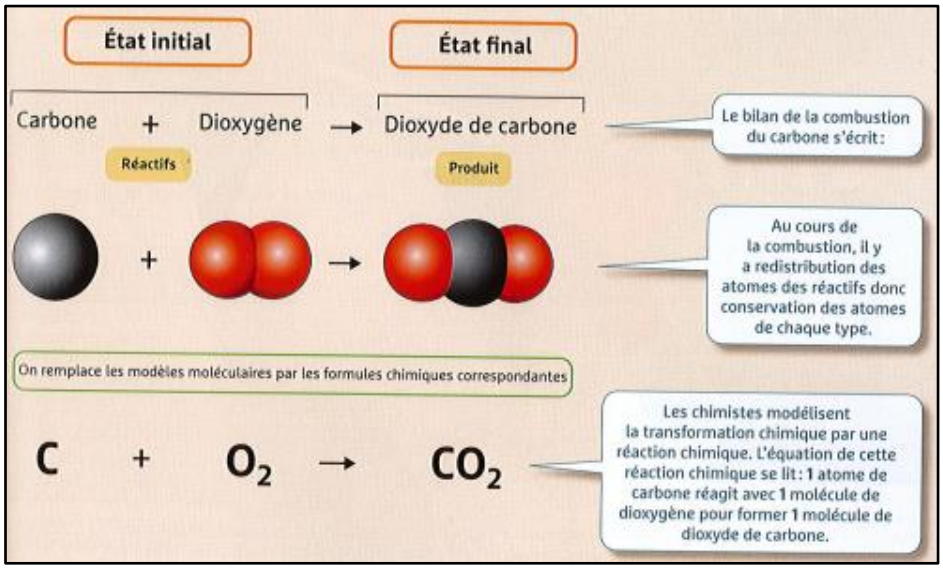


Figure 36 Équations avec les noms et avec les formules dans un même bilan (Donadei, 2017, p. 101)

Le niveau associé à chaque écriture est à notre avis implicite : la première avec les noms est du niveau macroscopique alors que la seconde, avec les formules, se lit au niveau microscopique. Et la réaction chimique, introduite dans le dernier encadré pour modéliser la transformation chimique (Figure 36), n'est pas définie.

2.4 Une approche historique de l'élaboration du langage symbolique

Un seul parmi l'ensemble des ouvrages étudiés propose une activité portant sur l'évolution du langage. Celle-ci présente l'évolution des noms dioxygène avant Lavoisier et au moment de Lavoisier (Annexe 2.5). L'activité aurait pu être mise en lien avec les travaux de Lavoisier et notamment l'apparition de la notion de corps pur. Mais celle-ci reste très superficielle et ne propose pas d'expliquer pourquoi le nom « oxygène » est devenu « dioxygène ». Le corrigé dans le livre du professeur ne fait aucune allusion à ce problème (livre du professeur, 2008, p 15). Donc, en dehors de quelques chronologies proposées notamment autour de l'atome (Donadei *et al*., 2011 ; Durandeau *et al*., 2006), nous ne trouvons aucune référence à une élaboration du langage au cours de l'histoire des sciences et il n'est proposé aucun autre symbole pour les atomes que ceux utilisés de nos jours, comme si cela était finalement une évidence.

2.5 Bilan de l'étude des ouvrages scolaires

Pour conclure cette analyse des ouvrages scolaires, les choix de l'eau en cinquième et du carbone en quatrième comme sujet principal d'étude ne sont pas les plus simples à traiter du point de vue du langage symbolique. Le nom « eau » est à la fois le terme scientifique mais aussi celui du langage courant et la lettre C est le symbole tout à la fois de l'élément, de l'atome, de la molécule et du corps pur.

Côté nomenclature, aucun travail n'est proposé autour du nom scientifique en lien avec la notion d'espèces chimiques. Les noms usuels et les noms scientifiques réservés aux espèces chimiques sont utilisés ensemble sans distinction. Deux anciens ouvrages scolaires proposaient des cartes d'identité pour distinguer le nom « commun » du nom « scientifique ». Ces propositions ont disparu des ouvrages récents.

Côté formules, celles-ci sont introduites en lien à la fois avec les modèles microscopiques (atome et molécule) et macroscopiques (réaction chimique), et avec le registre empirique (transformation chimique) mais elles ne sont jamais justifiées. La réaction chimique n'est jamais définie ni explicitement présentée en tant que modèle macroscopique. L'atome est présenté comme un concept catégoriel mais aucun attribut (Barth, 2001) ne lui est associé. Il est caractérisé uniquement par son symbole ou sa représentation dans les modèles moléculaires. Nous n'avons jamais lu explicitement que, dans la formule qui caractérise la molécule, le nombre d'atomes est fixe et déterminé. Les exercices proposés restent essentiellement à un niveau de comptage des atomes et de règles d'écritures (type de symboles utilisés, position des indices). À aucun moment, les ouvrages n'indiquent explicitement que le langage symbolique représente à la fois les niveaux macroscopique et microscopique. La polysémie des mots (par exemple l'eau), des symboles (par exemple C) ou des formules (formule de la molécule ou par extension de l'espèce chimique) est totalement passée sous silence. Pourtant on observe dans les exercices un glissement implicite des noms scientifiques du macroscopique au microscopique, et des formules chimiques du microscopique au macroscopique. Que ce soit dans les programmes ou dans les ouvrages scolaires, aucune présentation explicite du langage symbolique de la chimie n'est faite. Enfin, rien n'est proposé à propos de l'élaboration de ce langage par les scientifiques au cours de l'histoire. Les représentations, qui ont pu exister à certains moments de l'histoire de la chimie mais qui ont été abandonnées au profit des noms et symboles actuellement utilisés, ne sont

jamais évoquées. Il y aurait alors comme une évidence naturelle dans l'utilisation du langage du chimiste.

3. Contexte institutionnel : conclusion

À partir de l'étude des programmes d'enseignement et des manuels qui semblent suivre les consignes du programme, nous pensons que les difficultés autour de l'apprentissage du langage de la chimie sont actuellement ignorées dans l'enseignement en France. À aucun moment, les spécificités du langage symbolique ne sont présentées. Les formules ne sont jamais justifiées ni même questionnées. Rien dans le programme ni dans les ouvrages scolaires ne permet aux enseignants d'apporter les raisons qui font du dioxygène une molécule diatomique ou de l'eau une molécule contenant deux atomes d'hydrogène plutôt qu'un seul. Il n'y a aucune référence vers les faits empiriques et la notion de valence n'est jamais évoquée explicitement, alors qu'elle serait nécessaire pour justifier les modèles moléculaires qui ont, de leur côté, une place non négligeable dans les ouvrages. Le langage symbolique est présenté comme un savoir assertorique.

Chapitre 2 : L'enquête didactique : élève et langage symbolique

L'enquête didactique nécessite de connaître les difficultés des élèves en France à propos du langage symbolique de la chimie, noms et formules brutes ou développées. Aussi avons-nous élaboré et fait passer un questionnaire papier.

1. Objectif du questionnaire

Le questionnaire doit nous permettre de repérer les difficultés des élèves et le sens que les élèves donnent aux trois registres de représentation introduits au cycle 4, la nomenclature, les formules brutes et les équations chimiques et cela en lien avec les concepts chimiques associés dans les programmes, respectivement corps pur et mélange, atome et molécule, et réaction chimique. Les premiers noms scientifiques introduits par les enseignants devraient en principe être associés au concept de corps pur. L'introduction des formules chimiques en

cycle 4 devrait se faire en lien avec le concept de molécule en tant que combinaison d'atomes donnés en nombre fixe et déterminé et avec le concept de réaction chimique comme un réarrangement des atomes des molécules correspondant aux espèces chimiques qui se transforment pour former les molécules correspondant aux espèces chimiques qui se forment. À partir du questionnaire, nous cherchons à répondre aux cinq questions suivantes.

- Quels critères les élèves sont-ils capables d'utiliser pour classer des noms du langage courant ou scientifique à partir d'une liste donnée ?
- Quelles caractéristiques au niveau macroscopique (substance pure ou mélange) et au niveau microscopique (atome ou molécule) les élèves associent-ils à un nom ou / et à une formule ? Interprètent-ils différemment le nom ou la formule pour la même espèce chimique ?
- Quelle lecture les élèves ont-ils de la formule chimique ? Sont-ils capables de reconnaître la même formule brute présentée différemment ?
- Quelle(s) vision(s) les élèves ont-ils de la formule brute ? Sont-ils en mesure de traiter le concept de molécule comme une combinaison d'atomes donnés de nombre invariant, hors contexte et dans une équation chimique, principale utilisation des formules chimiques au collège ?
- Les élèves ont-ils connaissance de l'élaboration du système de représentation ?

2. Méthodologie

2.1 Élaboration du questionnaire

Pour répondre aux questions de recherche, nous avons élaboré un questionnaire papier-crayon comportant sept questions (Annexe 3). Elles impliquent toutes des concepts et notions introduites dès la première ou deuxième année de l'enseignement de la chimie en France. Pour tester la pertinence des questions et finaliser leur rédaction, des entretiens exploratoires ont été menés avec dix élèves de seconde en début d'année scolaire (septembre et octobre). Leurs connaissances en chimie à cette époque de l'année correspondent encore à celles d'un collégien. Les trois premiers entretiens, avec six élèves d'une classe de seconde du lycée Paul Éluard à Saint-Denis, ont été réalisés à partir du protocole en Annexe 4.1 dont la première partie a ensuite été modifiée pour la deuxième série d'entretiens (Annexe 4.2) au lycée Branly

de Nogent / Marne avec quatre élèves issus d'une même classe de seconde. Dans chaque établissement, les élèves ont été désignés par leur professeur de physique - chimie. Pour permettre des échanges plus riches, les élèves ont été interrogés par deux. Seuls les moments que nous considérons comme significatifs pour l'élaboration du questionnaire papier – crayon ont été retranscrits (Annexes 4.3 et 4.4). Dans les dialogues, les élèves sont désignés par la lettre E suivie d'un chiffre pour les différencier dans chaque entretien. Nous nous sommes désignée par la lettre I.

2.1.1 Question 1 : distinction entre noms communs et scientifiques

Pour répondre à la première question de recherche, nous avons proposé une liste de noms du langage courant correspondant tous exclusivement à des mélanges (air, charbon, pétrole, lait) et des noms du langage scientifique de différentes espèces chimiques (carbone, cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, dioxyde de carbone, méthane). Au cours des entretiens exploratoires, et uniquement avec les élèves du lycée Branly, une liste quasiment identique a été testée. L'idée de cette question n'est survenue qu'après la première série d'entretiens au lycée Paul Éluard. Trois des quatre élèves du lycée Branly ont spontanément proposé une classification basée sur les états de la matière. Tous les états de la matière sont représentés dans la liste des espèces chimiques proposées, à leur état naturel. Au cours du deuxième entretien exploratoire du lycée Branly, l'élève E1 propose la distinction entre ce qui existe dans la vie de tous les jours et ce que l'on rencontre uniquement en laboratoire de chimie. Il désigne ces derniers par le nom « *chimique-chimique* » (Annexe 4.4). Dans la liste définitive, nous avons donc ajouté des espèces chimiques que les élèves n'ont sans doute jamais utilisées en dehors des cours de chimie comme le cyclohexane et le peroxyde d'hydrogène. Parmi les noms du langage scientifique de la liste finale, certains sont parfaitement connus des élèves comme « dioxyde de carbone » et d'autres beaucoup moins comme justement « peroxyde d'hydrogène » et « cyclohexane » mais la construction syntaxique de ces deux derniers ne laisse aucun doute sur leur caractère scientifique. Après vérification, chaque nom de la liste apparaît au moins une fois dans les ouvrages scolaires de collège. L'analyse de ces ouvrages nous a déjà permis de constater qu'aucun travail n'est fait à partir de la nomenclature et que le lien entre nom « chimique » officiel et corps pur n'est jamais explicite. Au cours des échanges exploratoires, un élève dans le premier entretien au lycée Branly a répondu en faisant la distinction entre les noms scientifiques et les noms communs.

E1 : quand on dit dioxyde de carbone on a vraiment l'impression de classer quelque chose de désigner un élément alors que quand on dit limonade (il réfléchit)

I : Et est-ce que le nom dioxyde de carbone cela vous apprend des choses sur ce gaz ?

E1 : il est composé de carbone

E2 : c'est ce que j'allais dire il a une molécule précise

E1 : si on s'y connaît un peu en décomposant les mots on voit leurs éléments alors que limonade je ne pense pas que l'on voit grand-chose (Entretien 1 – Lycée Branly – Première partie - Annexe 4.4)

À partir de cette première question, nous souhaitons vérifier si les élèves sont capables de proposer un classement en lien avec les noms proposés et s'ils utilisent spontanément ces noms pour différencier les corps purs des mélanges.

2.1.2 Questions 2 et 3 : critères macroscopiques ou microscopiques associés aux noms et aux formules chimiques

À l'issue de l'étude des ouvrages scolaires, nous pensons que le niveau de lecture d'un nom ou d'une formule chimique, microscopique ou macroscopique, n'est pas suffisamment explicite. Pour répondre à la deuxième question de recherche, nous cherchons à vérifier si les élèves associent aux noms ou aux formules préférentiellement le niveau macroscopique ou le niveau microscopique ou les deux à la fois. Nous pensons que les collégiens pourraient choisir plus souvent les critères microscopiques à partir des formules plutôt qu'avec les noms. En effet, dans les programmes de collège, les formules chimiques sont introduites associées à la molécule et les symboles à l'atome. Rien n'est indiqué pour l'espèce chimique et nous observons dans les ouvrages scolaires un glissement implicite vers le niveau macroscopique pour des représentations symboles et formules.

Au cours des entretiens exploratoires au lycée Paul Éluard en demandant aux élèves ce que représente pour eux la lettre « C », nous souhaitions obtenir comme réponse, soit l'atome, soit l'espèce chimique mais les élèves ont seulement répondu « le carbone » (Annexe 4.3). Le format de la question a été changé en une question à choix multiples. Nous avons proposé une liste de noms (dioxygène, eau, cyclohexane, charbon, méthane, carbone, pétrole, dioxyde de carbone) et une liste de formules (O_2, H_2O, C, CO_2, C_2H_6O, Fe). La liste de noms est assez proche de celle de la première question mais légèrement réduite pour ne pas lasser les élèves inutilement. Pour chaque nom et formule, les élèves ont à choisir entre quatre critères : « corps pur » et « mélange » pour le niveau macroscopique et « atome » et « molécule » pour

le niveau microscopique. Les élèves peuvent cocher un ou plusieurs des quatre critères. Les listes comprennent des noms ou des formules moins connus des élèves de collège comme méthane ou cyclohexane pour les noms ou comme C_2H_6O et Fe pour les formules. Nous voulons déterminer si la structure du nom ou la structure de la formule les guide dans leurs réponses. Enfin, certaines espèces chimiques se trouvent à la fois dans la liste des noms et dans la liste des formules (dioxygène et O_2, eau et H_2O, carbone et C, dioxyde de carbone et CO_2). Ces espèces sont parfaitement connues des élèves et leurs réponses devraient nous permettre de comparer si le choix des critères est identique au nom ou à la formule.

2.1.2.1 Question 2

Par rapport à la liste proposée au cours des entretiens exploratoires, le nom « dioxygène » a été ajouté à la première question. Nous voulons en effet comparer les réponses des élèves pour le dioxygène et pour le dioxyde de carbone dont les noms indiquent respectivement dans la constitution de la molécule un type d'atomes ou plusieurs. De plus l'espèce dioxygène est ainsi représentée dans les deux listes : noms et formules ainsi que le nom « eau », également ajouté à la liste. Toutes les notions développées dans le programme de chimie au début du cycle 4 sont introduites à partir de l'eau. Mais le nom « eau » a un statut ambigu. Il représente le nom officiel utilisé par les chimistes et est donc à ce titre associé à l'espèce chimique. Mais il est également le nom utilisé dans la vie de tous les jours et représente alors plutôt dans ce cas ce que le chimiste considère comme un mélange, par exemple « l'eau minérale ». Les réponses correctes attendues pour chaque nom sont indiquées ci-dessous :

Dioxygène :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐
Eau :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐
Cyclohexane :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐
Charbon :	Corps pur ☐	Mélange ☑	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Méthane :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐
Carbone :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☑	ne sais pas ☐
Pétrole :	Corps pur ☐	Mélange ☑	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Dioxyde de carbone :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐

À cause de l'ambiguïté du nom, nous aurions pu admettre la réponse « mélange » pour l'eau mais celle-ci sera considérée comme incorrecte pour simplifier l'analyse statistique des résultats.

2.1.2.2 Question 3

Nous avons proposé dans la liste soit un symbole (C ou Fe), soit une formule avec les mêmes atomes (O_2), soit des formules avec plusieurs atomes (H_2O, CO_2 et C_2H_6O). Comme pour les noms, nous voulons vérifier si les élèves répondent différemment pour C, Fe ou O_2 comparativement aux formules constituées d'atomes différents. Cette question a été placée après celle concernant les noms. Nous souhaitons en effet des réponses à la question 2 basées uniquement sur le nom sans influence de la formule. Les réponses correctes attendues pour chaque symbole ou formule sont indiquées ci-dessous.

O_2 :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	ne sais pas ☐
H_2O :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	nsp ☐
C :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☑	nsp ☐
CO_2 :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	nsp ☐
C_2H_6O :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☑	Atome ☐	nsp ☐
Fe :	Corps pur ☑	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☑	nsp ☐

Le cas de la formule de l'eau ne présente pas les mêmes ambiguïtés que le nom. Nous prêterons donc une attention particulière aux réponses obtenues pour « eau » H_2O.

2.1.3 Questions 4 et 6

Nous souhaitons dans cette partie répondre aux troisième et quatrième questions de recherche et vérifier si les élèves font une analyse correcte des formules brutes en lien avec le concept de molécule constituée d'un ou de plusieurs types d'atomes dont le nombre est fixe et déterminé. Pour élaborer ces deux questions, nous nous sommes appuyée sur plusieurs résultats de recherche cités par Taskin et Bernholt (2014). Pour faciliter l'analyse, les questions sont toutes en format QCM mais avec une demande d'explication des choix effectués.

2.1.3.1 Question 4

Nous proposons trois couples de formules chimiques : H_2O et H_2O_2, O et O_2, CH_4 et C_2H_8. Pour chaque couple, nous demandons aux élèves si les deux formules représentent la même

molécule. Le premier couple doit nous permettre de vérifier la capacité des élèves à compter précisément le nombre d'atomes dans une formule et donc s'ils maîtrisent le décodage de la formule brute présentée sous sa forme « classique » (les atomes identiques regroupés et dans leur ordre habituel). Au cours des entretiens exploratoires, les dix élèves interrogés ont tous su comparer correctement les formules H_2O et H_2O_2 en reconnaissant bien deux molécules différentes et en proposant une justification correcte (Annexes 4.3 et 4.4). Dans les deux situations suivantes, les formules brutes sont constituées des mêmes atomes et avec des indices proportionnels pour chaque atome semblable. Le deuxième couple, O et O_2, doit nous permettre de vérifier si les élèves font la différence entre atome et molécule dans le cas d'un corps simple. Cette situation est très largement traitée dans les programmes de quatrième pour notamment illustrer cette différence. Nous devrions donc en principe obtenir des pourcentages de réponses correctes élevés. Dans le troisième couple, CH_4 et C_2H_8, nous voulons vérifier si les élèves considèrent comme identiques ou différentes ces deux formules constituées d'atomes semblables et en nombre proportionnel. Pour cette question, nous reprenons une recherche de Keig et Rubba (1993). Ce cas n'apparaît dans aucun ouvrage scolaire de collège. Nous faisons l'hypothèse qu'il n'est pas, ou très peu, proposé par les enseignants en exemple ou exercice. Les élèves ne devraient donc pas pouvoir donner une réponse déjà apprise en classe.

2.1.3.2 Question 6

Nous voulons examiner si les réponses à la question 4 évoluent quand on place les formules dans le contexte d'une équation chimique. Pour que les élèves ne voient pas un lien direct entre les deux questions, celles-ci ne sont pas l'une dernière l'autre dans le questionnaire. Nous nous inspirons d'une recherche déjà menée dans les pays anglo-saxons par Sanger (2005) et qui a montré que les élèves, quand ils doivent ajuster les nombres stœchiométriques d'une équation chimique, font également varier les indices des formules des réactifs ou des produits. Nous proposons, pour la question 6, deux couples d'équations chimiques :

- la première pour la décomposition de l'eau en dihydrogène et dioxygène

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad \text{et} \qquad H_2O \rightarrow H_2 + O$$

- la deuxième pour la combustion du méthane produisant du dioxyde de carbone et l'eau

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_4O_2 \qquad \text{et} \qquad CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

D'un point de vue arithmétique, la loi de conservation des éléments est vérifiée pour chacune des équations mais, dans chaque couple, une des équations comprend une formule chimique incorrecte : O pour la première couple et H_4O_2 pour la deuxième. Il est clairement précisé dans le texte précédant les équations qu'il y a formation de dioxygène dans un cas et d'eau dans l'autre. Nous demandons aux élèves d'indiquer pour chaque équation si celle-ci est valide. Pour ne pas ajouter d'autres difficultés, ces équations ont été choisies pour la simplicité de leurs nombres stœchiométriques. Dans les équations incorrectes, les nombres stœchiométriques sont tous égaux à 1 pour les produits. De plus toutes les formules « correctes » sont parfaitement connues des élèves. Ces deux réactions sont proposées dans tous les ouvrages scolaires. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que tous les élèves les ont étudiées en classe et que ces équations peuvent même être considérées comme triviales pour des élèves de fin de lycée. Pourtant, au cours des entretiens exploratoires, nous constatons que neuf élèves sur dix considèrent l'équation « $H_2O \rightarrow O + H_2$ » correcte et que six élèves considèrent « $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$ » fausse. Les réponses des élèves semblent indiquer une vision de la réaction chimique déjà repérée dans plusieurs recherches (Fillon, 1997 ; Sanger, 2005) : les formules des réactifs sont accolées pour donner les nouveaux produits.

> La première est fausse car on a un atome d'oxygène dans H_2O et ensuite deux dans O_2. (Entretien 2 - Lycée P. Éluard – Deuxième partie - Annexe 4.3)
>
> La deuxième car c'est H_2O donc on a deux hydrogènes plus un oxygène […] le truc c'est que H_2 deux hydrogène est inversé normalement. Pour moi cela serait H_2 + O. (Entretien 3 - Lycée P. Éluard – Deuxième partie - Annexe 4.3)
>
> et là le O_2, il est pas présent dans la molécule d'eau on a O. (Entretien 1 – Lycée P. Éluard – Deuxième partie - Annexe 4.3)

Un élève se rend bien compte que la composition de la molécule change entre O et O_2 mais choisit quand même l'équation avec O (Annexe 4.1). Un élève a une interprétation algébrique de l'équation.

> « mais j'aurais mis plutôt H_4 que $2H_2$ » (Entretien 1 – Lycée Branly - Deuxième partie - Annexe 4.4)

Cela ne semble donc pas poser problème aux élèves d'utiliser O à la place de O_2. Nous avons ajouté à la question 6 le deuxième couple d'équations pour déterminer s'ils proposent le même type de réponses dans le cas d'une formule composée comme H_2O et H_4O_2. Enfin, nous voulons examiner la cohérence des réponses des élèves entre la question 4 et la question 6 :

- entre O/O_2 question 4 et les équations de décomposition de l'eau question 6

- entre CH_4/C_2H_8 question 4 et H_2O/H_4O_2 dans l'équation de combustion du méthane question 6, la comparaison portant alors sur la proportionnalité des atomes entre deux formules.

2.1.4 Question 5

Pour répondre à la troisième question de recherche, il nous semblait nécessaire de connaître les règles ou conventions qui régissent l'écriture d'une formule brute pour les élèves, ce qu'ils pensent être possible ou non d'écrire. Nous proposons d'abord l'exemple de l'eau, formule brute qu'ils connaissent tous parfaitement en leur demandant d'indiquer si les formules, HOH et OH_2, sont également correctes. Le deuxième exemple correspond à l'éthanol et aux formules brutes très souvent proposées dans le cadre de la chimie organique au lycée : C_2H_6O et C_2H_5OH. Ces deux dernières formules ne sont pas étudiées au collège mais nous considérons que les principes donnés dans le programme de quatrième doivent permettre aux élèves de formuler un avis. La question est également un peu différente du premier exemple car on ne change pas l'ordre des atomes comme pour les formules de l'eau mais on décale simplement un atome d'hydrogène.

Au cours des entretiens exploratoires, lorsque nous présentons aux élèves une autre possibilité d'écriture de la formule brute de la molécule d'eau, ils sont tous perturbés.

« dans OH_2 on met l'oxygène en premier et les deux hydrogènes ensuite donc ce n'est pas pareil » (Entretien 3 – Lycée Paul Éluard – Partie 3 – Annexe 4.3)
« en fait dans H_2O on ne peut pas séparer le H et le 2 » (Entretien 2 – Lycée Branly – Partie 3 – Annexe 4.4)

A priori, les élèves utilisent uniquement la forme « classique » H_2O pour écrire cette formule. Nous obtenons trois types de réponses :

- ce n'est pas possible car cela représente une autre molécule et notamment OH_2 ;
- ce n'est pas possible car on n'a jamais vu ;
- cela pourrait être possible mais on n'a jamais vu.

Nous constatons dans leurs réponses que les élèves ne connaissent pas les règles leur permettant d'indiquer si les propositions « inhabituelles » sont correctes ou non. Certains proposent des règles qu'ils ont l'impression de connaître mais qui en fait leur permettent de justifier l'écriture qui leur semble correcte et d'éliminer celles qu'ils n'ont jamais vues. Nous

observons par exemple des propositions telles que l'ordre des atomes qui dépend de leur masse ou de leur nombre (Entretien 3 – Lycée Paul Éluard – Partie 3 – Annexe 4.4). Un des élèves interrogés justifie la non-possibilité d'inverser les lettres dans une formule en proposant un parallèle avec les mathématiques.

> « c'est comme dans les divisions quand on met un chiffre fort et un chiffre faible et que l'on inverse ce n'est pas pareil » (Entretien 3 – Lycée Paul Éluard – Partie 3 – Annexe 4.3)

Avec l'éthanol, les élèves prennent plus de temps avant de répondre mais sont capables techniquement de décoder les formules constatant que les deux exemples ont bien les mêmes atomes dans les mêmes quantités. Ne connaissant pas *a priori* cette formule, ils sont moins nombreux que dans le cas de l'eau à rejeter l'écriture moins « classique » avec le H séparé. Ils sont prêts à accepter la deuxième écriture même si cela ne correspond pas aux règles qu'ils ont apprises pour les formules brutes, notamment tous les atomes du même type regroupés.

Ainsi que nous le constatons dans les ouvrages scolaires, aucune règle ne semble être donnée aux élèves concernant la position des atomes dans la formule brute. De ces deux questions au cours des entretiens exploratoires, il ressort que l'absence de règles explicites sur ce qu'i est possible d'écrire ou non pour une formule brute semble bloquer les élèves. Ils sont globalement capables de décoder une formule brute, même dans une situation inconnue, mais ils ont du mal à accepter une écriture qui sort de la règle apprise en collège (tous les atomes de même nature regroupés) et des habitudes d'écriture pour une molécule connue (ordre des atomes toujours identique). Et pour justifier l'écriture de la formule brute, ils proposent leurs propres règles qui pourraient être en contradiction avec les formules qu'ils vont être amenés à étudier par la suite au lycée.

2.1.5 Question 7

La question 7 doit nous permettre de répondre à la dernière question de recherche. Au cours des entretiens exploratoires, nous constatons que les élèves semblent n'avoir jamais vu d'autres types de symboles. L'utilisation des lettres leur paraît le meilleur choix car pratique, compréhensible par tous et simple d'utilisation. Un élève a du mal à concevoir que les chimistes aient pu changer de règles et affirme que :

> « c'est les lettres depuis toujours » (Entretien 2 – Lycée Lycée P. Éluard - Quatrième partie - Annexe 4.4)

Cette dernière question doit nous permettre de d'examiner la pertinence de proposer un outil didactique en lien avec l'élaboration historique des formules chimiques.

2.2 Échantillonnage et collecte des données

Nous avons fait passer ce questionnaire (Annexe 3) à des élèves allant de la quatrième jusqu'à la terminale scientifique. Tous les élèves interrogés ont en principe les connaissances nécessaires pour pouvoir répondre. Les enseignants contactés sont répartis dans plusieurs régions en France et ont accepté de faire passer le questionnaire papier-crayon à leurs élèves au cours d'une de leurs séances en classe. Nous n'avions pas prévu initialement de faire passer le questionnaire à des étudiants. Mais dès les premiers résultats obtenus et le faible taux de réponses correctes constaté tous niveaux confondus, nous avons décidé d'ajouter un groupe en première année d'université. En tout 603 réponses ont été recueillies entre décembre 2014 et juin 2015 : 164 élèves de quatrième, 69 élèves de troisième, 178 élèves de seconde, 47 élèves de première scientifique, 100 élèves de terminale scientifique et 45 étudiants de L1 en sciences. Toutes les réponses sont anonymes mais les élèves ou étudiants devaient mentionner leur classe et leur établissement scolaire. Pour faciliter l'analyse et permettre l'observation d'une éventuelle évolution ou pas avec le niveau d'étude, les réponses ont été regroupées en quatre catégories correspondant aux différentes orientations des élèves dans le système scolaire :

- groupe Collège : ce groupe correspond aux élèves de quatrième[11] et de troisième. Neuf classes provenant de six collèges différents ont passé le questionnaire. Nous avons recueilli 233 réponses ;
- groupe Seconde : ce groupe correspond aux élèves de seconde générale. Nous avons collecté 178 réponses dans six classes provenant de cinq lycées différents ;
- groupe Première et Terminale : ce groupe correspond aux élèves de première ou terminale scientifique. Nous avons recueilli 147 réponses dans six classes provenant de six lycées différents ;

[11] Tous les élèves de quatrième ont traité la partie du programme de chimie leur permettant de répondre au questionnaire.

- groupe Licence : ce groupe correspond à la première année de licence à l'université. Les étudiants étaient tous en licence de chimie et licence de physique-chimie dans la même université. Nous avons recueilli 45 réponses.

Dans nos analyses, nous n'avons pas toujours tenu compte de ce dernier groupe moins fiable statistiquement de par le petit nombre d'étudiants testés et tous issus du même groupe et du même établissement. Il nous permettra cependant de confirmer les résultats obtenus dans le troisième groupe.

2.3 Méthodes d'analyse

Toutes les réponses aux questions à choix multiples sont reportées dans un tableur et codées avec un « 1 » pour la ou les réponses sélectionnées et un « 0 » pour les réponses non cochées.

2.3.1 Analyse des réponses à la question 1 (Annexe 3) : distinction entre noms communs et scientifiques

Dans cette question (Annexe 3), les élèves et étudiants doivent proposer une classification à partir d'une liste de noms correspondant soit à des espèces chimiques soit à des mélanges. Nous cherchons à voir si, pour cela, ils utilisent la différence de syntaxe entre les noms scientifiques et les noms communs. Pour débuter l'analyse, nous divisons les réponses en trois catégories.

- Dans la première catégorie, nous plaçons les réponses dans lesquelles le classement proposé utilise la différence entre nom scientifique et nom du langage courant. Nous la désignons par : « **Avec les noms** ». Pour faire partie de cette catégorie, les élèves ou les étudiants doivent placer d'un côté les noms : huile, lait, air et de l'autre les noms : carbone, cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, dioxyde de carbone et méthane, comme dans l'exemple ci-dessous.

Assemblage de molécules : air, huile, charbon, lait ;
Molécules : cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, le dioxyde de carbone, méthane ;
Atome : carbone
(groupe Seconde)

- Dans la deuxième catégorie, le classement proposé dans les réponses mêle indifféremment les noms communs et scientifiques. Nous la désignons par « **Sans les noms** ».

Neutre : air, lait, méthane, cyclohexane, peroxyde d'hydrogène
Nocif : charbon, carbone, dioxyde de carbone, pétrole
(groupe Licence)

- La troisième catégorie correspond aux élèves et étudiants qui ne répondent pas et nous la désignons par « **Aucune réponse** ».

Les noms de la liste ne sont pas tous toujours présents dans les classifications proposées, notamment le cyclohexane et le peroxyde d'hydrogène qui sont deux espèces chimiques peu connues des élèves bien que mentionnées dans les manuels scolaires dès la cinquième[12]. Nous choisissons automatiquement la catégorie « Avec les noms » quand l'un de ces deux noms est regroupé avec les autres noms scientifiques. Par contre la présence du cyclohexane ou du peroxyde d'hydrogène dans une liste contenant des noms communs entraîne immédiatement la classification de la réponse dans la catégorie « Sans les noms ».

Nous analysons ensuite les critères associés aux différentes propositions de classification. Nous identifions six sous-catégories dans les réponses proposées en plus de l'absence de critères proposés.

- Les noms sont explicitement classés en fonction de leur syntaxe (nom scientifique / nom courant) comme dans l'exemple ci-dessous. Nous désignons cette sous-catégorie par « **Nom** ». Cette première catégorie correspond à la distinction que nous voudrions voir utiliser au moment de l'introduction de la nomenclature associée à la notion de corps pur.

Langage courant : air, carbone, charbon, pétrole, lait
Langage scientifique : cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, dioxyde de carbone, méthane
(groupe Première et Terminale)

- Les noms sont classés selon deux critères : mélange et corps pur. Nous appelons cette sous-catégorie « **Pur/Mélange** ». Nous avons examiné dans celle-ci l'exactitude des

[12] Ces noms sont présents dans les manuels de cinquième des programmes en cours au moment du questionnaire.

réponses. Nous voulons en effet vérifier si les concepts corps pur et mélange sont acquis, ce qui ne semble pas le cas dans l'exemple de classement proposé ci-dessous.

Corps pur : charbon, pétrole, air, carbone, lait
Mélange : dioxyde de carbone, méthane peroxyde d'hydrogène
(groupe licence)

- Les noms sont classés suivant les états de la matière : gaz, liquide, solide. Nous désignons cette sous-catégorie par « **g/l/s** ».
- Les élèves ou les étudiants opposent un niveau microscopique à un niveau macroscopique pour classer les noms comme dans l'exemple ci-dessous. Chaque fois qu'ils utilisent les termes « atome » ou « molécule » dans leur classement, nous plaçons leur réponse dans cette catégorie. Nous la désignons par « **Macro/micro** ».

Échelle macroscopique : pétrole, charbon, lait, air, carbone
Échelle microscopique : cyclohexane, méthane, dioxyde de carbone, peroxyde d'hydrogène
(groupe Première et Terminale)

- On peut trouver aussi des critères de classement tels que : toxique/non toxique, substance chimique/substance non chimique, polluant/non polluant comme dans l'exemple ci-dessous. Nous appelons cette dernière « **Naturel/non Naturel** ».

Toxiques : peroxyde d'hydrogène, pétrole, charbon, cyclohexane
Naturels : air, carbone, dioxyde de carbone, lait, méthane
(groupe Collège)

- Enfin, si nous ne trouvons aucune logique d'ensemble aux critères proposés par les élèves ou les étudiants comme dans l'exemple ci-dessous, nous classons ces réponses en « **Autres** ».

Gaz : air, dioxyde, méthane,
Fossile : pétrole, charbon
Autre : cyclohexane, peroxyde, lait
(groupe Première et Terminale)

- Si l'élève ou l'étudiant ne propose aucun critère dans son classement, nous classons la réponse dans « **Aucun critère** ».

Parfois les élèves et étudiants utilisent dans leur classification les arguments d'une des sous-catégories autres que « Macro/micro » mais en utilisant dans leurs critères les termes « molécule » ou « atome ». Nous plaçons alors cette réponse dans deux sous-catégories comme dans l'exemple ci-dessous qui est classé en « Macro/micro » et « Pur/Mélange ».

Mélange : lait, air, huile, charbon
Molécules : cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, méthane, dioxyde de carbone
Atome : carbone
(groupe Première et Terminale)

De même ceux que nous classons dans la sous-catégorie « Nom » peuvent aussi proposer d'autres arguments. Les réponses pouvant appartenir à plusieurs sous-catégories, la somme des pourcentages obtenus est supérieure à 100%. Enfin nous ne tenons jamais compte de l'exactitude des réponses pour classer les réponses dans les sous-catégories.

2.3.2 Analyse des réponses aux questions 2 et 3 (Annexe 3) : association des critères macroscopiques et microscopiques avec noms et formules

Pour chaque groupe d'élèves ou d'étudiants, nous commençons par identifier les réponses correctes pour chaque nom et formule. Nous cherchons ensuite s'il y a une certaine cohérence dans les réponses correctes des élèves et étudiants entre les critères macroscopiques (corps pur et mélange) et les critères microscopiques (atome et molécule) en fonction des noms ou des formules. Nous utilisons pour cela le logiciel CHIC[13] qui s'appuie sur une classification hiérarchique ascendante par analyse de la vraisemblance des liens (Lerman, 2008). Cela nous permet d'obtenir des arbres de similarité et de déterminer pour quels noms, ou pour quelles formules, des groupes d'élèves ou d'étudiants répondent correctement de façon similaire soit au niveau macroscopique soit au niveau microscopique.

Pour la suite de l'étude, nous restreignons l'analyse aux espèces chimiques qui correspondent à celles rencontrées plus fréquemment par les élèves et les étudiants au cours de leur scolarité (carbone, dioxygène, dioxyde de carbone et eau). Nous évitons ainsi des réponses qui pourraient être liées à la méconnaissance du nom ou de la formule. Cela devrait nous permettre d'être aux plus près des idées des élèves dans leur interprétation du langage

[13] CHIC (Classification Hiérarchique Implicative et Cohésitive) : logiciel d'analyse de données conçu par Régis Gras en ce qui concerne les algorithmes, puis successivement développé sur P.C. par Saddo Ag Almouloud, Harrisson Ratsimba-Rajohn et, dans sa version actuelle, par Raphaël Couturier.

symbolique. De plus, ces quatre espèces chimiques apparaissent dans les deux listes. Nous pouvons ainsi comparer les résultats obtenus au nom et à la formule d'une même espèce chimique. Nous n'utilisons plus le groupe Licence pour garantir une étude statistique plus fiable.

Nous continuons donc l'étude en relevant les critères cochés en microscopique et en macroscopique et en cherchant à analyser si un des deux niveaux est choisi préférentiellement par les élèves. Nous constituons trois catégories de réponse pour cette étude :

- ceux qui ne sélectionnent qu'un seul niveau de critère, ce qui donne le groupe « **Macro** » pour ceux qui choisissent exclusivement « corps pur » ou « mélange » ou le groupe « **micro** » pour ceux qui choisissent exclusivement « atome » ou « molécule »
- ceux qui cochent à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique que nous avons appelé « **Macro et micro** »

Pour affiner les résultats obtenus dans le choix des critères, nous comparons avec les deux seuls mélanges proposés dans les listes : le charbon et le pétrole.

Enfin nous terminons l'analyse des questions 2 et 3 par la recherche des pourcentages de réponses correctes aux critères macroscopiques et aux critères microscopiques pour chaque groupe. Nous examinons l'évolution des réponses avec le niveau scolaire. À l'aide d'un test exact de Fisher[14], nous comparons les résultats du groupe « Collège », début d'enseignement du langage symbolique dans le secondaire avec ceux du groupe « Première et Terminale », fin d'enseignement du secondaire. Nous comparons ensuite les pourcentages obtenus pour une même espèce chimique avec le nom et avec la formule par niveau scolaire. Nous utilisons un test de Mc Nemar pour vérifier si les différences observées sont statiquement significatives. Ce test, équivalent à un Khi2, est utilisé dans le cas de données appariées.

2.3.3 Analyse des réponses aux questions 4 et 6 (Annexe 3) : décodage empirique de la formule chimique liée à la notion de molécule

Pour chaque groupe, nous recueillons les pourcentages de réponses correctes obtenues à chaque couple de formules que les élèves et étudiants doivent comparer dans la question 4. Nous identifions ensuite le pourcentage d'élèves et d'étudiants répondant que l'équation contenant la formule « O » ou la formule « H_4O_2 » n'est pas correcte à la question 6. Nous

[14] Ce test est similaire à un test khi2, quelle que soit la taille de l'échantillon.

recherchons dans les justifications des élèves ou des étudiants celles indiquant explicitement que O et H_4O_2 ne représentent pas respectivement le dioxygène et l'eau ou au contraire représentent bien ces deux espèces chimiques. Enfin, nous restreignons le groupe d'élèves ou d'étudiants à ceux qui répondent correctement aux trois couples de formules de la question 4 et nous analysons leurs réponses sur les équations de la question 6.

2.3.4 Analyse des réponses à la question 5 (Annexe 3)

Nous recueillons les pourcentages d'élèves ou d'étudiants dans chaque groupe acceptant ou rejetant les formules proposées comme correctes. Puis nous recueillons les arguments avancés leur permettant de rejeter certaines propositions.

2.3.5 Analyse des réponses à la question 7(Annexe 3)

Pour cette dernière question, nous ne relevons que le pourcentage d'élèves indiquant qu'il a pu exister d'autres symboles.

3. Résultats et discussion

3.1 Question 1

Pour mémoire, les élèves et étudiants doivent classer une liste de noms en proposant des catégories (Annexe 3).

3.1.1 Résultats : prise en compte nom scientifique/nom commun

Les réponses des élèves sont divisées en deux catégories : ceux qui font une différence entre les noms scientifiques et les noms communs (« Avec les noms ») et ceux dont la classification ne tient pas compte de cette différence (« sans les noms »). L'ensemble des réponses est regroupé dans le Tableau 1 ci-dessous.

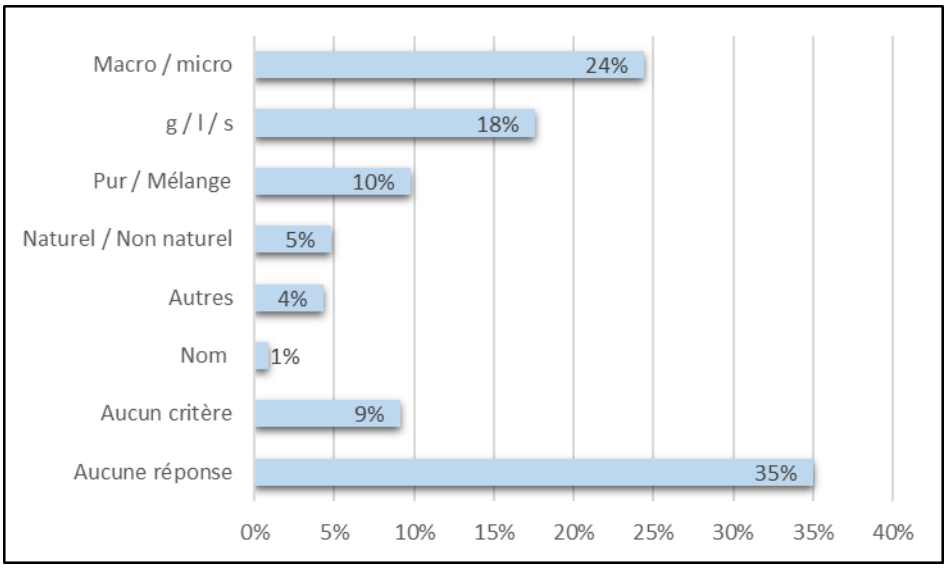
Tableau 1 Répartition des réponses, par niveau d'étude et pour l'ensemble, dans chaque catégorie

Catégories Groupe d'élèves ou d'étudiants	Aucune réponse	Sans les noms	Avec les noms
Collège (N = 233)	49%	33%	18%
Seconde (N = 178)	29%	45%	26%
Première et Terminale (N = 147)	25%	42%	33%
Licence (N = 45)	20%	38%	42%
Ensemble des réponses (N = 603)	35%	39%	26%

Seulement un quart (26%) des élèves et étudiants (Tableau 1) utilisent les noms scientifiques pour fournir des classifications. Plus le niveau scolaire est élevé, plus nous obtenons de réponses. La moitié des élèves (49%) du groupe Collège (Tableau 1) ne répond pas à cette question mais ils ne sont plus qu'un quart en Première et Terminale. L'opposition entre noms communs et scientifiques est souvent utilisée lorsque les élèves ont un niveau élevé en chimie. Mais c'est seulement dans le dernier groupe que ce type de critère prévaut.

3.1.2 Résultats : critères proposés par les élèves et les étudiants

Nous avons réparti l'ensemble des critères proposés par les élèves et les étudiants en six sous-catégories définies en 2.3.1. Nous avons ajouté ceux qui ne donnent aucun critère et ceux qui ne répondent pas. L'ensemble des réponses sont regroupées dans le Graphique 1 ci-dessous.



Graphique 1 Répartition des critères proposés par les élèves et les étudiants (N = 603)

Deux critères reviennent plus souvent :

- une classification type microscopique/macroscopique pour 24% des élèves et étudiants (Graphique 1) ;
- une classification en gaz, liquide ou solide pour 18% des élèves et étudiants (Graphique 1).

Le critère « Pur/Mélange » vient ensuite avec 10% des réponses (Graphique 1). Mais si nous analysons en détail les réponses dans cette sous-catégorie, nous constatons que plus des deux tiers sont incorrectes. Parmi les 63 élèves ou étudiants qui utilisent ce critère, seuls 16 associent correctement les espèces chimiques à « corps pur » ainsi que le lait, le charbon ou le pétrole à « mélange », comme dans l'exemple ci-dessous.

Corps pur :

- Organique : cyclohexane, méthane

- Minéral : carbone, peroxyde d'hydrogène, dioxyde de carbone

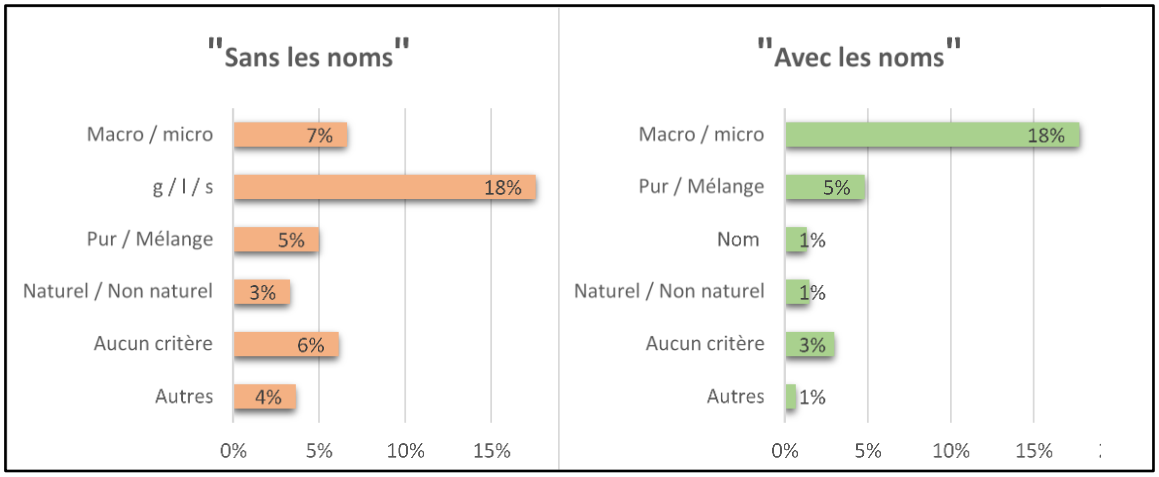
Mélange :

- Organique : charbon, pétrole, lait

(Groupe Première et Terminale)

Seulement 5 élèves de terminale et 3 de licence suggèrent dans leur réponse une différence entre les noms courants et les noms scientifiques, soit 1% de l'ensemble dans la sous - catégorie « Nom » (Graphique 1).

Nous étudions ensuite comment les critères utilisés se répartissent entre les deux catégories principales d'élèves ou d'étudiants (Graphique 2)



Graphique 2 Répartition des critères proposés par les élèves et étudiants (N = 603) en fonction des catégories

Dans la catégorie « Avec les noms », l'opposition entre microscopique et macroscopique est le premier critère proposé par les élèves et les étudiants avec 18% en « Macro/micro » (Graphique 2). Tous les noms « scientifiques » sont associés au niveau microscopique par l'utilisation des termes « atome » ou « molécule ». Les noms courants sont quant à eux placés dans le niveau macroscopique, comme dans l'exemple ci-dessous.

Produits : charbon, huile, lait, air
Molécules : cyclohexane, peroxyde d'hydrogène, le dioxyde de carbone, méthane
Autres : carbone
(groupe Première et Terminale)

Dans la catégorie « Sans les noms », les états de la matière (« g/l/s ») correspondent au premier critère utilisé avec 18% des réponses (Graphique 2). Lorsque les élèves utilisent ce critère, les noms communs et les noms scientifiques sont classés ensemble. En effet, le nom commun « air » et le nom scientifique « méthane » correspondent tous deux à des gaz. Cela justifie que cette sous-catégorie n'apparaisse pas dans la catégorie « Avec les noms ». Ces élèves et étudiants ont donc privilégié les états de la matière et, dans leur cas, nous ne pouvons pas savoir s'ils étaient capables de proposer un classement basé sur la syntaxe des noms de la liste.

3.1.3 Discussion

Le grand nombre d'absences de réponses, plus du tiers de l'ensemble des élèves ou étudiants et quasiment la moitié au collège (Tableau 1), indique que les élèves et les étudiants ne sont pas outillés pour ce type de question. Dans les programmes, rien n'est proposé en relation avec les noms scientifiques. Nous n'avons trouvé aucun exercice dans les manuels scolaires de collège qui propose des activités basées sur l'utilisation des noms scientifiques et leur comparaison avec les noms communs. Pourtant, classer des espèces chimiques en différentes catégories fait bien partie des travaux de base du chimiste avec les acides/bases, les métaux/non-métaux, les gaz/liquides/solides, les organiques/minéraux, etc. (Schummer, 1998). La différence de nature entre nom scientifique et nom commun ne semble pas aider les élèves à classer une liste de noms. Seulement un quart d'entre eux (exactement 26% - Tableau 1) semblent utiliser cette distinction dans leurs critères.

Peu d'étudiants utilisent le critère « corps pur/mélange » (10% - Graphique 1) et lorsqu'ils le font, les deux tiers parmi eux font une erreur en associant les noms scientifiques à « mélange ». Bien que la notion de corps pur soit introduite dès la première année du cycle 4, les élèves et étudiants ne semblent pas en mesure d'utiliser ce concept. Nous reprenons ce point dans l'analyse des questions 2 et 3.

L'opposition microscopique/macroscopique, avec un quart des réponses (Graphique 1) est le premier critère utilisé par les étudiants. Il n'y avait pourtant aucune raison, à partir de la liste de noms proposés, d'utiliser ce critère. Il semblerait que les élèves et étudiants ayant utilisé cette sous-catégorie aient associé majoritairement les noms scientifiques à l'échelle microscopique (atome ou molécule). Les élèves et étudiants ne semblent donc pas en mesure d'utiliser les noms scientifiques et noms communs pour distinguer correctement les espèces chimiques des mélanges, concepts du niveau macroscopique. Nous développons également ce point dans l'analyse des questions 2 et 3.

3.2 Questions 2 et 3

Pour mémoire dans les questions 2 et 3 (Annexe 3), les élèves et les étudiants doivent choisir, pour huit noms puis six formules, un ou plusieurs critères parmi les quatre propositions suivantes : corps pur (cp), mélange (mel), atome (a) et molécule (m).

3.2.1 Réponses correctes et similarité des réponses pour chaque nom et chaque formule

3.2.1.1 Résultats

Plus de 98% des élèves ont répondu à ces deux questions. Mais les pourcentages obtenus (Tableau 2 et Tableau 3) sont très bas, même pour les étudiants de licence. C'est suite à l'obtention de ces résultats que nous avons décidé d'ajouter le groupe licence. Mais on s'aperçoit que les pourcentages s'améliorent à peine.

Tableau 2 Réponses correctes par niveau d'étude pour chaque nom

Noms de la liste / Groupe d'élèves ou d'étudiants	carbone (cp et a)	eau (cp et m)	dioxygène (cp et m)	dioxyde de carbone (cp et m)	méthane (cp et m)	cyclohexane (cp et m)	pétrole (mel)	charbon (mel)
Collège (N = 233)	9%	8%	11%	4%	3%	3%	35%	21%
Seconde (N = 178)	21%	19%	8%	3%	2%	2%	39%	24%
Première et Terminale (N = 147)	22%	16%	14%	5%	7%	4%	54%	36%
Licence (N = 45)	40%	18%	33%	7%	11%	9%	56%	38%

Tableau 3 Réponses correctes par niveau d'étude pour chaque formule

Formules de la liste / Groupe d'élèves ou d'étudiants	C (cp et a)	H_2O (cp et m)	O_2 (cp et m)	CO_2 (cp et m)	Fe (cp et m)	C_2H_6O (cp et m)
Collège (N = 233)	13%	6%	15%	5%	7%	2%
Seconde (N = 178)	29%	8%	15%	3%	25%	2%
Première et Terminale (N = 147)	22%	12%	16%	6%	22%	4%
Licence (N = 45)	49%	16%	33%	4%	36%	7%

Peu d'élèves et d'étudiants semblent en mesure de choisir correctement parmi les quatre critères proposés : corps pur, mélange, atome et molécule et cela même pour les espèces chimiques les plus communes comme le dioxygène, le carbone et le dioxyde de carbone. Parmi ces dernières, les résultats les plus faibles sont obtenus pour le dioxyde de carbone où même en licence moins de 10% des étudiants répondent correctement, nom ou formule confondus. Paradoxalement, les meilleurs résultats sont obtenus pour le charbon et pétrole alors que ceux-ci ne sont pas particulièrement étudiés au niveau scolaire. Pour chaque nom et formule, nous avons réalisé un test du Khi2 entre le groupe « Collège » et le groupe « Première et Terminale » (Annexe 5.1). Nous observons alors, qu'au risque de 5% de se tromper, il y a une évolution statistiquement significative entre le groupe Collège et le groupe Terminale pour les noms et formules suivantes : carbone ; eau et H_2O ; pétrole ; charbon ; Fe. Pour tous les autres, nous pouvons considérer qu'il n'y pas d'amélioration significative entre le collège et la

fin de lycée dans le choix des critères, notamment pour les espèces chimique dioxygène et dioxyde de carbone (nom et formule) et pour la formule C du carbone.

Les pourcentages de réponses correctes sont faibles pour chaque composé mais est-ce qu'un élève qui répond correctement à un des noms, ou à une des formules, le fait également pour les autres ? Pour estimer cela, nous examinons les résultats obtenus pour les trois composés les plus connus : le carbone, l'eau et le dioxygène. Nous ne tenons pas compte du dioxyde de carbone pour lequel les pourcentages obtenus sont trop faibles. Nous calculons le pourcentage de réponses correctes des élèves pour ces trois composés, noms et formules (Tableau 4).

Tableau 4 Réponses correctes par niveau d'étude pour carbone, dioxygène et eau puis pour C, O_2 et H_2O

Noms et formules Groupe d'élèves ou d'étudiants	Noms (carbone, dioxygène, eau)	Formules (C, O_2, H_2O)
Collège (N = 233)	1%	1%
Seconde (N = 178)	1%	1%
Première et Terminale (N = 147)	3%	3%
Licence (N = 45)	9%	9%

Les pourcentages de réponses correctes obtenus pour les trois composés (Tableau 4) sont beaucoup plus faibles que ceux obtenus pour chacun des composés (Tableau 2 et Tableau 3). Il semblerait alors qu'un élève ou un étudiant capable de répondre correctement à l'un de ces trois composés, à partir du nom ou de la formule, ne soit pas capable de le faire pour les deux autres. Pour vérifier cela, nous avons recherché si les élèves répondent de manière similaire pour les critères macroscopiques et les critères microscopiques. À l'aide du logiciel CHIC[15], nous avons obtenu les arbres de similarité. Ils comparent statistiquement les groupes d'élèves qui répondent correctement de façon similaire, soit au niveau macroscopique, soit au niveau microscopique pour les noms (Figure 37) et les formules (Figure 38). Les traits horizontaux représentent le degré de similarité. Plus il est élevé, plus la similarité est importante. La plus forte ressemblance statistique est obtenue entre les élèves qui répondent correctement aux critères « micro » pour le dioxygène et ceux qui répondent correctement aux critères « micro » pour le dioxyde de carbone. Les deux réponses sont encadrées en pointillés bleu (Figure 37).

[15] Classification Hiérarchique Implicative et Cohésitive

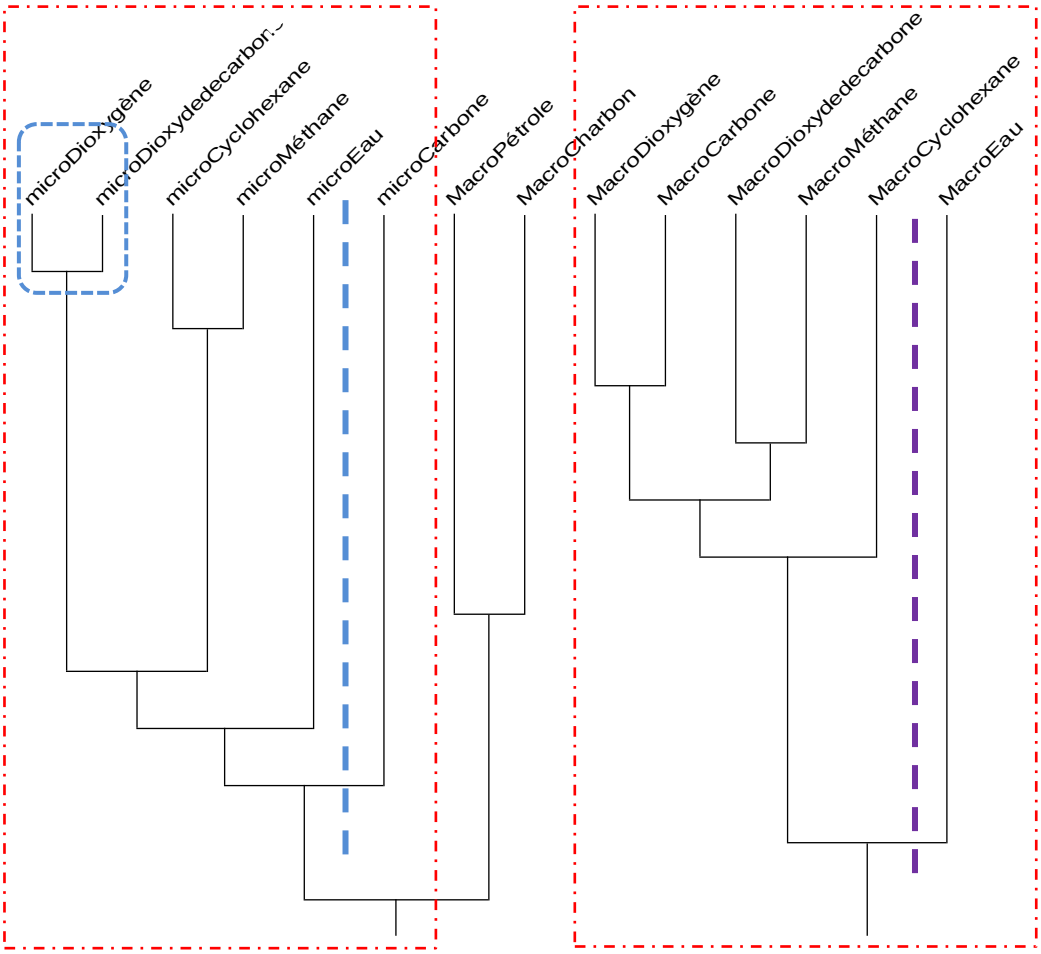


Figure 37 Arbre de similarité des réponses correctes pour les noms, critères Macro et critères micro, tous niveaux d'étude confondus (603 réponses)

Nous observons exactement le même couple de réponses avec les formules O_2 et CO_2 (encadré en pointillés bleus Figure 38). Dans le cas des formules concernant les critères microscopiques, nous nous apercevons que les réponses sont toutes similaires en dehors du symbole du carbone qui forme un groupe distinct (séparé par un trait en pointillés bleus Figure 38). Il est également à part dans les noms (séparé par un trait en pointillés bleus Figure 37). Nous pouvons également observer que ceux qui répondent correctement corps pur pour l'eau forment un groupe isolé (groupe également séparé un trait violet Figure 37) et ne correspond donc pas aux élèves qui répondent correctement aux critères macroscopiques pour les autres noms. Dans le cas des noms, nous observons que les élèves qui répondent correctement « mélange » pour « Pétrole » et « Charbon » (groupes en dehors des cadres en pointillés rouges Figure 37) forment un groupe à part. Enfin, nous obtenons également deux groupes distincts (Figure 38) pour les formules dans les réponses « Macro » séparées par un trait pointillé violet. Nous obtenons des réponses similaires aux formules, d'un côté pour H_2O et CO_2, puis C_2H_6O et O_2, et de l'autre côté pour Fe et C.

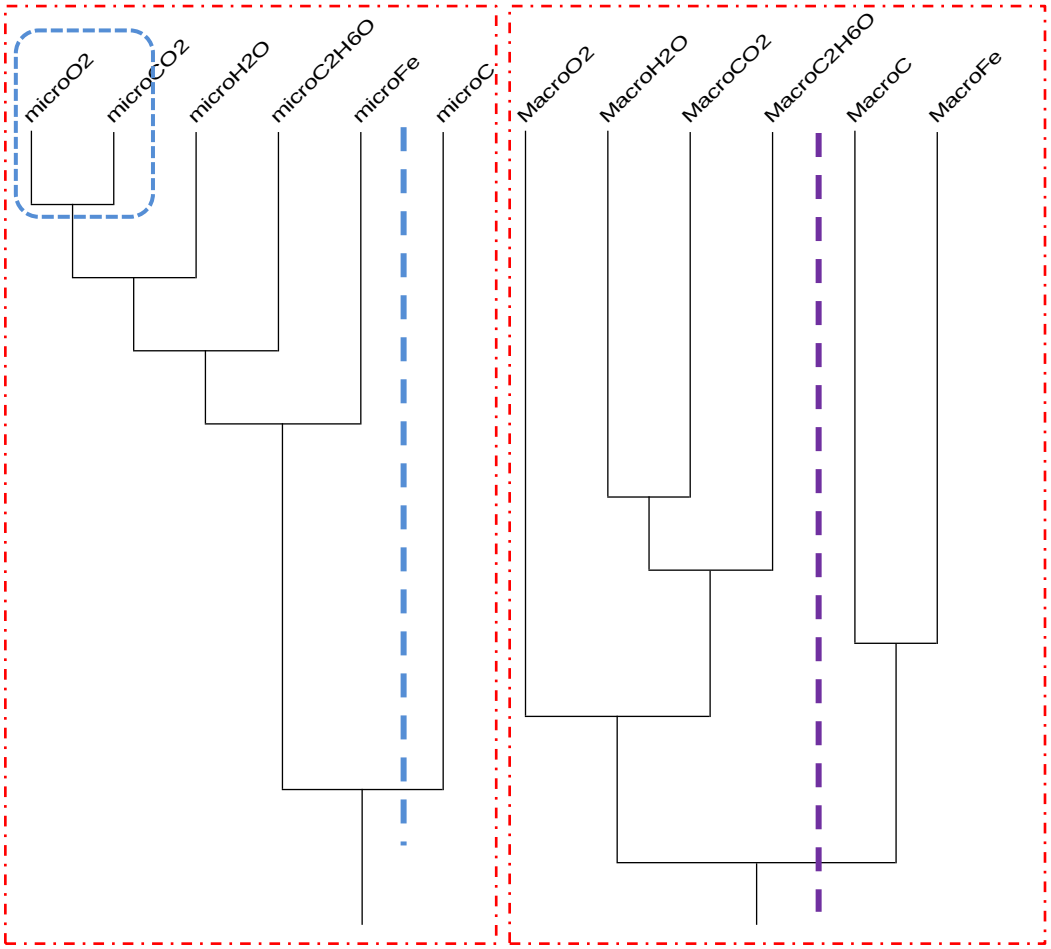


Figure 38 Arbre de similarité des réponses correctes pour les formules, critères Macro et critères micro, tous niveaux d'étude confondus (603 réponses)

Mais l'observation la plus frappante est l'obtention de deux classes totalement distinctes repérées par les cadres pointillés rouges (Figure 37 et Figure 38). Statistiquement les élèves qui choisissent un critère microscopique correct pour les noms ou les formules sont différents des élèves qui choisissent un critère macroscopique correct respectivement pour les noms ou les formules.

3.2.1.2 Discussion

Très peu d'élèves ou d'étudiants sont capables d'associer correctement à des noms ou des formules chimiques les critères corps pur, mélange, atome ou molécule. Le fait de répondre correctement à un nom ou à une formule ne semble pas garantir une réponse correcte pour un autre nom ou une autre formule. À partir des arbres de similarité, nous constatons que statistiquement les élèves qui répondent correctement aux critères microscopiques ne sont pas les mêmes que ceux qui répondent correctement aux critères macroscopiques. Cela permet d'expliquer le très faible taux de réponses correctes obtenu (Tableau 4).

- Pour les formules, côté microscopique nous observons les similarités les plus importantes entre O_2, CO_2, H_2O et C_2H_6O. Nous pensons que ce groupe d'élèves appliquent la règle : une molécule correspond à plusieurs atomes. Côté macroscopique, nous observons également une similarité pour les trois formules : CO_2, H_2O et C_2H_6O. Un élève capable de répondre « corps pur » pour une de ces trois formules est capable de reproduire la réponse aux deux autres. Nous pouvons alors supposer qu'il s'agit d'un groupe ayant assimilé la différence entre corps composé et mélange.

- Pour les noms, côté microscopique la plus grande similarité est obtenue avec dioxyde de carbone et dioxygène (Figure 37) dont la syntaxe est assez proche, ce qui n'est pas le cas des autres noms proposés dans la question. Coté macroscopique, il semblerait qu'il y ait une même unité de réponse correcte pour charbon et pétrole et que la réponse correcte corps pur pour l'eau semble suivre une logique à part.

Les différentes observations réalisées à partir des arbres de similarité nous amènent à faire l'hypothèse que le nom ou la formule par leur syntaxe peuvent influencer le choix des élèves. Nous avons également l'impression qu'il y a pour les élèves deux catégories de composés :

- les noms du langage courant comme charbon, pétrole mais aussi eau ;

- les noms scientifiques réservés aux chimistes.

Les élèves n'attribueraient pas les mêmes caractéristiques en fonction de l'appartenance à l'un ou l'autre des groupes. Pour la suite de l'analyse, la différence observée entre les critères macroscopiques et les critères microscopiques nous amènent à évaluer séparément les résultats entre ces deux niveaux. Et pour mieux comprendre les choix des élèves, nous limitons l'étude aux quatre noms : eau, carbone, dioxygène, dioxyde de carbone et aux quatre formules (C, O_2, CO_2 et H_2O).

3.2.2 Les critères choisis pour les noms et les formules

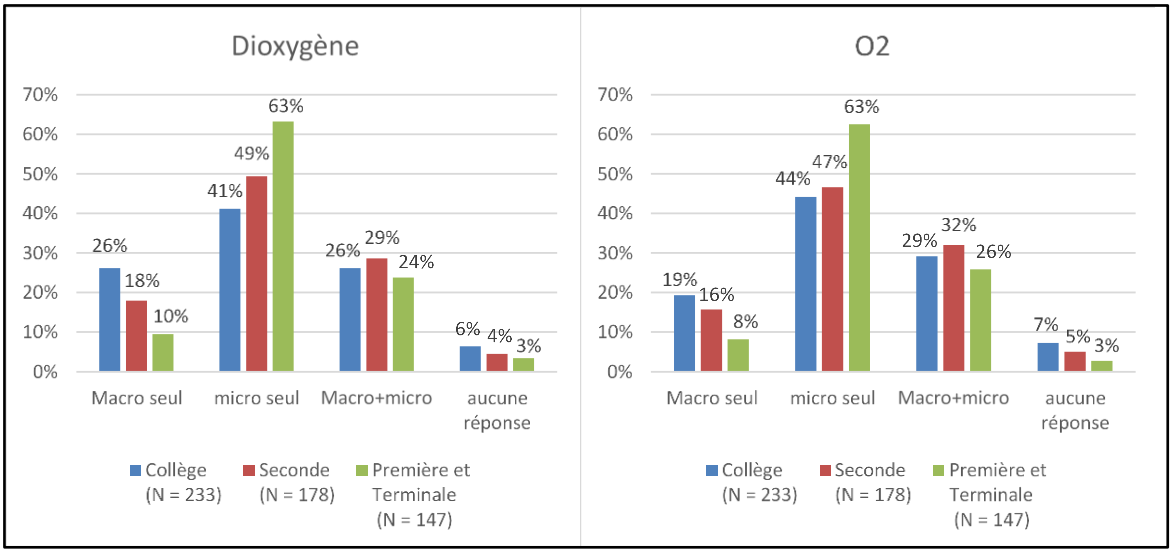
Nous allons tout d'abord examiner les critères que les élèves choisissent sans tenir compte de l'exactitude des réponses. Nous regardons si les élèves choisissent un critère d'un seul niveau, soit macroscopique soit microscopique, ou un critère dans chaque niveau. Le pourcentage d'élèves qui choisissent deux critères dans le même niveau est quant à lui totalement négligeable (inférieur à 1% quel que soit le nom ou la formule). Nous n'en avons donc pas tenu compte.

3.2.2.1 Résultats

Nous établissons trois catégories à partir des réponses des élèves :

- « Macro seul » correspondant à ceux qui sélectionnent uniquement un critère macroscopique ;
- « micro seul » correspondant à ceux qui sélectionnent uniquement un critère microscopique ;
- « Macro + micro » correspondant à ceux qui sélectionnent à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique.

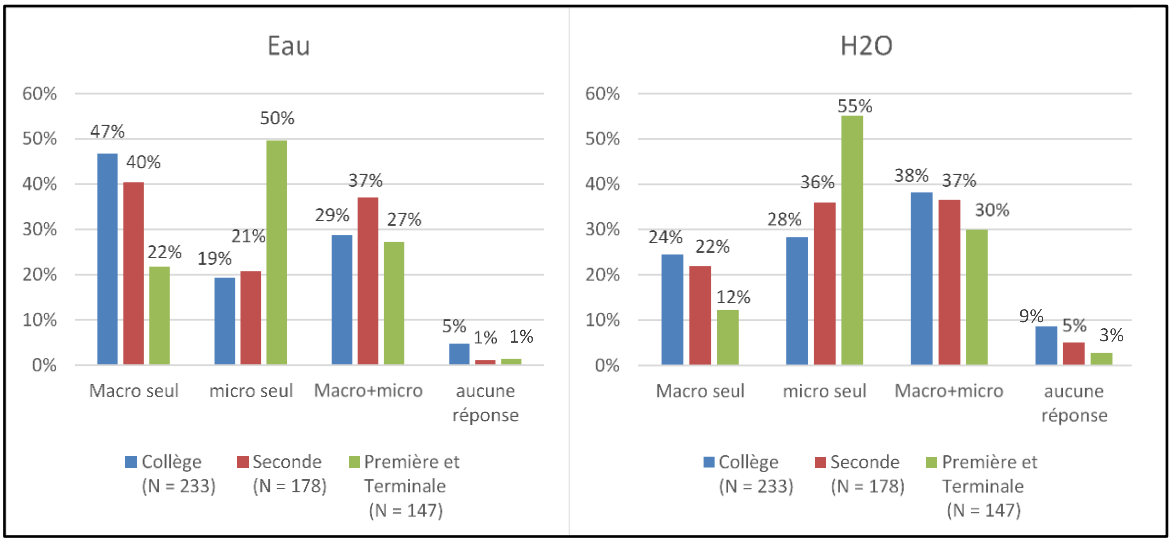
Les résultats pour le dioxygène, nom et formule, sont regroupés ci-dessous (Graphique 3).



Graphique 3 Critères macroscopiques ou microscopiques choisis par les élèves pour le dioxygène (nom ou formule)

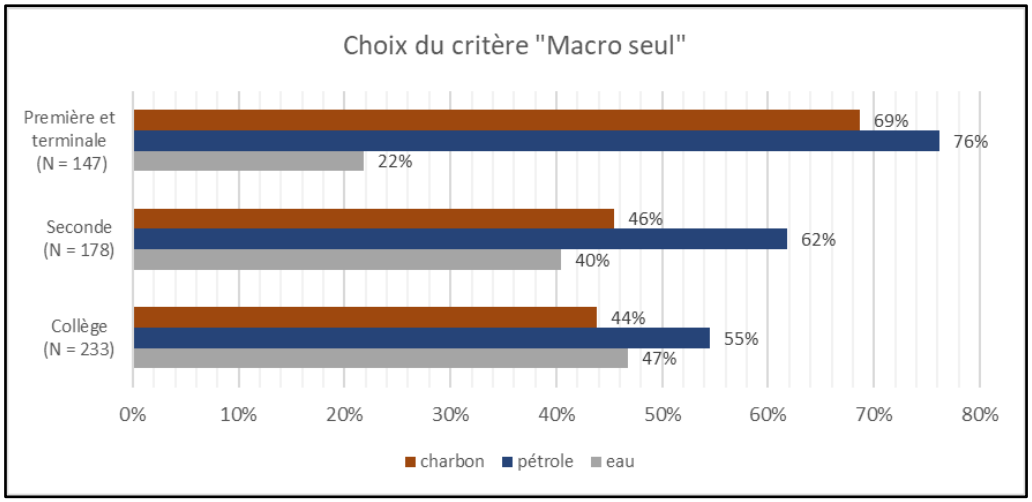
Nous observons que moins d'un tiers des élèves sélectionnent à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique (« Macro + micro » - Graphique 3). Il n'y a aucune évolution significative avec le niveau scolaire. La majorité choisit un critère microscopique seul (« micro seul » Graphique 3). Ce choix augmente avec le niveau scolaire pour arriver à 63% dans le groupe « Première-Terminale », nom ou formule (Graphique 3). Au contraire, le pourcentage d'étudiants qui choisissent uniquement un critère macroscopique (« Macro seul » - Graphique 3) diminue avec le niveau scolaire pour arriver à 10% pour le nom ou 8% pour la formule. Le profil du graphique est identique pour le nom et la formule. Nous obtenons des résultats totalement similaires pour le carbone et le dioxyde de carbone, nom et formule (Annexe 5.2) et pour l'eau dans le cas de la formule (Graphique 4). Mais pour le nom « eau », nous remarquons une différence significative avec les groupes « Collège » et « Seconde ». Les

élèves choisissent principalement le critère macroscopique seul (Graphique 4) : 47% pour le groupe « collège » et 40% pour le groupe « Seconde ».



Graphique 4 Critères macroscopiques ou microscopiques choisis par les élèves pour l'eau (nom ou formule)

Comme dans le cas des similarités pour les noms (Graphique 17), nous retrouvons à nouveau des résultats différents pour les critères macroscopiques dans le cas du nom « eau » par rapport aux noms « carbone », « dioxyde de carbone » et « dioxygène ». Nous avons déjà souligné l'ambiguïté du nom « eau », nom scientifique mais également terme du langage courant, qui pourrait justifier cette divergence de résultats avec la formule H_2O ainsi que les autres espèces chimiques. Nous avons donc décidé de comparer les pourcentages obtenus dans la catégorie « Macro seul » entre les noms : « eau », « pétrole » et « charbon » (Graphique 5).



Graphique 5 Comparaison par niveau scolaire des réponses d'élèves choisissant uniquement le critère macroscopique entre les noms « charbon, « pétrole » et « eau »

Nous observons des résultats tout à fait comparables dans les groupes « Collège » et « Seconde », et alors que les pourcentages augmentent encore en « Première et Terminale » pour le pétrole et pour le charbon, il diminue de moitié pour l'eau en passant de 40% en « Seconde » à 22% en « Première et Terminale » (Graphique 5).

3.2.2.2 Discussion

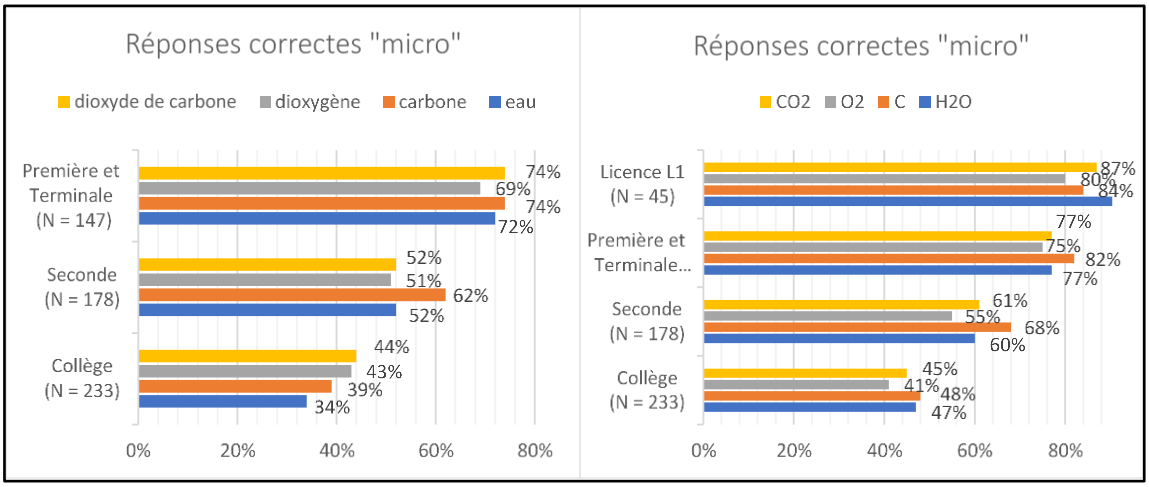
Seulement un tiers des élèves sont capables d'associer à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique aux noms et formules des espèces chimiques les plus courantes. Les élèves répondant correctement aux questions 2 et 3 sont parmi eux. Les élèves semblent donc avoir une vision majoritairement microscopique des noms et des formules. Nous nous attendions à ce résultat pour les élèves de collège à propos des formules. Celles-ci sont en effet introduites à partir des atomes et des molécules, et avec une interprétation essentiellement microscopique de la réaction chimique. Le lien avec l'espèce chimique n'est jamais explicite. Mais nous retrouvons également cette vision microscopique pour les noms alors que leur utilisation en collège est plutôt macroscopique. Enfin nous observons que ce phénomène augmente avec les années d'études. Pourtant, avec l'introduction de la mole et des bilans de matière dès la seconde, l'équation en lycée est bien une représentation macroscopique de la réaction chimique. Le choix des critères macroscopiques aurait dû augmenter. Nous pourrions penser que cette préférence pour les critères microscopiques provient d'une mauvaise maîtrise des concepts de corps pur et de mélange. Mais en analysant les réponses pour « charbon » et « pétrole », les élèves choisissent majoritairement le critère macroscopique seul et ce choix augmente avec les années d'études. L'inversion des résultats que nous obtenons pour le nom « eau », résultats proches du charbon et du pétrole en collège et seconde puis semblables à ceux des autres espèces chimiques en première et terminale, nous amène à penser que, dès qu'un composé est étudié en cours de chimie, le critère pertinent à y associer est d'abord microscopique. Mais pour un composé de la vie de tous les jours et non rattaché au cours de chimie, l'interprétation peut alors être macroscopique. Faut-il alors penser que l'enseignement en France incite les élèves à penser que la science chimique est nécessairement microscopique ?

3.2.3 Les réponses correctes pour chaque niveau : macroscopique ou microscopique

Nous étudions maintenant l'exactitude des réponses des élèves séparément pour les critères microscopiques et pour les critères macroscopiques.

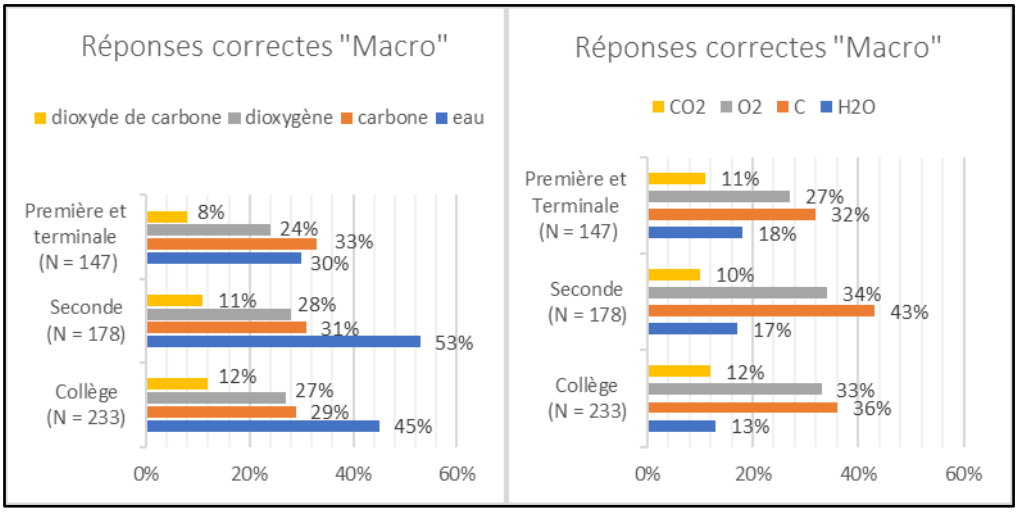
3.2.3.1 Résultats

Nous comparons pour les noms et les formules les réponses exactes obtenues aux critères microscopiques (Graphique 6) et aux critères macroscopiques (Graphique 7).



Graphique 6 Comparaison des réponses correctes aux critères microscopiques entre les quatre noms et entre les quatre formules

Les pourcentages de réponses correctes pour les critères microscopiques (Graphique 6) sont similaires pour les quatre espèces chimiques et augmentent avec le niveau d'étude, que ce soit pour le nom ou pour la formule et correspondent aux trois quarts des élèves interrogés en première et terminale.



Graphique 7 Comparaison des réponses correctes aux critères macroscopiques entre les quatre noms et entre les quatre formules

Au contraire, les pourcentages de réponses correctes portant sur le critère macroscopique (Graphique 7) diminuent du collège à la fin du lycée, pour le nom et la formule, et sont toujours inférieurs à ceux portant sur les critères microscopiques, sauf pour le nom « eau » en collège et seconde qui sont bien supérieurs aux trois autres espèces. De plus, ils varient du simple au quadruple selon les espèces chimiques. Par exemple dans les réponses à partir des noms (Graphique 7), 11% des élèves de seconde répondent correctement pour le dioxyde de carbone, 28% pour le dioxygène, 31% pour le carbone et 53% pour l'eau.

Nous avons testé l'effet du niveau scolaire sur le pourcentage de réponses correctes à l'aide du test exact de Fisher. Nous l'avons appliqué au groupe « Collège » et au groupe « Première et Terminale ». Nous avons comptabilisé les élèves qui ont plus de 50% de réponses correctes pour tous les produits chimiques soit aux critères macroscopiques soit aux critères microscopiques. Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Avec les noms :

- concernant les critères macroscopiques, **Khi2 = 0,267** et **p-valeur = 0,605 > 0,05**. L'hypothèse d'indépendance est vraie au risque 5%. Le niveau scolaire n'a pas d'influence sur les réponses correctes pour les critères macroscopiques.

- concernant les critères microscopiques, **Khi2 = 54,1** et **p-valeur = 1,87 E-13 < 0,05**. Contrairement aux critères macroscopiques, les résultats pour les critères microscopiques augmentent bien en lien avec le niveau scolaire.

- Avec les formules :

- concernant les critères macroscopiques, **Khi2 = 3,25** et **p-valeur = 0,0715 > 0,05**.

- concernant les critères microscopiques, **Khi2= 49,5** et **p-valeur = 1,94 E-12 < 0,05**.

Nous aboutissons aux mêmes conclusions qu'avec les noms.

Les résultats les plus faibles sur les critères macroscopiques (Graphique 8) sont obtenus pour « dioxyde de carbone » et « CO_2 ». Pour essayer d'interpréter ce résultat avec les noms, nous avons comparé (Tableau 5) pour « dioxyde de carbone » et « dioxygène » les pourcentages d'élèves qui ont choisi le critère « corps pur », le critère « mélange » et ceux qui n'ont pas répondu.

Tableau 5 Comparaison des critères macroscopiques choisis par les élèves entre « dioxygène » et « dioxyde de carbone »

Critères choisis / Groupe d'élèves	dioxygène			dioxyde de carbone		
	corps pur	mélange	pas de réponse	corps pur	mélange	pas de réponse
Collège (N = 233)	27%	25%	46%	12%	42%	46%
Seconde (N = 178)	28%	18%	54%	11%	39%	50%
Première et Terminale (N = 147)	24%	10%	66%	8%	29%	83%

L'absence de réponses l'emporte mais, lorsque les élèves choisissent un critère, ils prennent préférentiellement « mélange » pour le dioxyde de carbone et « corps pur » pour le dioxygène.

Dans le cas des formules, nous avons remarqué que les pourcentages de réponses correctes sont très faibles surtout quand la formule est composée d'atomes différents. Les pourcentages de réponses correctes dans le groupe « Seconde » (Graphique 7) sont 10% et 17% respectivement pour CO_2 et H_2O et 34% et 43% respectivement pour O_2 et C.

3.2.3.2 Discussion

Les réponses correctes pour les critères microscopiques dans le cas des formules et des noms augmentent avec les années d'études alors que les réponses correctes pour les critères macroscopiques n'évoluent pas. Cela semble confirmer l'idée déjà avancée que l'enseignement de la chimie dans le système scolaire français pourrait être une des causes des résultats obtenus côté macroscopique. Nous remarquons à nouveau que nous obtenons, pour le nom « eau », des pourcentages de réponses correctes aux critères macroscopiques très nettement supérieurs aux autres noms à consonance plus « scientifique ».

Enfin, les résultats les plus faibles obtenus pour le dioxyde de carbone dans les critères macroscopiques peuvent sans doute s'expliquer en partie par le nom du composé qui peut se diviser en deux parties (dioxyde et carbone). Nous observons le même problème avec les formules contenant des atomes différents (H_2O et CO_2). Ces résultats peuvent sans doute en partie s'expliquer à partir du malentendu entre corps simple et corps pur, ou corps composé et mélange, déjà signalé dans de nombreuses recherches (Fillon, 1997 ; Kind, 2004 ; Sanger, 2000 ; Solomonidou & Stavridou, 1994 ; Stains & Talanquer, 2007). Les élèves qui choisissent mélange pour CO_2 et H_2O restreignent la notion de corps pur aux seuls corps simples. Ils peuvent également avoir une vision additive du corps composé (Ben-Zvi, Eylon & Silberstein,

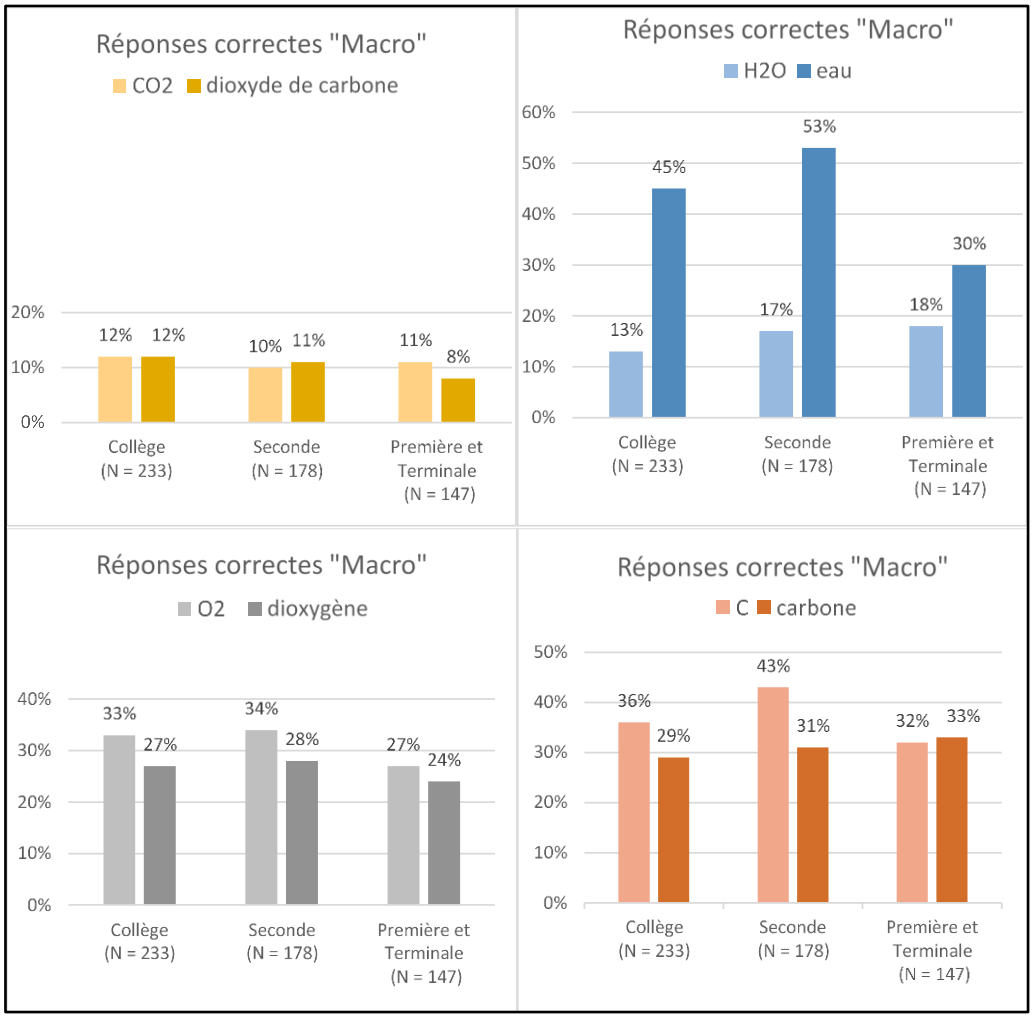
1987). CO_2 est alors compris comme du carbone plus du dioxygène, ce qui peut aussi amener un élève à sélectionner le critère mélange. Mais cela n'explique pas malgré tout le faible taux de bonnes réponses obtenu pour « carbone » ou « dioxygène », respectivement moins de 31% et de 28%, puis pour « C » et « O_2 » respectivement moins de 43% et 34% (Graphique 7).

3.2.4 Comparaison nom et formule

Nous terminons l'exploitation de ces deux questions par la comparaison nom/formule pour une même espèce chimique (eau, carbone, dioxygène, dioxyde de carbone et H_2O, C, O_2, CO_2).

3.2.4.1 Résultats

Nous avons regroupé les réponses apportées sur les critères macroscopiques dans le Graphique 8 ci-dessous.



Graphique 8 Comparaison des réponses correctes aux critères macroscopiques entre le nom et la formule pour les quatre espèces chimiques

Nous obtenons les mêmes résultats entre « CO_2 » et « dioxyde de carbone » (Graphique 8). Nous observons les différences les plus importantes entre « H_2O » et « eau » (Graphique 8) avec trois fois plus de réponses correctes pour le nom dans le groupe « collège » et dans le groupe « seconde ». Entre « C » et « carbone » et « O_2 » et « dioxygène » (Graphique 8), les pourcentages obtenus sont un peu meilleurs avec les formules. Nous avons examiné si cette différence est significative en appliquant un test de Mc Nemar. Celui-ci porte sur deux séries de mesures binomiales effectuées à partir des mêmes sujets. Ce test est basé sur le décompte des sujets ayant changé leur réponse entre les deux séries de mesures. Dans le cadre de l'étude, nous avons pour chaque série de mesures (collège, seconde, première et terminale), les réponses exactes ou fausses dans le cas des noms et dans le cas des formules pour les critères macroscopique et microscopique. Nous voulons vérifier s'il existe un changement de réponse significatif entre les formules et les noms pour chaque critère et pour chaque espèce. Pour cela, nous comparons l'effectif qui est passé d'une réponse correcte à une réponse fausse à celui qui est passé d'une réponse fausse à une réponse correcte. L'hypothèse nulle testée est que ces deux sous-populations se compensent peu ou prou. À partir d'un tableau de contingence, on mesure avec la distance du Khi2 l'écart entre les effectifs qui changent leurs réponses. Nous avons rassemblé les mesures en Annexe 5.3. Le test nous permet de conclure que :

- les résultats sont statistiquement meilleurs dans le cas de l'eau avec le nom quel que soit le niveau scolaire et dans le cas du carbone avec la formule dans les groupes « Collège » et « Seconde » (les p-valeurs sont inférieures à 0,05) ;
- les résultats sont statistiquement identiques entre les formules et les noms dans le cas du dioxygène et du dioxyde de carbone quel que soit le niveau scolaire (les p-valeurs sont supérieures à 0,05).

Nous avons également comparé les réponses apportées sur les critères microscopiques aux noms et formules (eau, carbone, dioxygène, dioxyde de carbone et H_2O, C, O_2, CO_2) qui correspondent à la même espèce chimique (Annexe 5.4). Quel que soit le niveau scolaire et les espèces chimiques, les élèves ont donné de meilleures réponses pour les formules. Mais cette différence est statistiquement significative uniquement pour l'eau et le carbone dans le groupe « Collège » (tests de Mc Nemar – Annexe 5.5).

3.2.4.2 Discussion

Selon les résultats ci-dessus, nous observons :

- qu'il n'y a aucune différence entre les formules et les noms dans le cas du dioxygène et du dioxyde de carbone. Nous pensons que la syntaxe de ces deux noms peut jouer un rôle en apportant des indications sur la composition de la molécule ;
- qu'il y a une différence significative, pour les élèves qui débutent en chimie, dans les résultats obtenus entre les formules, « C » et « H_2O », et les noms, respectivement « carbone » et « eau ». Or, dans ces deux exemples, la syntaxe du nom ne donne aucune indication pour la formule ;
- des résultats différents pour le nom « eau ». Mais ce dernier est avant tout un terme du langage courant pour les élèves qui débutent en chimie. Nous pensons que cela permet d'expliquer les résultats obtenus différents des autres espèces chimiques de la liste.

La formule semble aider les élèves dans le groupe « collège » à répondre correctement pour les critères microscopiques mais semble également induire un pourcentage d'erreurs plus important dans les critères macroscopiques (eau et H_2O).

3.2.5 Bilan questions 2 et 3

Plus des trois quarts des élèves et étudiants testés se trompent quand ils choisissent des critères parmi les quatre proposés (corps pur, mélange, atomes et molécules) et cela que ce soit pour le nom ou la formule. Nous avons observé ceci même pour les espèces chimiques aussi communes que l'eau, le carbone, le dioxygène et le dioxyde de carbone. Le faible pourcentage de réponses complètement exact peut s'expliquer comme suit.

- Les groupes d'élèves ou d'étudiants qui donnent la bonne réponse pour les critères macroscopiques ne sont pas les mêmes que ceux qui donnent la bonne réponse pour les critères microscopiques.
- Moins d'un tiers des élèves du secondaire sélectionnent à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique. Plus le nombre d'années d'études de la chimie augmente, plus les élèves semblent avoir eu une vision microscopique du nom ou de formule (correctes ou non).
- Pour les critères macroscopiques, moins d'un quart des élèves du groupe « Première et Terminale » répondent correctement. Aucune amélioration notable avec le niveau

scolaire n'est observée. Les élèves ne semblent pas maîtriser les concepts de corps pur et mélange. Nous constatons beaucoup moins de difficultés avec les critères microscopiques où plus de 70% du même groupe d'élèves sont en mesure de donner des réponses correctes pour les noms et les formules et le nombre de réponses correctes s'améliore avec le nombre d'années d'études.

- Certaines stratégies de réponses montrent que la syntaxe du nom ou la composition atomique peut faciliter le choix entre atome ou molécule mais peut aussi constituer une source d'erreur pour choisir entre corps pur et mélange. Cela révèle une confusion entre ces deux concepts qui ne sont pas maîtrisés, et confirme un résultat obtenu lors de la présentation de schémas particulaires (Stains & Talanquer, 2007).

Les résultats semblent cohérents avec des programmes qui introduisent les formules uniquement sur des critères microscopiques et qui ne proposent aucun travail à partir des noms. Le fait que peu d'élèves choisissent à la fois un critère macroscopique et un critère microscopique pour caractériser un nom ou une formule semble indiquer que le langage symbolique ne joue pas pour une majorité d'élèves le rôle de pont entre le macroscopique et le microscopique (Taber, 2013).

3.3 Questions 4 et 6

Pour mémoire, en demandant aux élèves de décoder des formules chimiques, nous voulons vérifier dans la question 4 (Annexe 3) leur maîtrise du concept de molécule en tant qu'entité composée d'atomes donnés en nombre fixe et déterminé.

3.3.1 Résultats question 4

Nous avons demandé d'indiquer si les formules correspondent ou non à différentes molécules pour les trois couples suivants : H_2O et H_2O_2, O et O_2, CH_4 et C_2H_8 (Annexe 3). Pour chaque couple, nous avons recopié le pourcentage d'élèves ou d'étudiants qui ont répondu que les formules ne correspondent pas à la même molécule, ce qui est la réponse correcte à la question (Tableau 6).

Tableau 6 Pourcentage de réponses par groupe indiquant que les formules ne correspondent pas à la même molécule dans chaque couple

Couples de formules Groupe d'élèves ou d'étudiants	Réponse : les deux formules ne correspondent pas à la même molécule			
	H_2O et H_2O_2	O et O_2	CH_4 et C_2H_8	Pour les trois couples
Collège (N = 233)	57%	48%	43%	21%
Seconde (N = 178)	85%	70%	56%	42%
Première et Terminale (N = 147)	87%	77%	58%	50%
Licence (N = 45)	98%	76%	67%	53%
Ensemble des élèves et étudiants (N= 603)	76%	64%	52%	37%

Dans le premier exemple à partir des formules H_2O et H_2O_2 (Tableau 6), 85% des élèves du groupe « Seconde » ont été en mesure de répondre correctement mais seulement 56% considèrent que les formules CH_4 et C_2H_8 ne correspondent pas à la même molécule. Dans chaque groupe, un quart des élèves ou étudiants déclarent que CH_4 et C_2H_8 sont identiques et les autres ne répondent pas (Annexe 5.6). Environ la moitié des élèves et des étudiants interrogés qui indiquent que ces deux formules sont identiques justifient leur réponse. « C_2H_8 égal deux fois CH_4 » est l'argument majoritairement utilisé par les élèves (Annexe 5.6).

« C_2H_8 est une molécule de CH_4 avec un coefficient stœchiométrique de 2 » (groupe Première et Terminale)

« C_2H_8 c'est deux fois CH_4 » (groupe Licence)

Près d'un quart des étudiants du groupe « Licence » (Tableau 6) ne savent toujours pas la différence entre l'atome représenté par O et la molécule représentée par O_2 comme on peut le vérifier dans la justification ci-dessous.

« Si on divise par 2 O_2, on obtient O » (groupe Licence)

Et enfin, seulement 37% de l'ensemble des élèves et étudiants (Tableau 6) ont su répondre correctement pour les trois couples (21% groupe Collège, 42% groupe Seconde, 50% groupe « Première et Terminale » et 53% groupe Licence).

3.3.2 Résultats question 6

Pour mémoire, nous avons demandé dans cette question aux élèves et aux étudiants d'indiquer parmi deux couples d'équations chimiques celles qui sont correctes (Annexe 5.6). Nous avons mesuré le pourcentage d'élèves et d'étudiants qui ont répondu que les équations

chimiques contenant les mauvaises formules chimiques O et H_4O_2 étaient incorrectes (Tableau 7).

Tableau 7 Réponses correctes données aux équations contenant la formule chimique erronée

Réponses correctes Groupe d'élèves ou d'étudiants	« non » à l'équation contenant « O »	« non » à l'équation contenant « H_4O_2»	« non » aux deux équations incorrectes
Collège (N = 233)	15%	23%	7%
Seconde (N = 178)	13%	22%	6%
Première et Terminale (N = 147)	45%	39%	29%
Licence (N = 45)	67%	80%	58%

Les pourcentages obtenus pour les élèves de collège et de seconde sont très faibles avec au mieux un peu moins d'un quart de réponses correctes pour la formule H_4O_2 (Tableau 7). Mais même en première et terminale scientifique (Tableau 7), pour des équations que nous pouvons juger triviales, moins de la moitié des élèves sont capables de répondre correctement. Et quand on regroupe les réponses aux deux équations (Tableau 7), moins de 30% des élèves issus classes scientifiques répondent correctement (29%) et à peine un peu plus de la moitié des étudiants de licence (58%). En reprenant les explications données par l'ensemble des élèves et étudiants, nous constatons que moins de 11% sont capables de donner une justification correcte (Annexe 5.6). Au final, ils sont seulement 7% capables de répondre correctement aux deux équations chimiques tout en expliquant clairement que les formules O et H_4O_2 sont incorrectes.

Parmi les élèves ou les étudiants qui se trompent, nous avons repéré trois profils :

- ceux qui considèrent correctes les deux équations comportant la formule chimique fausse. Cela semble correspondre à une vision proportionnelle de la formule chimique. Ils sont 29% (Tableau 8) ;
- ceux qui considèrent que H_4O_2 est une formule fausse et que O_2 est une formule correcte. Cela semble correspondre à une vision additive des formules chimiques provenant de l'équation chimique : $O+H_2 = H_2O$. Ils sont 39% (Tableau 8) ;
- ceux qui considèrent les quatre équations correctes. Ils ont une interprétation uniquement arithmétique des équations. Ce groupe est peu nombreux avec seulement 3% des élèves concernés (Tableau 8).

Tableau 8 Profils d'élèves et d'étudiants dans leur interprétation des formules chimiques ou des équations chimiques

Réponses Groupe d'élèves ou d'étudiants	les deux équations incorrectes sont justes	équation avec H_4O_2 fausse et celle avec O juste	Les quatre équations sont correctes
Collège (N = 233)	29%	47%	1%
Seconde (N = 178)	40%	50%	4%
Première et Terminale (N = 147)	22%	19%	5%
Licence (N = 45)	7%	13%	4%
Ensemble des élèves et étudiants	29%	39%	3%

3.3.3 Résultats croisés questions 4 et 6

Nous vérifions maintenant si les élèves qui semblent avoir une vision correcte des formules chimiques sorties de tout contexte ont stabilisé leurs connaissances dans le contexte d'une équation chimique. Nous vérifions donc que ceux qui répondent correctement à la question 4 continuent de le faire dans la question 6.

3.3.3.1 Comparaison des réponses pour O et O_2 (question 4) et pour l'équation contenant O (question 5)

Nous avons sélectionné les élèves et étudiants répondant que les formules O_2 et O ne correspondent pas à la même molécule. Ils sont 110 dans groupe « Collège », 124 dans le groupe « Seconde », 113 dans le groupe « Première et Terminale » et 28 dans le groupe licence. Parmi eux, nous regardons ceux qui répondent que l'équation contenant O est incorrecte (Tableau 9).

Tableau 9 Réponses correctes à l'équation contenant la formule chimique O parmi les étudiants qui considèrent que O et O2 sont différentes

La réponse correcte Groupe d'élèves ou d'étudiants qui répondent correctement à O /O_2	« non » à l'équation avec « O »	« non » à l'équation avec « O » et avec justification
Collège (N = 233)	9%	3%
Seconde (N = 178)	13%	6%
Première et Terminale (N = 147)	52%	22%
Licence (N = 45)	71%	68%

Les connaissances des élèves de collège et de seconde sur les formules chimiques ne sont pas stabilisées. Ils sont en effet très peu qui éliminent l'équation avec O. ils sont en effet

seulement 9% dans le groupe Collège et 13% dans le groupe Seconde (Tableau 9) et encore moins sont en mesure de l'expliquer. Les réponses aux questions 4 et 6 semblent compatibles uniquement pour les étudiants avec 71% (Tableau 9).

3.3.3.2 Comparaison des réponses entre CH_4 et C_2H_8 et sur l'équation contenant H_4O_2

Nous avons cette fois sélectionné les élèves et étudiants répondant que les formules C_2H_8 et formules CH_4 ne correspondent pas à la même molécule. Ils sont 100 dans le groupe « Collège », 100 dans le groupe « Seconde », 85 dans le groupe « Première et Terminale » et 30 dans le groupe « Licence ». Parmi eux, nous regardons ceux qui répondent que l'équation contenant H_4O_2 est incorrecte (Annexe 5.6) et nous obtenons des résultats assez comparables avec la situation antérieure (Tableau 9).

3.3.3.3 Comparaison de l'ensemble des réponses correctes entre les questions 4 et 6

Enfin, nous avons sélectionné les élèves qui répondent correctement aux trois couples de formules : 45 en collège, 75 en seconde, 74 en première et terminale et 24 en licence. Ils sont 25%, parmi les 221 étudiants qui répondent correctement en rejetant les deux équations incorrectes de la question 6 (Annexe 5.6).

3.3.4 Bilan questions 4 et 6

Nos résultats ne diffèrent pas de ceux qui ont pu déjà être observés dans les travaux de recherche (Ben-Zvi, Eylon & Silberstein, 1987 ; Keig & Rubba, 1993; Roletto & Piacenza, 1994 ; Sanger, 2005). Le concept de molécule, entité constituée d'atomes donnés dans un nombre fixe et déterminé, ne semble pas maîtrisé par 40% des élèves en fin de cycle secondaire. Et quand les élèves doivent appliquer ce concept dans le cadre d'une équation chimique, plus de la moitié des élèves des classes de première et de terminale scientifiques ne semblent pas maîtriser la différence entre O et O_2 en étant capables de reproduire cela au sein d'une équation chimique. Moins de 10% de l'ensemble des élèves interrogés sont capables d'indiquer dans les équations qu'O n'est pas du dioxygène et qu'H_4O_2 n'est pas de l'eau.

Que ce soit dans les programmes de collège ou dans les ouvrages scolaires, le travail exigé sur la formule chimique ne semble porter que sur l'aspect technique codage et décodage. Les élèves doivent être capables de reconnaître et compter des atomes ou d'écrire une formule à partir de la composition de la molécule. Mais ce travail ne peut garantir la compréhension de la formule en lien avec le concept de molécule. Ces résultats nous incitent à nouveau à penser

qu'il serait nécessaire de travailler différemment dans l'enseignement français l'élaboration des formules chimiques en collège.

3.4 Question 5

Dans la question 5 (Annexe 3), nous cherchons les règles que les élèves appliquent quand ils lisent une formule brute. Nous leur avons donc proposé plusieurs possibilités pour la formule de l'eau et la formule de l'éthanol.

3.4.1 Résultats

Nous avons indiqué le détail des réponses pour l'eau et pour l'éthanol dans deux graphiques (Annexe 5.7). Nous avons regroupé dans le Tableau 10 les pourcentages d'élèves qui donnent l'ensemble des réponses correctes dans chaque situation (eau et éthanol) puis pour les deux situations.

Tableau 10 : Pourcentage de réponses correctes sur l'ensemble, pour l'eau et pour l'éthanol.

Réponses Groupe d'élèves ou d'étudiants	Ensemble des réponses correctes pour l'eau	Ensemble des réponses correctes pour l'éthanol	Ensemble des réponses correctes
Collège (N = 233)	8%	9%	5%
Seconde (N = 178)	17%	25%	13%
Première et Terminale (N = 147)	24%	31%	12%
Licence (N = 45)	38%	42%	27%

Nous nous attendions à des résultats faibles pour le collège et éventuellement la seconde mais nous pensions cette question maîtrisée en classes scientifiques de fin de lycée. Nous obtenons des résultats (Tableau 10) extrêmement faibles pour l'ensemble des groupes avec même en licence plus de la moitié des étudiants qui ne considèrent pas correctes les formules proposées ou qui ne répondent pas. Nous avons rassemblé les graphiques avec le détail des réponses pour chaque formule (Annexe 5.6).

Nous avons relevé diverses explications données par les élèves :

- ceux qui ont appris les formules sous cette forme et qui n'acceptent pas les autres propositions ;

« il n'y a qu'une seule formule possible » (groupe Collège)

« car je sais que l'eau c'est H2O » (groupe Première et Terminale)

- ceux pour qui les formules proposées, notamment HOH et C_2H_5OH, ne correspondent pas à des formules brutes car les atomes identiques ne sont pas regroupés.

« car tous les atomes d'hydrogène ne sont pas regroupés » (groupe Collège)
« la première est bonne la deuxième aussi sauf l'ordre. La troisième n'est pas une formule brute. » (groupe Première et Terminale)

- ceux pour qui l'ordre des lettres est important. Les formules proposées ne semblent pas suivre les règles données par les enseignants. Nous relevons différents exemples dans les réponses des élèves ;

« l'ordre des atomes est C puis H puis O puis N puis autre » (groupe Première et Terminale)
« les atomes sont classés dans l'ordre de l'alphabet » (groupe Collège)

- ceux qui confondent formule brute et formule développée ;

« car on lit une molécule selon la façon dont les atomes sont liés » (groupe Première et Terminale)
« si on ne suit pas l'emplacement des atomes dans la molécule cela peut changer la molécule » (groupe Première et Terminale)

- ceux capables de changer leurs règles en fonction de la formule. Parmi les 54 élèves de première ou terminale qui acceptent la réponse C_2H_5OH, ils sont 33 à refuser HOH comme formule correcte car celle-ci n'est pas une formule brute ou ne suit pas la règle de l'ordre des atomes.

Réponse d'un élève de terminale pour l'eau puis pour l'éthanol :
« on regroupe les mêmes atomes et on les met dans l'ordre alphabétique »
« C_2H_5OH met en évidence le groupe hydroxyde de la molécule »
Réponse d'un élève de terminale pour l'eau puis pour l'éthanol :
« H_2O est la bonne formule car on met toujours C puis H puis O »
« la deuxième permet de mettre plus facilement le groupe caractéristique mais l'autre molécule est aussi possible »

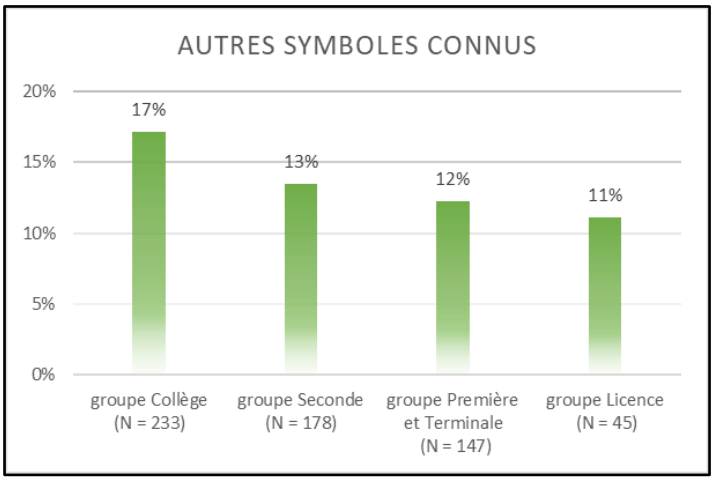
3.4.2 Discussion

Nous n'aurions sans doute pas dû préciser dans la question explicitement le terme formule « brute » mais simplement écrire « formules » ou « formules chimiques ». Les élèves ou étudiants associent sans doute des règles un peu plus strictes pour une formule dite « brute ». Mais cela ne suffit sans doute pas à expliquer la faiblesse des résultats obtenus en fin de lycée

ou licence, ce qui était assez inattendu. La diversité des règles proposées par les élèves et leur application, parfois mêmes contradictoires, semblent indiquer que ce travail sur les formules brutes est peu pris en charge dans l'enseignement. Le langage utilisé par le chimiste doit avoir une certaine souplesse pour permettre de communiquer le plus grand nombre d'informations possibles sur l'objet qu'il veut représenter. Cette souplesse est possible tant qu'elle ne crée pas d'ambiguïté pour la molécule représentée. Les chimistes savent exploiter les différentes formes possibles des formules brutes pour communiquer. Utiliser ces différentes formes et apprendre cette souplesse devraient faire partie de l'apprentissage de la chimie. Les résultats à cette question semblent indiquer que cela n'est soit pas traité par les enseignants soit non assimilé par la très grande majorité des élèves.

3.5 Question 7

On demande dans cette dernière question aux élèves et étudiants si, à leur avis, les chimistes ont utilisé d'autres symboles que les lettres pour représenter les atomes (Annexe 3). Les réponses positives sont regroupées dans le Graphique 9 ci-dessous.



Graphique 9 Pourcentage d'élèves ou d'étudiants par niveau scolaire ayant connaissance de l'existence d'autres symboles que les lettres pour les atomes

Parmi les 603 élèves interrogés, seulement quatre élèves ont une proposition qui semble en lien avec d'anciens symboles utilisés dans l'histoire de la chimie, dont pour deux les symboles de Dalton.

Ce point ne semble absolument pas traité par les enseignants ou à peine au moment de l'introduction de l'atome et plus jamais ensuite, ce qui expliquerait la diminution observée des pourcentages du collège à la licence. Les élèves semblent totalement ignorer que le langage

de la chimie a évolué avec son développement. Proposer un travail autour de l'élaboration du langage en comparant les propositions qui sont apparues à travers l'histoire semble constituer une proposition innovante.

4. Les difficultés élèves : conclusion

Notre première question de recherche concernait les critères utilisés par les étudiants pour classer une liste de noms. La différence entre nom du langage scientifique et nom du langage courant est utilisée par les élèves et les étudiants pour classer les espèces chimiques et mélanges. Le critère le plus répandu de la classification est l'opposition entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique et ceux qui font ce choix associent systématiquement les noms scientifiques à l'échelle microscopique. En nous référant à Bruner cité par Barth, les résultats que nous obtenons sembleraient indiquer que les élèves ne sont pas capables de passer du signifiant au signifié, et donc ici des noms scientifiques à l'espèce chimique.

> *[…] l'acte de catégoriser émane de la capacité de l'homme à passer du signe au signifié.*
> *(citant Bruner, Barth, 2001, p. 48)*

Notre seconde question de recherche devait permettre de définir les critères du niveau macroscopique et du niveau microscopique que les élèves et les étudiants associent à différents noms et formules chimiques. Les élèves choisissent principalement des critères microscopiques (atome ou molécule) à la fois pour les formules et pour les noms du langage scientifique. Cela confirme les résultats de la première question. De plus, on observe que cette vision microscopique du nom ou de la formule chimique augmente avec le nombre d'années d'étude en chimie. Pour expliquer ces résultats, on pourrait rétorquer que, pour les élèves en fin d'études secondaires et les étudiants, seules les formules du type $Cl_2(g)$ ou $H_2O(l)$ sont associées aux espèces chimiques et donc aux critères macroscopiques. Mais les symboles des états de la matière associés aux formules, qui avaient été introduits dans les programmes des années 2000, n'apparaissent plus dans les programmes actuels. Et si l'association des critères uniquement microscopiques était due à l'absence de l'indication des états de la matière dans les formules du questionnaire, comment expliquer alors les résultats similaires pour les formules et les noms, et l'association des critères macroscopiques aux noms du langage courant ? Ce même phénomène avait déjà été repéré par Stains et Talanquer (2007). Nous

sommes assez loin d'une interprétation du langage symbolique en tant que méta-niveau (Canac & Kermen, 2016). De plus, si les réponses correctes augmentent pour les critères microscopiques avec le niveau des groupes, les critères corps pur et mélange ne semblent pas maîtrisés par les élèves quel que soit le niveau scolaire ni par les étudiants. Nous retrouvons dans les réponses incorrectes la confusion corps composé et mélange mais cela ne permet pas d'interpréter les résultats également très faibles obtenus pour les corps simples comme le carbone et le dioxygène. Les élèves semblent utiliser, à bon escient, ou pas, la syntaxe du nom pour choisir les critères quand elle fournit des indications sur la composition de la formule. Dans ce cas, les réponses sont en effet identiques à celles obtenues pour les formules. Des recherches avaient déjà relevé ce résultat, mais à partir des dessins de particules (Sanger, 2000 ; Stains & Talanquer, 2007) ou des formules chimiques (Fillon, 1997 ; Roletto & Piacenza, 1994). Nous pouvons supposer que les enseignants de collège font travailler les élèves sur le lien syntaxe du nom et composition chimique au moment de l'introduction des formules chimiques.

Pour la troisième question de recherche, nous avons constaté que les élèves jusqu'au niveau licence ont des difficultés à interpréter comme identiques des formules quand on change la place des lettres. Les élèves et étudiants semblent être dans une application rigide de règles qui peuvent changer en fonction des circonstances.

Notre quatrième question de recherche cherchait à déterminer si les élèves ou les étudiants sont en mesure de traiter le concept de molécule comme une combinaison déterminée d'atomes, hors contexte et dans le contexte d'une équation chimique. Nous avons constaté que les élèves ne maîtrisent pas l'utilisation de formules chimiques simples comme celles de dioxygène ou d'eau dans le contexte de l'équation chimique. Mais les difficultés existent même hors contexte de l'équation. Une partie des élèves partage une vision proportionnelle du nombre d'atomes constituant la molécule. Il semblerait donc que les élèves ne soient pas en mesure d'utiliser le concept de molécule comme une combinaison fixe et constante des atomes, ce qui confirme des résultats déjà observés (Al-Kunifed, Good & Wandersee, 1993 ; Ben-Zvi *et al*., 1987 ; Sanger, 2005).

Pour finir, il semblerait que les élèves et les étudiants n'aient aucune connaissance quant à l'élaboration historique du langage symbolique.

Les difficultés des élèves relevées dans ce questionnaire, et venant pour certaines confirmer des travaux de recherche déjà effectués dans d'autres pays, semblent indiquer la nécessité de donner une place plus importante à l'apprentissage du langage symbolique de la chimie et de travailler notamment :

- le langage symbolique de la chimie comme une représentation des espèces chimiques au niveau macroscopique et pas uniquement au niveau microscopique ;
- les notions de corps pur et mélange en lien avec les noms et les formules chimiques ;
- les notions de corps simples et corps composés en comparaison aux notions de corps pur et mélange.

Ce travail pourrait se faire dès l'introduction des formules de l'eau H_2O et du dioxyde de carbone CO_2 en classe de quatrième. Un travail également autour de la formule O_2 semble nécessaire pour différencier correctement corps simple et corps composé.

Chapitre 3 : Ce que disent et font les enseignants

Après l'analyse des contraintes institutionnelles (programmes et ouvrages scolaires) puis des difficultés des élèves face au langage symbolique de la chimie, nous avons cherché à approcher ce que font les enseignants lorsqu'ils introduisent pour la première fois le langage symbolique de la chimie. Au début de la recherche, nous avons contacté des enseignants de collège pour leur demander de faire passer le questionnaire à leurs élèves et éventuellement accepter de se faire filmer dans leur classe. Nous leur avons envoyé un questionnaire nous permettant d'avoir un premier aperçu de ce qu'ils proposent à leurs élèves pour le langage symbolique. Neuf enseignants ont répondu et deux parmi eux ont accepté d'être filmés en classe au moment de l'introduction des formules chimiques en quatrième. Nous présentons dans ce chapitre les réponses des enseignants à quatre questions qui font écho aux résultats du questionnaire élèves puis l'analyse des deux séances filmées.

1. Un questionnaire enseignant

Ce questionnaire (Annexe 6) devait nous permettre de prendre contact avec des enseignants de collège et leur montrer les objectifs de notre recherche. Nous présentons ici les réponses à trois questions. Deux apportent un éclairage à certaines réponses obtenues aux

questionnaires élèves : l'association du langage symbolique au niveau microscopique ou au niveau macroscopique, les règles données aux élèves pour les formules chimiques. La troisième montre les difficultés rencontrées par les enseignants par rapport au cadre institutionnel des programmes au moment de l'introduction du langage symbolique.

1.1 Présentation

Celui-ci a été envoyé par messagerie électronique à des enseignants de collège. Nous avons recueilli neuf réponses. Les enseignants sont issus de plusieurs régions en France et ont tous plus de dix ans d'ancienneté. Un se déclare plutôt physicien, trois plutôt chimistes et les autres ne pas avoir de préférence. L'analyse des résultats n'a pas de valeur statistique. Nous donnons ici les réponses à trois questions ouvertes. Pour présenter les résultats, chaque enseignant est désigné par la lettre C, pour Collège, et par un numéro. La première question doit nous permettre d'évaluer si les enseignants ont conscience que le langage symbolique peut à la fois décrire le niveau microscopique et le niveau macroscopique. Avec la deuxième question, nous cherchons à savoir si les enseignants proposent des règles à leurs élèves pour l'écriture des formules brutes. Dans la troisième question, nous demandons aux enseignants s'ils expliquent aux élèves la position des atomes dans les modèles moléculaires.

1.2 Résultats

1.2.1 À propos des niveaux macroscopique et microscopique

Dans la question 1.a (Annexe 6), les enseignants doivent critiquer un exercice extrait d'un ouvrage de quatrième. En 1.b (Annexe 6), nous leur rappelons les difficultés des élèves à se repérer entre le niveau macroscopique et le niveau microscopique. Nous leur demandons à nouveau de réagir à l'exercice proposé. En effet, celui-ci n'est pas suffisamment explicite pour faire la distinction entre ces deux niveaux. La formule CH_4 est notamment utilisée à la fois pour la molécule et pour le gaz mais sans que cela ne soit précisé.

Deux enseignants, C2 et C7, semblent avoir tout de suite repéré le problème des représentations utilisées par l'exercice mais ils ont peut-être lu la question b avant de répondre à la question a.

C2 propose une reformulation plus rigoureuse de la première question de l'exercice.

« a. Rappelez la formule d'une molécule de méthane » (Réponse C2)

C7 propose de réorganiser l'exercice en distinguant explicitement le niveau macroscopique et microscopique et en regroupant les questions faisant appel au même registre.

> « Cet énoncé mélange dans l'ordre des questions le niveau macroscopique et le niveau microscopique. Je le reprendrai entièrement pour que l'on soit tout d'abord au niveau macroscopique et que l'on arrive d'abord à l'écriture en toute lettre du bilan de la réaction : méthane + dioxygène → eau + dioxyde de carbone. Pour cela, je pourrais faire mobiliser des connaissances du cours (la combustion du méthane dans l'air nécessite du dioxygène et éventuellement les tests d'identification de l'eau et du dioxyde de carbone) Ensuite seulement, je ferais explicitement mobiliser les connaissances du cours (exemple : la molécule de méthane peut être représentée par la formule CH_4) pour permettre l'écriture du bilan selon cette forme : $CH_4 + O_2 \rightarrow H_2O + CO_2$ » (Réponse C7)

Pour les autres enseignants, même s'ils proposent tous des corrections à apporter à l'exercice, aucun ne relève la difficulté de la formule brute qui représente à la fois la molécule et l'espèce chimique. Après la question b, ils sont cinq sur les sept à reconnaître que l'exercice peut entraîner des difficultés entre les deux registres. Mais seul C8 propose une reformulation allant dans ce sens en regroupant, comme C7, en premier les questions au niveau macroscopique avant de passer au niveau microscopique. Deux enseignants, C3 et C4, ne voient pas le problème.

> « Je ne me rends pas bien compte de cette confusion et je ne vois pas comment améliorer leur perception » (Réponse C3).

1.2.3 À propos des règles pour l'écriture des formules brutes

À la question 2 sur l'ordre des atomes dans les molécules, quatre enseignants répondent qu'ils donnent des règles aux élèves : C5 et C9 donnent l'ordre alphabétique, C3 indique qu'une règle existe mais ne la donne pas aux élèves et C6 ne donne aucune précision. Et seul C7 indique qu'il accepte en quatrième n'importe quel ordre même si le chimiste a l'habitude de donner les formules toujours dans le même ordre.

1.2.4 À propos de la formule chimique et du nombre d'atomes

À la question 3.a, les neuf enseignants déclarent utiliser les modèles moléculaires. La question 3.b doit leur permettre d'expliquer comment ils justifient aux élèves des modèles moléculaires qui montrent des atomes dans une disposition qui ne correspond pas à celles des formules brutes CO_2 et CH_4.

C1 indique que les élèves ne lui posent pas la question. Les huit autres enseignants ont des stratégies différentes dont sept qui font appel à des notions hors programme en quatrième :

- C4 et C5 expliquent que cela correspond à la meilleure répartition dans l'espace ;
- C2 et C3 évoquent les liaisons chimiques.

« J'indique que le carbone doit avoir quatre liaisons et que l'oxygène doit en avoir deux. Très rapidement, j'explique qu'il peut y avoir des doubles liaisons. (Avant de voir cette molécule, j'ai déjà étudié des molécules simples pour expliquer la formation d'une molécule, et donc l'existence de liaison.) » (Réponse C3)

- C6 et C9 font intervenir le cortège électronique des atomes. Ils sont bien conscients que leurs explications sont hors programme et indiquent qu'ils ne les donnent que si les élèves le demandent.

« J'utilise le fait que l'atome de carbone « aime » recevoir des électrons. 4, du fait de sa configuration électronique (règle de Lewis). Et que les atomes d'oxygène aiment bien en donner 2 chacun » (Réponses C6)

Nous retrouvons dans ce que propose C8, ce que Talanquer (2007) nomme les explications téléologiques. L'atome s'associe d'une certaine façon car « *il aime recevoir des électrons* ».

- C8 fait manipuler aux élèves les modèles moléculaires du dioxygène et du carbone pour former le dioxyde de carbone, ce qui leur permet d'arriver à la conclusion que la molécule de dioxygène se casse et que l'atome de carbone s'intercale entre les deux atomes d'oxygène.

Seul C7, pour éviter des explications hors programme et parce qu'il juge que cela n'a pas d'intérêt pour la résolution des exercices de quatrième, accepte que les élèves placent les atomes les uns par rapport aux autres comme ils le veulent.

« dans le cadre du cours de quatrième, et pour comprendre les transformations chimiques présentées à ce niveau, on ne se donne pas la contrainte de la position des atomes les uns par rapport aux autres » (Réponse C7)

1.3 Discussion

Spontanément, les enseignants testés ne semblent pas avoir conscience de la particularité du langage symbolique de la chimie comme méta-niveau. Les réponses obtenues à la première question semblent indiquer la nécessité de faire évoluer la formation des enseignants sur ce

point. Nous avons pu constater dans le questionnaire élève que ceux-ci semblent perturbés dès que l'on change l'ordre des atomes dans une formule brute. Les réponses obtenues chez les neuf enseignants à la deuxième question semblent indiquer une grande diversité de pratiques sur ce point. Nous avons d'ailleurs constaté que les programmes ne donnent aucune précision concernant cet aspect des formules. À la dernière question, les enseignants semblent en difficulté. Ils n'ont pas de réponse à proposer qui soit compatible avec le programme de quatrième. La seule explication à leur disposition semble être la théorie de Lewis pour la liaison chimique mais celle-ci n'apparaît dans les programmes qu'à partir de la première depuis 2010 pour expliquer les formules d'une molécule.

2. Observation de deux séances de classe « ordinaires »

Le questionnaire ne nous permet pas d'approcher au plus près ce que font les enseignants quand ils enseignent le langage symbolique. Nous avons donc décidé d'analyser et de comparer l'activité de deux enseignants au moment où ils l'introduisent en collège. Les enseignants ne proposent pas aux élèves de séance dédiée à l'apprentissage de la nomenclature. Celui-ci se fait tout au long des trois années du cycle 4. Pour pouvoir observer cela, il aurait fallu suivre une classe tout au long de l'année, ce qui n'a pas été possible. Nous avons donc fait le choix de nous intéresser uniquement à l'introduction des formules chimiques en classe de quatrième[16]. Cette séance est la première dans les programmes de collège ayant pour objectif central l'apprentissage du langage symbolique. Deux enseignants ont accepté de nous ouvrir leur classe et de nous laisser filmer leur séance. Sachant qu'il n'y a pas toujours adéquation entre ce que disent les enseignants et les apprentissages réels des élèves (Robert & Vandebrouck, 2014, p. 250), le recueil de vidéos nous a semblé nécessaire pour nous permettre d'analyser les activités des enseignants. Nous ne sommes pas intervenue dans la préparation et le déroulement de leurs séances. Elles n'ont fait l'objet d'aucune ingénierie didactique particulière. Nous pouvons alors les considérer comme « ordinaires » (Calmettes, 2010, p. 236). Avant chaque séance, nous avons demandé aux enseignants de remplir une fiche permettant de décrire leur scénario et leurs objectifs (Annexes 7 et 8). Après chaque séance, nous avons immédiatement mené un entretien avec chaque enseignant afin

[16] Au moment de l'enregistrement des séances, les programmes en cours sont ceux de 2009. Ils sont encore déclinés par année de collège. La même séance existe toujours dans les programmes actuels mais l'enseignant peut décider de la placer à n'importe quel moment du cycle 4.

de connaître son ressenti. Nous leur avons également demandé de réagir à certains résultats du questionnaire passé aux élèves.

2.1 Ce que nous cherchons à analyser

Comme indiqué dans la première partie, nous cherchons à corroborer l'hypothèse qu'il existe des contraintes institutionnelles, épistémologiques et didactiques qui mettent les enseignants en difficulté au moment de l'introduction des formules chimiques. Le questionnaire passé aux enseignants nous permet de constater que la progression imposée par les programmes ne leur permet pas de justifier les premières formules chimiques présentées aux élèves. Dans ce cadre institutionnel, les enseignants semblent manquer de ressources.

À partir de deux études de cas, nous voulons vérifier si cette dernière hypothèse se confirme et nous cherchons à approcher les connaissances didactiques des enseignants pour l'enseignement du langage symbolique.

Pour cela, nous réalisons l'analyse des séances filmées en deux temps. Pour commencer, et comme nous l'avons présenté dans la partie 1, nous utilisons le cadre de la double approche didactique et ergonomique. Nous recherchons les régularités et les disparités dans les choix des deux enseignants en termes de scénario, d'organisation du travail et d'étayage. Dans un deuxième temps, nous analysons le discours proposé par les deux enseignants, forme et contenu, en lien avec les registres de la chimie, et plus particulièrement le registre symbolique.

Dans les deux paragraphes à venir, nous définissons pour chaque étape différents critères d'analyse qui doivent nous permettre de répondre aux quatre questions énoncées dans la partie 1 et que nous rappelons ci-dessous.

- Au moment où ils introduisent les formules chimiques, quelles similitudes et différences observe-t-on dans les scénarios et les logiques d'action des enseignants dans l'utilisation des registres de la chimie et dans la présentation des concepts ?
- Quels liens font-ils entre le registre empirique et celui des modèles et le registre symbolique ?
- Les liens entre les différents registres conduisent-ils les enseignants à proposer le langage symbolique comme un méta-niveau ?
- Quelles raisons proposent-ils quant à l'élaboration des formules chimiques ?

Enfin, le questionnaire élève a relevé de nombreuses difficultés pour les élèves dans l'interprétation du langage symbolique. En conséquence, nous ajoutons une nouvelle question de recherche.

- Les enseignants ont-ils conscience des difficultés des élèves et pouvons-nous relever, dans ce qui est proposé au cours des séances, un ou plusieurs facteurs permettant d'expliquer ces difficultés ?

2.1.1 Première étape : analyse de l'activité ordinaire de deux enseignants au moment de l'introduction des formules chimiques

Nous analysons ce que les deux enseignants proposent en termes d'objectifs, de contenu chimique en lien avec les programmes, de tâches et d'organisation du travail pour les élèves (travail autonome, individuel ou non) ainsi que l'étayage proposé (enrôlement dans la tâche, accompagnement des élèves et aides apportées (Kermen & Barroso, 2013)). Pour les étayages, nous cherchons à repérer les interventions des enseignants telles que les répétitions, les commentaires, les explicitations, les sous-tâches …, ce que Robert et Vandebrouck (2014) appellent des « proximités-en-acte » et qui correspond à tout ce que les enseignants déploient pour garder les élèves en activité et pour qu'ils en tirent profit en termes d'apprentissage. L'analyse des tâches proposées aux élèves doit nous permettre de déterminer s'il y a mobilisation de connaissances anciennes ou nouvelles (Robert, 2003 ; Kermen & Barroso, 2013, p. 95).

Nous cherchons dans cette première partie à isoler des régularités de pratiques liées entre autres aux contraintes de l'institution scolaire et des variabilités que nous pourrions alors considérer comme l'investissement des deux enseignants « *d'une marge de manœuvre qui existe par-delà ces contraintes* » (Roditi, 2003, p. 3). Nous souhaitons montrer que les enseignants ont posé des habitudes de travail avec leurs élèves et qu'ils ont développé suffisamment d'automatismes dans la gestion de la classe indiquant alors que celle-ci ne se fait pas au détriment du projet d'enseignement, ce qui peut parfois être le cas chez des enseignants débutants (Robert & Vivier, 2013, p. 119).

Nous cherchons à répondre dans cette première étape aux questions suivantes :

- Quels sont les contenus chimiques proposés aux élèves : la progression, les objectifs, les définitions données, les exemples traités ?

- Quelles sont les tâches proposées aux élèves qui permettent l'identification du savoir mis en jeu et la transformation possible du travail réalisé en nouvelles connaissances ?
- Dans l'organisation du travail, quelle part d'autonomie laissent-ils aux élèves ?
- Quel guidage les enseignants mettent-ils en place pour favoriser l'apprentissage des formules chimiques ?
- Enfin quelles marges de manœuvre les enseignants se donnent-ils par rapport au programme ? Que proposent-ils d'original par rapport aux ouvrages scolaires ?

Comme indiqué dans la partie 1, nous analysons les points suivants pour pouvoir répondre aux questions :

- le scénario élaboré, soit l'ensemble des contenus chimiques, les stratégies d'enseignement, les tâches chimiques prescrites par l'enseignant pendant la séance ;
- l'organisation du travail, qui fait quoi ? quand ? et comment ? en spécifiant les activités effectives des élèves ;
- l'étayage apporté par l'enseignant et tout ce qui peut motiver les élèves.

2.1.2 Deuxième étape : analyse de l'utilisation des registres de la chimie, des niveaux et du langage symbolique

Dans cette deuxième étape, nous souhaitons caractériser certaines régularités dans ce que disent les enseignants quand ils utilisent le langage symbolique de la chimie. Nous cherchons à répondre aux questions suivantes.

- Quels liens les enseignants proposent-ils entre les différents registres de la chimie, notamment entre le langage symbolique et les concepts d'atomes et de molécules ?
- Dans quel(s) niveau(x), macroscopique ou microscopique, se situent-ils quand ils utilisent les noms scientifiques et les formules chimiques ? Le font-ils de façon explicite ?
- Quelles raisons proposent-ils quant à l'élaboration des formules chimiques ?

Pour cela, nous déterminons dans le discours des enseignants ce qui est du registre empirique, du registre des modèles et du registre symbolique. Nous plaçons dans le registre empirique tout ce qui est en lien avec des événements de la vie ordinaire ou observés en laboratoire de chimie. Nous plaçons dans le registre des modèles microscopiques tout ce qui est en lien avec

la représentation particulaire de la matière, notamment atomes et molécules, et dans le registre des modèles macroscopiques tout ce qui est en lien avec la réaction chimique. Dans quel(s) registre(s) et à quel(s) niveau(x) se situent les situations proposées par les enseignants et leur discours ? Comment mobilisent-ils dans leur discours et dans les tâches proposées le registre symbolique en lien avec le registre empirique et le registre des modèles ? Pour cela, nous nous intéressons aux termes utilisés par les enseignants permettant l'identification des registres mis en jeu dans la séance. Chaque fois que des noms ou des formules sont proposés par l'enseignant ou par les élèves, est-il possible de les associer à une espèce chimique, et donc au niveau macroscopique, ou à une molécule et donc au niveau microscopique ? Le discours des enseignants est-il suffisamment précis et rigoureux pour permettre aux élèves de reconnaître le niveau, microscopique ou macroscopique, en lien avec le langage symbolique ? Enfin nous souhaitons déterminer si les enseignants ou les élèves élaborent des raisons (contraintes ou nécessités) (Orange, 2000) quant à la constitution des formules chimiques. Comment justifient-ils les différentes formules chimiques : pourquoi O_2 plutôt que O, CO_2 plutôt que CO, etc. ?

2.2 Méthodologie

2.2.1 Recueil de données

Nous avons proposé aux enseignants de collège qui avaient accepté de faire passer le questionnaire élève dans leurs classes de venir les filmer au moment où ils introduisent les formules chimiques en quatrième. Ils sont deux à avoir bien voulu nous ouvrir leur porte. Les deux classes observées de quatrième sont situées dans des collèges de la région Hauts de France. Les élèves, aux dires des enseignants pendant les entretiens (Annexes 12 et 13), ont un niveau faible pour la première classe et un niveau moyen pour la seconde. Il s'agit de deux séances en classe entière avec seize élèves pour la première (Photo 1) et vingt-six pour la deuxième (Photo 2). Elles durent environ cinquante-cinq minutes chacune. Les séances se sont déroulées toutes les deux en fin de matinée.

Photo 1 Séance 1

Les deux enseignants sont les seuls titulaires en Physique-Chimie dans leur collège. Ils gèrent leur salle et le matériel. Ils peuvent donc choisir leur progression et le matériel à utiliser comme ils le souhaitent. Ces séances correspondent dans le programme de 2009 à la fin de la partie chimie de quatrième. L'une a été filmée en juin, l'enseignant terminant son programme par la chimie et l'autre en novembre, l'enseignante commençant au contraire l'année par la chimie. Les deux enseignants ont respectivement quinze et cinq années d'expérience. Avant de venir filmer, nous avons demandé et obtenu l'autorisation des chefs d'établissement et des parents pour tous les élèves. Avant la séance, nous avons demandé aux enseignants de remplir une fiche indiquant leurs objectifs, le contexte et le plan de leur séance (Annexes 7 et 8). Nous avons assisté aux deux séances au fond de la salle et nous les avons filmées à l'aide d'une caméra également située au fond de la salle. Celle-ci était dirigée vers le tableau et englobait quasiment l'ensemble de la classe (Photo 1 et Photo 2).

Photo 2 Séance 2

Nous avons muni les enseignants d'un micro-cravate et nous avons placé un deuxième enregistreur au fond de la salle. Nous avons transcrit l'intégralité des propos tenus (Annexes 9 et 10) à l'exception de quelques passages d'élèves inaudibles. Enfin, nous avons mené,

immédiatement après chaque séance, un entretien avec chaque enseignant afin de recueillir leurs premières impressions. Ces échanges ont également été enregistrés. Nous avons transcrit uniquement les passages portant sur leur ressenti, leurs connaissances des difficultés des élèves, leurs propres difficultés et les évolutions envisagées.

2.2.2 Traitement et méthode d'analyse des données

Nous avons à notre disposition : la fiche de préparation remplie par les deux enseignants, l'enregistrement vidéo de la séance et l'enregistrement audio de l'entretien réalisé avec chacun des enseignants, juste après la classe.

2.2.2.1 Les transcriptions

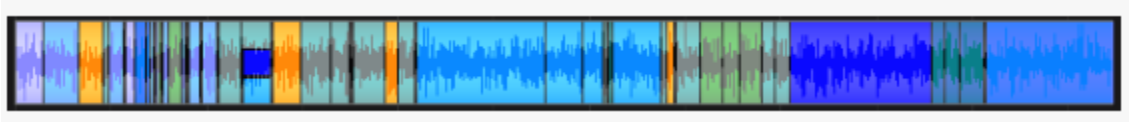
Pour les transcriptions (Annexes 9 et 10), nous avons utilisé le logiciel SONAL[17]. Il permet de repérer et sélectionner les extraits qui nous semblent représentatifs et de réaliser une analyse chronométrique, chronologique et lexicométrique de la séance. Nous avons également utilisé le logiciel TROPES[18] pour une analyse de la transcription d'un point de vue sémantique. Ce logiciel permet de repérer dans le discours des enseignants les éléments qui sont fréquemment associés. Dans les transcriptions, les prises de parole des enseignants sont toujours indiquées par [>P] pour professeur et nous avons regroupé tous les élèves sous le sigle [>E]. En effet nous n'avons pas la possibilité de distinguer systématiquement l'élève qui intervient à partir de la bande sonore ou de la vidéo. Nous avons donc préféré désigner par un seul sigle toutes leurs interventions. Pour la transcription des entretiens, nous conservons le sigle [>P] pour désigner l'enseignant et nous nous repérons par le sigle [>I] pour interviewer. Dans toute la suite de la thèse, nous nommons respectivement les enseignants des séances 1 et 2 Mathieu et Aude. Enfin il est parfois nécessaire de préciser le contexte pour pouvoir comprendre certains échanges. Celui-ci est alors indiqué entre parenthèses dans la transcription.

Le logiciel SONAL permet de réaliser des analyses chronométriques. Une d'elles indique notamment la répartition en durée des différentes interventions (enseignant ou élèves). Il est également possible de découper la bande son en épisodes et d'y associer des thématiques.

[17] Sonal est un logiciel gratuit de construction et d'analyse de corpus de données qualitatives développé par A. Alber (Université F. Rabelais (Tours) / UMR C.I.T.E.R.E.S) (http://www.sonal-info.com/)

[18] "Tropes est un logiciel développé par Pierre Molette et Agnès Landré sur la base des travaux de Rodolphe Ghiglione (http://www.tropes.fr/)"

Ces dernières peuvent être repérées à l'aide d'un code couleur. Le découpage chronologique de la séance est ainsi rendu accessible visuellement par l'association de bandes de couleur à chaque épisode comme illustré ci-dessous (Graphique 10).



Graphique 10 Représentation sur la bande son des thématiques par un codage couleur

2.2.2.2 Découpage des transcriptions des séances de classe

Nous avons dans un premier temps découpé les transcriptions en épisodes, chacun correspondant à la réalisation d'une tâche ou d'une sous-tâche pour les élèves. Nous avons ensuite associé à chaque épisode des mots-clés ou Tags (voir 2.2.2.2.1) à partir des échanges pour nous permettre de repérer les registres de la chimie et le langage symbolique utilisés par l'enseignant et le niveau auquel il se situe (macroscopique ou microscopique). Puis pour décrire ces épisodes à l'aide du logiciel SONAL, nous avons décidé d'associer à chaque épisode une catégorie ou plusieurs catégories issues de chacune des trois thématiques. Celles-ci ont été choisies en lien avec ce que nous cherchons à analyser. Nous indiquons un peu plus loin comment les catégories associées ont été choisies, à quoi elles correspondent précisément et comment nous les sélectionnons pour chaque épisode. Nos trois thématiques sont donc :

- « Organisation du travail ». Nous associons à cette thématique cinq catégories : [Professeur seul], [Professeur-Élèves], [Questions élèves], [Travail individuel] et [Transition] (voir 2.2.2.2.2). Celles-ci doivent nous permettre d'indiquer qui intervient et quand, au moment de l'analyse de l'organisation du travail. Nous formulons l'hypothèse que le découpage de la séance suivant cette thématique doit permettre d'identifier les tâches données aux élèves.

- « Registres de la chimie ». Nous associons à cette thématique six catégories : [Empirique], [Modèle microscopique], [Modèle macroscopique], [Symbolique (formule)], [Symbolique (nom)] et [Modèle moléculaire] (voir 2.2.2.2.3). Elles font référence aux registres de la chimie issus du tétraèdre (Kermen & Méheut, 2009) et vont permettre d'indiquer dans quel(s) registre(s) l'enseignant situe la séance au moment de l'analyse du scénario.

- « Langage symbolique ». Nous associons à cette thématique trois catégories : [Langage explicite], [Langage implicite] et [Langage non défini] (voir 2.2.2.2.4.). Elles pourront préciser le niveau d'explicitation du langage symbolique utilisé par les enseignants.

Dans la transcription exportée à partir du logiciel SONAL, on retrouve les différents épisodes avec au début de chacun les données suivantes (Figure 39) :

1- le numéro de l'épisode (« 45 ») ;

2- les temps de début et de fin de l'extrait dans la séance (52:20 > 52:54) ;

3- les « Tags » associés à l'épisode (nom indéterminé, « molécule », nom molécule) ;

4- les catégories choisies pour chaque thématique ([langage symbolique non défini], [modèle micro], [niveau symbolique (nom)], [questions élèves]).

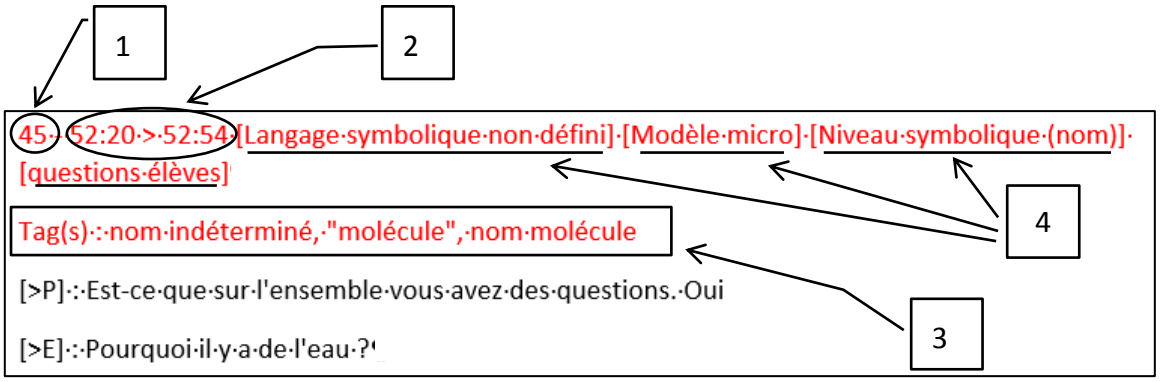


Figure 39 Extrait d'une transcription à l'aide du logiciel SONAL

Nous allons maintenant indiquer comment nous avons procédé pour choisir les Tags et les catégories des trois thématiques pour chaque épisode.

2.2.2.2.1 Repérages des éléments de savoirs utilisés dans un épisode à l'aide de mots-clés

À chaque épisode peuvent être associés des mots-clés, ou Tags, en lien avec les éléments de savoir en jeu. Ils doivent nous permettre de déterminer pour chaque épisode les catégories des deux thématiques : « Registres de la chimie » et « Langage symbolique ». Ils correspondent aux mots les plus prononcés par les enseignants ou les élèves pendant les séances en lien avec la chimie. Ils ont donc été définis après analyse des transcriptions. La liste est la suivante : « atome », « corps (pur, simple, composé) », « élément », « espèce chimique », « équation », « formule (chimique) », « gaz », « indice », « liquide », « matière », « mélange », « modèle », « molécule », « nom », « représenter », « solide », « solution », « symbole », « transformation (chimique) ». Ils sont indiqués entre guillemets dans les Tags pour chaque épisode. Nous avons également regroupé certains mots prononcés par les enseignants ou les élèves correspondant à une même signification du point de vue des savoirs chimiques et qui émergent de l'analyse lexicométrique. L'ensemble des mots-clés correspondant à ces regroupements sont indiqués dans Tableau 11 ci-dessous. Pour les

distinguer de la première liste, ils ne sont pas indiqués entre guillemets au début de chaque épisode.

Tableau 11 : mots-clés ou Tags correspondant à des regroupements de mots prononcés par l'enseignant ou les élèves

Mots clés ou Tags	**Utilisés chaque fois qu' :**
Chiffres	un chiffre correspondant aux indices d'une formule est cité
Composé chimique	un composé chimique est cité par exemple : métal, alliage, plastique, …)
Couleur	une couleur correspondant aux modèles moléculaires est citée
Dimension	un terme en lien avec la taille des particules (atomes ou molécules) est indiqué
Empirique	un terme relevant du registre empirique ou expérimental est cité (seringue, terre, air, homme, etc.)
Formule (ou nom) espèce chimique	une formule ou un nom chimique est donné(e) et les termes immédiatement employés avec la formule ou le nom les associent à une espèce chimique
Formule (ou nom) molécule	une formule ou un nom chimique est donné(e) et les termes immédiatement employés avec la formule ou le nom les associent à une molécule
Formule (ou nom ou symbole) indéterminé(e)	une de formule ou un nom chimique ou un symbole chimique est donné(e) et les termes immédiatement employés ne permettent pas de savoir explicitement à quel registre ils sont rattachés (microscopique ou macroscopique)
Liaison	un terme utilisé indique une liaison entre les atomes
Modèle moléculaire	un terme utilisé est en lien avec les modèles moléculaires
Nom mélange	un nom est donné et les termes immédiatement employés l'associent à un mélange
Réaction	un terme utilisé fait référence à une réaction chimique (modèle macroscopique)
Symbole atome	un symbole chimique est donné et le terme atome est immédiatement utilisé
Transformation	un terme utilisé fait référence à une transformation chimique (registre empirique)

Certaines de ces catégories étaient attendues *a priori* telles que celles reliées aux formules ou aux noms. Certaines émergent de l'analyse lexicométrique comme la catégorie couleur. Nous ne nous attendions pas à ce qu'elle soit si souvent citée par un des deux enseignants. Nous retrouvons aussi plusieurs fois prononcés les termes tels qu'alliage, plastique, métal. Ils sont significatifs pour nous du registre empirique et nous les avons regroupés sous l'appellation composé chimique.

L'ensemble de ces mots-clés, ou Tags, doit nous permettre d'associer à chaque épisode une ou plusieurs catégories de la thématique « registres de la chimie » (voir 2.2.2.2.3) et une seule catégorie de la thématique « langage symbolique » (voir 2.2.2.2.4).

2.2.2.2.2 Thématique : « organisation du travail »

Nous avons établi cinq catégories dans cette thématique. Celles-ci n'ont pas été définies de façon rigide préalablement à l'analyse. Elles ont été élaborées de façon inductive par aller-retour entre une analyse a priori et une analyse de la vidéo. Nous pensions notamment pouvoir observer des passages avec des échanges entre élèves ou éventuellement du travail en petits groupes d'élèves. Cela n'a jamais été le cas dans les deux séances observées. Les catégories retenues sont alors :

- [Professeur seul] : l'épisode correspond à un monologue de l'enseignant ;
- [Professeur – élèves] : l'épisode correspond à un cours dialogué entre l'enseignant qui pose les questions et les élèves qui y répondent ;
- [Questions élèves] : dans l'épisode un élève pose une question à l'enseignant. Nous incluons en général dans l'épisode la réponse de l'enseignant ;
- [Travail individuel] : l'épisode correspond au moment où les élèves doivent effectuer un travail individuel ;
- [Transition] : l'épisode correspond à des passages pendant lesquels il n'y a aucun savoir en jeu (par exemple : les entrée et sortie de classe, les distributions de documents, l'appel, etc.).

Au cours des deux séances observées, nous n'avons noté aucune autre modalité d'organisation du travail, telle que des phases de travail en groupe. Chaque épisode correspond à une seule catégorie de cette thématique. À partir de cette catégorisation, nous pouvons connaître chronologiquement et en proportion l'organisation du travail au cours de chaque séance. Le logiciel SONAL nous permet de visualiser cela.

2.2.2.2.3 Thématique : « registre de la chimie »

Les catégories de cette thématique sont issues du tétraèdre (Kermen & Méheut, 2009). Nous souhaitons en effet connaître dans quelles proportions les différents registres de chimie apparaissent dans le discours de l'enseignant. Nous avons donc défini quatre catégories :

- [Empirique] : chaque fois qu'il est fait référence dans l'épisode à une situation macroscopique non modélisée, situation de la vie de tous les jours ou situation expérimentale. Nous regroupons dans cette catégorie la réalité perçue et la réalité idéalisée (Kermen, 2016) ;
- [Modèle microscopique] : chaque fois qu'il est fait référence dans l'épisode à la modélisation particulaire de la matière, notamment les atomes et les molécules ;
- [Modèle macroscopique] : chaque fois qu'il est fait référence dans l'épisode à la réaction chimique ou à son équation. Nous faisons ici la distinction entre transformation chimique « qui est une description des faits », et qui fait alors partie du registre empirique, de « son interprétation » par une réaction chimique (Kermen & Meheut, 2008) ;
- [Symbolique (formule)] ou [Symbolique (nom)] : chaque fois qu'un nom ou une formule est utilisé ou que la tâche porte sur le langage symbolique ou des règles de codage ou décodage des formules.

Au cours de la première séance, l'enseignant a de très nombreuses fois utilisé les modèles moléculaires. Ils correspondent à une représentation matérielle codifiée en trois dimensions d'une molécule reposant sur un modèle défini. Kermen et Méheut (2009) ont inclus les animations microscopiques dans la partie symbolique du tétraèdre. Historiquement, les modèles moléculaires sont un outil didactique permettant d'illustrer les molécules. Ils n'ont pas pour nous le même statut que les noms et les formules chimiques. Nous avons donc préféré ne pas les associer à la catégorie du langage symbolique. Les enseignants les utilisent comme représentation idéalisée d'une réalité microscopique. Il ne nous semblait pas possible de les placer dans le registre du modèle microscopique. Nous avons donc décidé d'ajouter cette cinquième catégorie en plus de celles issues du tétraèdre.

- [Modèle moléculaire] : chaque fois que l'enseignant montre ou utilise ou fait référence aux modèles moléculaires.

Pour pouvoir associer à chaque épisode les registres de la chimie correspondant, nous utilisons les Tags repérés dans chaque épisode. La présence ou non de ces mots-clés nous permet d'indiquer les registres de la chimie dans lesquels se situe l'épisode comme précisé dans le Tableau 12 ci-dessous.

Tableau 12 Lien entre les mots-clés et les registres de la chimie

Registre	**Tags ou mots-clés**
Empirique	empirique, « alliage », « dissolution », « espèce chimique », « mélange », « métal », « nature », « plastique », « gaz », « liquide », « solide », « solution », « synthétique », transformation
Modèle microscopique	« atome », « molécule », « particule », liaison, dimension
Modèle macroscopique	réaction
Symbolique (nom)	« nom », nom (molécule, espèce chimique, mélange ou indéterminé)
Symbolique (formule)	« formule chimique », « symbole », « indice », chiffre, formule (espèce chimique, molécule, indéterminée), symbole (atome, indéterminé)
Modèles moléculaires	« modèle moléculaire », modèle moléculaire, couleur

Dans certaines tâches ou sous-tâches, on observe parfois un changement de registre dans le discours de l'enseignant ou de l'élève. Nous décidons alors de découper celles-ci en deux épisodes. Il est également possible de trouver dans un même épisode plusieurs catégories quand celles-ci sont totalement enchevêtrées dans le discours de l'enseignant ou de l'élève. Nous souhaitons avoir un découpage de la transcription au plus près des tâches en lien avec les registres de la chimie.

2.2.2.2.4 Thématique : langage symbolique

Nous avons cherché à déterminer si le discours de l'enseignant peut permettre à l'élève de repérer les moments où le langage symbolique est associé à un niveau, macroscopique ou microscopique, ou pas. De même quand l'élève utilise un nom ou une formule, pouvons-nous savoir s'il a conscience de l'existence de ces deux niveaux et, si oui, à quel niveau se situe-t-il ? Nous nommons cette thématique « langage symbolique » et nous lui avons associé trois catégories :

- [Langage explicite] : les noms ou les formules utilisés correspondent explicitement à une espèce chimique ou à une molécule ou à un atome ;
- [Langage implicite] : les dialogues au cours de l'épisode nous permettent de comprendre à quel niveau correspond le nom ou la formule chimique mais cela n'est pas indiqué explicitement ;
- [Langage non défini] : il est impossible dans l'épisode de définir à quel niveau correspondent les noms ou les formules cités.

Nous utilisons à nouveau les Tags (Tableau 13) pour déterminer si le langage symbolique, utilisé par les élèves ou l'enseignant au cours de chaque épisode, est associé explicitement ou implicitement à un registre macroscopique ou microscopique ou reste non défini.

Tableau 13 Lien entre le niveau de langage et les mots-clés

Langage	**Tags ou mots-clés présents**	**Tags ou mots-clés absents**
explicite	Nom (ou formule) espèce chimique, Nom (ou formule) molécule, Nom mélange, Symbole atome	Nom (ou formule ou symbole) indéterminé(e)
implicite	Nom (ou formule ou symbole) indéterminé(e)	
non-déterminé	Nom (ou formule ou symbole) indéterminé(e) dans un épisode où sont associés à la fois le registre empirique et le registre microscopique	

Cette thématique permet de caractériser l'utilisation explicite, implicite ou non-définie du langage symbolique par les enseignants. Nous associons une seule catégorie de cette thématique à chaque épisode. Si un seul passage de l'épisode est non déterminé, cette catégorie l'emporte sur les deux autres. Pour pouvoir associer à l'épisode « langage explicite », il ne doit y avoir aucun passage dans lequel le langage est implicite ou non-déterminé.

Au final, nous avons pour chaque épisode : une seule tâche ou sous-tâche, une seule catégorie « organisation du travail », aucune, une ou plusieurs catégories « registres de la chimie » et une seule catégorie « langage symbolique ». Le découpage des transcriptions en épisodes et la catégorisation de chacun de ces épisodes (voir Annexes 9 et 10) vont nous apporter différentes informations que nous exploitons dans l'analyse des séances.

2.3 Analyse de l'activité « ordinaire » de deux enseignants au moment de l'introduction des formules chimiques

Nous analysons ici les scénarios, les organisations du travail et les étayages proposés par les enseignants.

2.3.1 Les scénarios

Nous situons la place de cette séance dans la progression globale de l'enseignant en précisant les objectifs en fonction des difficultés repérées des élèves. Nous indiquons ensuite les notions

chimiques introduites en comparant ce que les élèves doivent savoir avec les exemples donnés. Puis nous décrivons les deux itinéraires proposés par les enseignants au cours de chaque séance.

2.3.1.1 Place dans la progression et objectifs des séances

Chaque enseignant a complété un document (Annexes 7 et 8) lui permettant de d'indiquer la place de la séance dans la progression, et ses objectifs en lien avec les difficultés prévues des élèves. Nous les avons à nouveau interrogés sur ces points lors des entretiens (Annexes 11 et 12).

2.3.1.1.1 Séance 1

La séance filmée fait partie de la fin du programme de chimie de quatrième et fait suite à une première séance portant sur la présentation des atomes. Les objectifs indiqués par Mathieu sont de :

> *définir une molécule puis d'expliquer le principe et l'utilisation des formules chimiques (Fiche séance n° 1 – Annexe 7)*

Il attend des élèves qu'ils connaissent la définition d'une molécule et de la formule chimique et qu'ils soient capables de faire la différence entre molécules et atomes.

> *[>P] : donc c'est ce que je t'avais noté, donc c'est surtout d'essayer de voir principalement séparer entre atome et molécule. (Entretien 1 - Lignes 16-18, Annexe 12).*

Son objectif principal est bien celui du programme : savoir coder ou décoder la formule chimique.

> *[>P] : moi mon premier travail, c'est qu'ils arrivent à jongler entre composition et formule chimique. Ça c'est mon premier travail. (Entretien 1 - Lignes 276-277, Annexe 12)*

Il considère que les élèves sont capables d'acquérir cette notion après un temps d'adaptation. Les difficultés des élèves dans cette séance sont avant tout pour lui :

- soit une affectation incorrecte de l'indice dans la formule chimique :

> *Les élèves pensent que ce chiffre est associé à la lettre qui suit ce chiffre (Fiche séance n° 1 Annexe 7)*

- soit des problèmes de syntaxe avec la confusion des lettres minuscules ou majuscules :

> *[>P] : ce que je vois, c'est pourquoi j'ai insisté avec CuO, la lettre minuscule ou majuscule, même si c'est hors cadre, cela me permet ainsi de faire la transition pour bien insister minuscule majuscule. […]. Voilà c'est en général ce qui arrive. C'est les erreurs soit ils mettent pas en minuscule. (Entretien 1 - Lignes 21-25 - Annexe 12)*

- soit la confusion entre une formule chimique et un sigle qui ne serait qu'une abréviation du nom

> *[>P] : […] ils prennent directement l'eau en majuscule. C'est ça qui arrive quand on fait une interro sur des rappels par exemple l'année prochaine quand je demande pour certains la formule de l'eau ils vont mettre E majuscule. Monoxyde de carbone ils vont mettre MC par exemple. (Fiche séance n° 1 - Lignes 26-28 - Annexe 7)*

- et enfin la difficulté pour passer du nom de la molécule à sa formule chimique.

> *analyser le nom d'une molécule pour donner sa formule chimique (Fiche séance n° 1 - Annexe 7)*

La suite prévue est une séance de travaux-pratiques permettant aux élèves de manipuler les modèles moléculaires en lien avec la formule chimique et la composition d'une molécule.

2.3.1.1.2 Séance 2

La séance se situe dans un chapitre portant sur la compréhension des états de la matière. Elle fait suite à la présentation du modèle particulaire permettant une interprétation microscopique des propriétés des gaz. À la différence de Mathieu, Aude a commencé par la molécule avant d'introduire dans cette séance les atomes. Mais on retrouve dans la fiche remplie par Aude (Annexe 8) les mêmes objectifs que ceux de Mathieu :

> *Faire une distinction claire entre atome et molécule. Expliquer la compo d'une molécule à l'aide des formules brutes. (Fiche séance n° 2 - Annexe 8)*

Au cours de l'entretien, quand on demande à Aude ce qu'un élève doit comprendre de la formule brute, elle s'attache également à la forme syntaxique.

> *[>P] : dans la formule brute pour moi l'élève doit avoir compris deux choses : les lettres qui symbolisent un atome particulier et ensuite surtout les chiffres placés en indice qui correspondent au nombre d'atomes présents dans la molécule. (Entretien 2 - Lignes 2-4 - Annexe 13)*

Comme pour Mathieu, cette séance sera suivie d'une utilisation par les élèves des modèles moléculaires. C'est, pour Aude, ce qui doit aider les élèves à mieux comprendre la formule chimique en leur permettant de visualiser la molécule et de compter les atomes présents.

> *[>P] : Donc c'est à dire avec les modèles moléculaires. Je pense que les élèves comprennent mieux en comptant. Alors une fois qu'ils ont les couleurs associées, ça c'est le prochain cours. Je pense qu'ils vont mieux comprendre en comptant par rapport à une formule chimique en essayant d'associer (Entretien 2 - Lignes 9-12 - Annexe 13).*

Ce travail doit ensuite permettre l'écriture des équations de réaction au moment de la dernière partie du programme portant sur les transformations chimiques.

2.3.1.1.3 Commentaires

Même si leur progression n'est pas identique, Aude et Mathieu ont les mêmes objectifs pour la séance introductive des formules chimiques. Les élèves doivent être capables de coder ou de décoder une formule chimique, ce qui correspond très exactement au programme. Les enseignants, focalisés sur les objectifs syntaxiques, repèrent exclusivement les difficultés des élèves dans ce domaine. Enfin, ils ont prévu tous les deux de poursuivre leur séance par l'utilisation des modèles moléculaires.

2.3.1.2 Notions chimiques abordées : définitions et exemples traités

2.3.1.2.1 Séance 1

Mathieu définit une molécule comme l'association de plusieurs atomes.

> *[>P] […] Donc quand vous avez l'atome seul on parle d'atomes. Á partir du moment où ils vont se mettre […] vous avez ce que l'on va appeler la molécule. (Séance n°1 - Épisode 7 - Annexe 9)*

Puis il définit ensuite la formule chimique de la molécule. Le terme « *posséder* » à la place du terme « représenter » dans la définition est surprenant et ne semble pas situer la formule chimique dans le registre symbolique.

> *[>P] : […] Chaque molécule possède une formule chimique qui indique le nombre et la nature des atomes qui la constituent. (Séance n°1 - Épisode 11 - Annexe 9)*

Les élèves doivent apprendre à écrire correctement une formule chimique : les lettres majuscules ou minuscules dans les symboles, la position de l'indice et sa signification par rapport aux symboles. Ils doivent également être capables de passer du nom de la molécule à

la formule chimique, de décrypter la formule pour donner la composition chimique de la molécule et réciproquement. Pour cela, ils doivent connaître les symboles des atomes révisés en début de séance. Mathieu respecte à la lettre le programme. Il propose un codage et un décodage de la formule. À partir des noms, les élèves doivent retrouver la formule et à partir de la formule donner la composition de la molécule. Les exemples de formule traités par Mathieu au cours de la séance sont dans l'ordre chronologique : O_2, H_2, CuO, CO_2, H_2O et $C_{21}H_{30}O_2$ (THC[19]).

2.3.1.2.2 Séance 2

Aude, à l'inverse de Mathieu, commence d'abord par la molécule avant d'introduire l'atome ; elle donne aux élèves la même définition reliant molécules et atomes.

> *[>P] : donc une molécule c'est constitué de plusieurs atomes, d'accord, soit de même nature soit de natures différentes. (Séance n°2 - Épisode 9 - Annexe 10)*

Comme Mathieu, elle donne ensuite une définition équivalente pour la formule chimique, mais utilise bien le terme « représenter » et précise également ce que les élèves doivent savoir décoder : les symboles et les indices. La liste des atomes et des symboles à connaître sera donnée à la prochaine séance.

> *[>P] : une molécule peut se représenter par sa formule chimique. […] Cette formule nous indique le nom de chaque atome présent […] vous avez chaque fois une lettre qui va correspondre à un atome particulier. […] le nom, le nombre d'atomes de chaque type est indiqué en indice, donc c'est à dire, je le reprécise, en bas à droite du symbole de l'atome. (Séance n°2 - Épisode 34 - Annexe 10)*

À la différence de Mathieu, elle cherche à justifier auprès des élèves l'intérêt d'une formule chimique en la présentant comme un langage universel au contraire des noms qui changent en fonction des pays et de la langue utilisée.

> *[>P] : alors vous avez en français, en français tout le monde connaît ici dioxyde de carbone. Alors anglais, anglais cela ressemble sauf le carbone est mis avant le dioxyde et on enlève le e. Ensuite en chinois, je ne vais pas vous le faire j'ai jamais parlé un mot de chinois. On voit tout de suite pour nous que c'est incompréhensible. […] Heureusement et là vous voyez que je n'ai pris qu'un échantillon de langue. Donc heureusement une molécule ne se reconnaît*

[19] THC : tétrahydrocannabinol.

> *pas seulement par son nom mais elle se représente également par sa formule chimique.*
> *(Séance n°2 - Épisode 24 - Annexe 10)*

Les exemples traités au cours de la séance sont dans l'ordre chronologique : O_2, N_2, CO_2, H_2O et $C_9H_8O_4$ (l'aspirine).

2.3.1.2.3 Commentaires

Aude et Mathieu donnent aux élèves les mêmes définitions et ont les mêmes exigences sur ce que les élèves doivent savoir reconnaître dans la formule chimique. Leur progression est identique pour les exemples traités en allant du plus simple au plus complexe. Ils débutent tous les deux par deux exemples de corps simples dont le dioxygène. Puis suivent les deux corps composés déjà connus des élèves : le dioxyde de carbone et l'eau. Ils terminent enfin tous les deux par une formule beaucoup plus complexe et correspondant à des composés chimiques issus de la vie de tous les jours et que les élèves peuvent connaître : le THC pour Mathieu et l'aspirine pour Aude. On peut penser que le thème central du programme de quatrième, l'air, amène les deux enseignants à proposer en premier exemple la formule O_2. Pourtant les résultats du questionnaire élève nous incitent à penser que la formule du dioxygène, et de façon générale celle d'un corps simple, n'est pas aussi simple que cela pour un élève et n'est peut-être pas le meilleur choix pour débuter.

2.3.1.3 Itinéraire des deux séances

2.3.1.3.1 Séance 1

La séance comporte quatre parties.

- Mathieu commence par un rappel de la leçon précédente qui lui permet de revoir plusieurs atomes en précisant le nom, le symbole et les couleurs utilisées dans les modèles moléculaires. La connaissance de certains de ces atomes est indispensable pour la suite de la séance d'où l'importance de cette phase de révision et elle permet de faire le lien avec la séance précédente. Cette partie dure environ cinq minutes ;

- Mathieu propose ensuite un exemple à partir d'un texte publicitaire « l'oxygène médicinal » dans lequel, selon lui, une contradiction qu'il qualifie d'erreur[20] s'est glissée entre le nom de l'espèce chimique et la formule proposée.

[20] Dans le milieu médical, c'est bien le terme oxygène qui est utilisé.

> *[>P] : Vous supposez que vous travaillez dans le domaine médical milieu hospitalier par exemple et vous savez que pour aider à la respiration de certaines personnes vous êtes obligés d'acheter de l'oxygène médical ou médicinal c'est juste pour aider à la guérison donc on vous présente sur le catalogue, donc une société qui vous présente ce catalogue et vous présente cette publicité. Donc vous avez l'oxygène médicinal et on vous indique traitement respiratoire et réanimation vous avez également principalement utilisé dans différentes indications. Vous avez également une explication 100% O2 gaz pour inhalation disponible (Séance n°1 - Épisode 3 - Annexe 9)*

Mathieu utilise cette erreur pour introduire la différence entre les atomes d'oxygène, dont les élèves viennent de réviser le symbole, et la molécule de dioxygène. Cette partie dure environ sept minutes.

- Mathieu utilise l'exemple précédent pour introduire les notions de molécule et de formule chimique. Cette partie dure environ sept minutes.

- La dernière partie est une application des définitions précédentes à partir de cinq exemples : le dihydrogène, le monoxyde de cuivre, le dioxyde de carbone, l'eau et le tétrahydrocannabinol. Cela permet de travailler simultanément le nom, la formule et la composition chimique. Cette partie est la plus importante de la séance et dure environ trente-cinq minutes.

2.3.1.3.2 Séance 2

La séance comporte cinq parties.

- Aude reprend et termine un travail commencé à la séance précédente à partir d'un texte historique permettant de différencier atome et molécule (voir Annexe 11). Cette partie dure environ dix minutes.

- Elle fait ensuite la synthèse de la première partie. Elle définit l'atome par rapport à la molécule, en donne la racine grecque et propose une digression vers la notion d'élément chimique pour compléter la définition. Cette partie dure environ dix minutes.

- Aude donne un nouveau texte élaboré à partir de l'actualité du moment, la COP21 (Annexe 11). Cet exemple doit lui permettre d'introduire la notion de formule chimique. Cette partie dure environ dix minutes.

- Aude a un nouveau temps de synthèse pendant lequel elle définit la formule chimique et indique comment procéder pour la décoder. Cette partie dure environ cinq minutes.

- Dans la dernière partie, elle met en application les définitions données à partir de deux exemples : l'eau et l'aspirine. Cette partie dure environ dix minutes.

2.3.1.3.3 Commentaires

Comme l'indique le tableau bilan ci-dessous (Tableau 14), les itinéraires des deux séances sont assez proches.

Tableau 14 : itinéraire comparaison des deux séances

	Mathieu		Aude	
	Description	Durée	Description	Durée
Partie1	Rappel de la séance précédente	5 min	Reprise de l'exercice commencé lors de la séance précédente	10 min
Partie 2	Exemple introductif	7 min	Bilan de l'exercice et cours	10 min
Partie 3	Bilan de l'exemple et institutionnalisation	7 min	Exemple introductif	10 min
Partie 4	Applications	35 min	Bilan de l'exemple et institutionnalisation	5 min
Partie 5			Applications	10 min

Aude et Mathieu repartent tous les deux de la séance précédente, soit par des révisions soit en corrigeant la fin de l'exercice. Ils proposent ensuite aux élèves un exemple qui leur permet d'introduire la différence entre atome et molécule puis la formule chimique. Après correction, ils font noter aux élèves dans leur cahier les notions à retenir. Ils terminent tous les deux par des exercices d'application. Seuls les choix des activités introductives et les exemples proposés dans les applications diffèrent ainsi que l'organisation temporelle de la séance. Mathieu va passer beaucoup plus de temps sur la partie application. Pour mémoire, Mathieu considère que le niveau de ses élèves et du collège en général est plutôt faible. Est-ce la raison qui l'amène à avoir une phase d'application aussi importante ?

2.3.1.4 Les tâches ou sous-tâches prescrites

Nous regroupons pour chaque séance dans deux tableaux (Tableau 15 et Tableau 16) les tâches ou sous-tâches prescrites en précisant la nature du travail (type et forme) et les connaissances et savoir-faire mobilisés par les élèves et les objectifs supposés de l'enseignant. Il s'agit des objectifs que nous déduisons à partir des questions posées par l'enseignant et des réponses validées. Dans chaque partie, nous présentons les tâches, si possible dans l'ordre chronologique. Mais quand celles-ci sont répétées plusieurs fois avec pour seul changement

l'exemple traité, nous les avons regroupées. Enfin, tous les épisodes n'apparaissent pas dans les tableaux. Nous n'avons pas reporté les épisodes de transition : entrée de classe, sortie de cahier, appel, distribution de documents, etc. Nous n'avons pas non plus reporté les épisodes correspondant à des questions élèves et qui n'ont pas été reprises par l'enseignant pour apporter une nouvelle connaissance. Nous reprendrons ces questions dans le deuxième temps de l'analyse.

2.3.1.4.1 Séance 1

La séance comporte vingt-neuf tâches au total d'une durée moyenne de 1 min 32s (Tableau 15).

Tableau 15 Ensemble des tâches prescrites au cours de la séance 1

Partie	Épisode(s)	Durée	Nature du travail (type et forme)	Connaissances et savoir-faire visés par les élèves	Objectifs supposés de l'enseignant pour la tâche
1	2	2min 24s	Rappel de la séance précédente par questions orales successives posées aux élèves.	Les symboles : C, H, O, S, N, Cu, Cl et les couleurs des atomes dans les modèles moléculaires.	Connaître les symboles des atomes
2	3	1min 19s	Présentation et lecture par l'enseignant d'un texte publicitaire à propos d'oxygène médicinal. Les élèves écoutent.		Reconnaître une formule chimique
	4	36s	Recherche d'une information dans le texte par questions orales successives posées aux élèves.	Le symbole O.	Distinguer le symbole O de O_2.
	6	54s	Introduction d'un nouveau savoir-faire par questions orales successives posées aux élèves.	Savoir faire la différence entre « oxygène » et « dioxygène » Le symbole O.	Associer une formule chimique à un nom chimique. Exemple : formule chimique O_2.
3	7	2min 35s	Institutionnalisation par l'enseignant à la fois orale et écrite au tableau. Les élèves écoutent et recopient dans leur cahier.		Faire la différence entre un atome et une molécule. Connaître la définition d'une molécule.
	9	1min 55s	Présentation des différents modèles moléculaires par l'enseignant. Les élèves écoutent.		Distinguer le modèle éclaté et le modèle compact dans les modèles moléculaires.
	10	52s	Interprétation des modèles par questions successives posées aux élèves.	Observer les billes de couleurs différentes dans le modèle de CO_2.	Distinguer atome et molécule dans les modèles moléculaires.
	11	4min 13s	Introduction orale d'une nouvelle notion par l'enseignant puis cours dicté par l'enseignant. Les élèves écoutent et notent dans leur cahier.		Savoir définir une formule chimique et en connaître la syntaxe.
4	14, 21 et **28**[21]	1min 46s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves à partir d'exemples : dihydrogène, monoxyde de cuivre, dioxyde de carbone.	Reconnaître les préfixes « di », « mono » et le mot « oxyde ».	Décoder un nom chimique pour trouver la composition chimique.

[21] Tâche complexe

	16, 22 et 38	1min 02s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves à partir d'exemples.	Les symboles : H, Cu, O, C	Coder une composition chimique en une formule chimique.
	15, 17, 25 et 29	1min 20s	Explication et synthèse de l'enseignant après chaque application. Les élèves écoutent.		Connaître la syntaxe des formules chimiques pour les indices
	19, 35 et 36	1min 10s	Copie des élèves dans leur cahier des réponses écrites par l'enseignant au tableau entre chaque exemple.		
	20, 31 et 37	1min 39s	Signification donnée oralement par l'enseignant des modèles moléculaires. Les élèves écoutent.	Indiquer les billes (nombre et couleur) pour représenter les molécules H_2, CO_2 et H_2O.	Savoir construire une molécule à partir des modèles moléculaires.
	24	39s	Rappel par questions orales successives posées aux élèves.	La couleur obtenue quand on met de l'eau sur du sulfate de cuivre anhydre.	Se rappeler du test de l'eau avec le sulfate de cuivre anhydre.
	26 et 34	1min 54s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves à partir d'exemples.	Les symboles : Cu, O, H.	Décoder une formule chimique en donnant la composition de la molécule.
	30	3min 26s	Règles énoncées par l'enseignant après une question élève.		Connaître l'ordre des symboles dans une formule chimique.
	33	2min 3s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves à partir des exemples.	La formule chimique de l'eau.	Savoir que certains noms ne permettent pas de trouver la composition chimique.

Dix-sept tâches distinctes sont délimitées. Certaines sont demandées plusieurs fois aux élèves. En effet dans la partie 4, Mathieu traite plusieurs exemples avec chaque fois les mêmes tâches à réaliser. Toutes sont simples. Mathieu propose une seule tâche complexe dans l'épisode 28 au moment où il demande la composition de la molécule de dioxyde de carbone. Seuls trois élèves semblent en mesure de répondre. Mathieu décompose alors immédiatement la tâche initiale en sept sous-tâches simples à partir de questions élémentaires où aucune adaptation de connaissances n'est demandée aux élèves.

[>P] : […] Le fameux dioxyde de carbone si maintenant avec de nouveau les couleurs, est-ce que quelqu'un est capable, avant de vous montrer la solution, d'interpréter. Vous avez le nom de la molécule. Est-ce que vous arrivez à me dire combien vous avez d'atomes de chaque espèce et en quelle quantité ? Que deux pour l'instant, trois Stephan tu dors. Allons-y. Et bien tu vas la relever Hugo (l'élève va écrire la formule au tableau). Allons-y tu commences par quelle partie dioxyde ou carbone ?

[>E] : dioxyde

[>P] : dioxyde alors tu peux détailler ? […]

[>E] : di donc il y en a deux

[>P] : d'accord. Allez Hugo ensuite. Oxyde c'est pourquoi ?

[>E] : oxygène

[>P] : d'accord, donc tu vas avoir combien d'atomes d'oxygène ?

[>E] : deux

[>P] : deux atomes d'oxygène. Ensuite après de carbone est-ce que l'on précise la quantité ?

[>E] : non

[>P] : donc il y en aura

[>E] : un

[>P] : un seul et quel type d'atome forcément ?

[>E] : carbone

[>P] : le carbone. Le carbone le symbole c'est, Nicolas stp, Le carbone le symbole ?

[>E] : C

[>P] : d'accord donc vous allez avoir le C et le dioxyde O2.

(Séance n°1 - Épisode 28 - Annexe 9)

Pratiquement toutes les tâches de la séance portent sur les connaissances et capacités du programme à acquérir : connaître les symboles des atomes, distinguer atome et molécule, coder et décoder une formule chimique et utiliser les modèles moléculaires pour représenter des molécules. Les noms des molécules sont décodés pour obtenir la composition de celles-ci puis recodés en une formule chimique. Pour chacune de ces tâches, les élèves sont donc guidés pas à pas. Ils doivent juste connaître ou reconnaître les symboles des atomes, les préfixes et savoir associer correctement les indices dans la formule. Mathieu donne également une place non négligeable aux modèles moléculaires et, le collège n'étant pas suffisamment équipé pour permettre aux élèves de travailler tous sur les mêmes modèles, il ne peut suivre sur ce point les programmes et présente à la fois le modèle compact et le modèle éclaté. Le travail se fait essentiellement à l'oral et à partir des questions posées par Mathieu. Les élèves n'effectuent aucune recherche, ni individuelle ni collective. Mathieu fait lui-même les bilans. Les élèves sont assez peu actifs. Enfin, alors que les élèves sont censés découvrir pour la première fois les formules chimiques, une tâche nous étonne dans l'épisode 33. La formule de l'eau ne pouvant être déduite du nom, Mathieu la demande aux élèves en faisant appel à leurs souvenirs.

> *[>P] : tu ne sais pas parce que forcément dans le nom eau, il n'y a pas d'autres indication. Est-ce que quelqu'un a en tête ce qu'il y a aussi dans l'eau ? (L'enseignant attend un peu) En général c'est aussi pourquoi je vous la présente parce c'est une formule comme vous avez vu en sixième en SVT le dioxyde de carbone CO2, l'eau c'est une molécule qu'on vous parle assez régulièrement. (Séance n°1 - Épisode 33 - Annexe 9)*

2.3.1.4.2 Séance 2

La séance comporte un nombre de tâches quasiment identique à celle de Mathieu, avec vingt-cinq tâches proposées, dont vingt-quatre distinctes, et d'une durée moyenne également similaire de 1min 45s (Tableau 16).

Tableau 16 Ensemble des tâches prescrites au cours de la séance 2

Partie	Épisode(s)	Durée	Nature du travail (type et forme)	Connaissances et savoir-faire visés par les élèves	Objectifs supposés de l'enseignante pour la tâche
1	2	1min 53s	Suite de la correction par questions orales successives posées aux élèves d'un exercice commencé à la séance précédente et construit par l'enseignante à partir d'un texte historique.	Extraire de l'information à partir d'un texte.	Définir les atomes à partir des molécules.
	3	1min 36s	Institutionnalisation orale par l'enseignante. Les élèves écoutent.		Faire la différence entre un atome et une molécule.
	4	38s	Explication de l'enseignante à partir d'une question d'élèves.		Savoir qu'un gaz est constitué de particules en mouvement appelées molécules.
	5	43s	Suite de la correction de l'exercice par questions orales successives posées aux élèves.	La composition de l'air.	Connaître la différence entre l'oxygène et le dioxygène.
	6	2min 35s	Suite de la correction de l'exercice par questions orales successives posées aux élèves.	Extraire de l'information à partir d'un texte.	Connaître et savoir décoder la formule du dioxygène.
	7	53s	Suite de la correction de l'exercice par questions orales successives posées aux élèves.	Raisonner par analogie à partir des noms dioxygène et diazote pour trouver la composition du diazote.	Connaître la formule du diazote et savoir la décoder.
2	8	1min 6s	Institutionnalisation par l'enseignante à la fois orale et écrite au tableau. Les élèves écoutent et recopient dans leur cahier.	La constitution d'une molécule.	Savoir qu'une molécule est constituée d'atomes.
	10	1min 5s	Digression de l'enseignante par questions posées aux élèves pour trouver la signification d'un mot.		Donner la signification du mot atome.
	11	1min 52s	Réponse orale de l'enseignante à la question posée. Les élèves écoutent.		Savoir que le mot atome signifie indivisible.
	12	1min 38s	Phase de questions posées par l'enseignante pour demander aux élèves de citer des exemples.		Connaître des exemples d'atomes.
	13	1min 8s	Digression de l'enseignante vers une nouvelle notion à partir d'exemple. Les élèves écoutent.		Savoir que les atomes sont la plus petite quantité de quelque chose appelé élément chimique.

	14	1min 55s	Phase de questions posées par l'enseignante pour demander aux élèves des exemples.		Connaître des exemples d'éléments chimiques.
	15	1min 5s	Institutionnalisation écrite de l'enseignante. Les élèves notent.		Savoir que les atomes peuvent se lier entre eux pour former une molécule.
3	18	2min	Lecture et recherche individuelle de la première question de l'exercice (élaboré par l'enseignant et partant d'un sujet d'actualité).	La formule chimique du dioxyde de carbone.	Comprendre qu'une formule chimique est un langage universel.
	19	1 min 47s	Recherche collective de la question 1 par questions orales successives posées aux élèves.	La formule chimique du dioxyde de carbone.	Être capable de donner la formule du dioxyde de carbone.
	20	**2min 2s**	**Travail individuel des élèves pour répondre à la question 2 et aide individuelle de l'enseignante (tâche complexe).**	**Décoder le nom dioxyde de carbone et la formule CO_2 et être capable faire le lien entre le nom et la formule.**	**Être capable de faire le lien entre une formule chimique et un nom chimique.**
	21	4min 47s	Correction collective de l'exercice par questions orales successives posées aux élèves.	Lire un énoncé. La formule du dioxyde de carbone	Comprendre un texte et être capable de donner la formule du dioxyde de carbone.
	22	1min 8s	Règle de syntaxe rappelée par l'enseignante après une question élève.	Écrire correctement le chiffre correspondant au nombre d'atomes dans une formule chimique.	Connaître les règles de syntaxe d'une formule chimique.
	23	2min 48s	Correction collective de la question 2 par questions orales successives posées aux élèves.	Décoder le nom dioxyde de carbone et la formule CO_2 et être capable faire le lien entre le nom et la formule.	Être capable de faire le lien entre une formule chimique et un nom chimique.
	24	1min 36s	Règle rappelée par l'enseignante après une question élève		Connaître l'ordre des lettres dans la formule chimique.
	25	1min 9s	Correction collective de la question 2 par questions orales successives posées aux élèves.	Identifier les atomes et leur nombre à partir des symboles et des indices dans une formule chimique	Savoir décoder une formule chimique

4	27	4 min	Institutionnalisation par l'enseignante à la fois orale et écrite au tableau. Les élèves écoutent et recopient dans leur cahier		Savoir ce que représente une formule chimique et connaître les règles de syntaxe
5	29 et 31	3 min 56s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves à partir d'exemples	La formule chimique de l'eau. Reconnaître les symboles et le nombre d'atomes présents dans H_2O et dans $C_9H_8O_4$	Décoder une formule chimique pour en donner la composition
	35	30s	Application du cours par questions orales successives posées aux élèves	Comparer la structure des mots aspirine et dioxyde de carbone	Montrer que certains noms ne permettent pas de trouver la composition chimique

À la différence de Mathieu, Aude ne répète pas les mêmes tâches sauf une fois en fin de séance. Elle a prévu une tâche complexe. Les élèves doivent résoudre individuellement le décodage de la formule de dioxyde de carbone (épisode 20). Par contre au moment de la correction, Aude décompose immédiatement en quatre sous-tâches simples et guide elle aussi pas à pas les élèves par son questionnement.

> *[>P] : alors je repose ma question. Si on doit énumérer. Donc d'abord, quels sont les atomes présents ? On s'intéressera aux nombres après. Alors Clément*
>
> *[>E] : le carbone et l'oxygène*
>
> *[>P] : […] Maintenant, combien on a d'atomes de carbone et combien on a d'oxygène ? A votre avis ? Matthieu ?*
>
> *[>E] : je pense qu'il y a un atome de carbone et deux d'oxygène*
>
> *[>P] : alors pourquoi tu dis un ?*
>
> *[>E] : parce que sinon on aurait mis […]*
>
> *[>P] : […]. Donc on a 1 atome de carbone et on a donc combien d'atomes d'oxygène. Clément ?*
>
> *[>E] : deux*
>
> *[>P] : on en a deux. D'accord ?*
>
> *(Séance n°2 - Épisode 31 - Annexe 10)*

Une partie des tâches porte bien sur les connaissances et capacités du programme à acquérir : distinguer atome et molécule, coder et décoder une formule chimique. Comme pour Mathieu, les noms des molécules sont décodés pour obtenir la composition de celles-ci puis recodés en une formule chimique. Mais Aude propose plus de variétés dans sa séance. Les élèves doivent notamment plusieurs fois extraire des informations dans un texte. Elle leur propose également de raisonner par analogie à partir des noms des molécules de diazote et dioxygène. Mais elle sort également des programmes en cherchant à expliquer le sens du mot atome et en introduisant la notion d'élément. Elle indique au cours de l'entretien qu'elle ne se voit pas ne pas en parler tout en indiquant qu'elle ne peut pas définir cette notion aux élèves.

> *[>P] : là j'ai parlé atomes d'hydrogène et d'oxygène mais je ne me voyais pas parler d'atomes sans parler d'éléments mais en même temps définir un élément chimique euh j'ai pas envie de me mettre sur ce terrain, sur cette pente très raide. (Entretien 2 – Lignes 133-135 - Annexe 13)*

Comme pour Mathieu, le travail se fait essentiellement à l'oral et à partir des questions posées par Aude. Un temps de recherche individuelle est proposé aux élèves, qui n'existait pas dans la première séance. Enfin nous constatons sept tâches (épisodes 5, 10, 12, 14, 19, 21 et 29 dans le Tableau 16) qui correspondent à des questions faisant appel à des connaissances que les élèves ne peuvent encore avoir comme la signification du mot atome et les éléments chimiques ou comme les formules chimiques du dioxyde de carbone et de l'eau puisque la séance porte sur cela. Nous reviendrons sur ce point dans la deuxième partie de l'analyse.

> *[>P] : […] Alors la molécule d'eau, je n'ai pas mis la formule chimique volontairement parce que je pense que vous la connaissez. Émilie ?*
>
> *[>E] : H2O*
>
> *[>P] : H2O.*
>
> *(Séance n°2 - Épisode 37 - Annexe 10)*

2.3.1.4.3 Commentaires

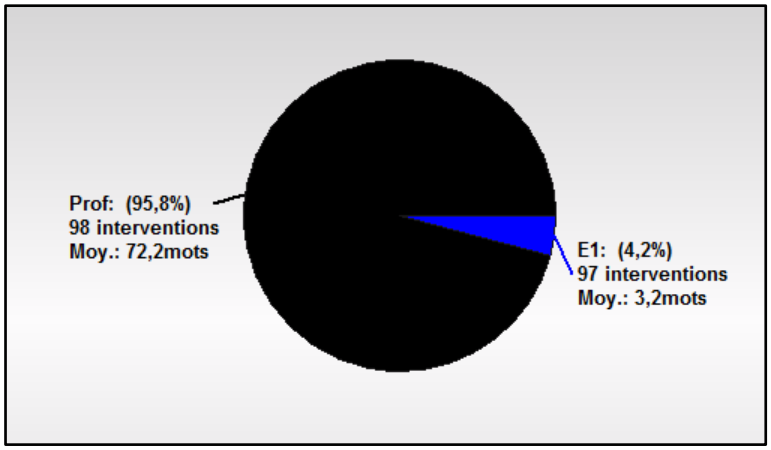
Nous observons un nombre équivalent de tâches pour les deux enseignants. Elles sont plus répétitives dans la séance 1 et plus en lien avec l'application du programme. Les tâches peuvent être considérées, à l'exception d'une, comme simples. Pour l'essentiel, les enseignants proposent des applications immédiates des connaissances ne demandant aucune adaptation des élèves. Mais cela correspond sans doute à la conséquence directe du choix de travailler essentiellement le codage et le décodage des formules chimiques ainsi que le préconisent les programmes. Le travail autour de la formule chimique est donc essentiellement syntaxique. Les élèves doivent pour l'essentiel être en mesure de donner la composition d'une molécule à partir de son nom puis de coder ensuite la formule chimique correspondante. Le nom semble donc être ce qui justifie la formule et quand celui-ci ne donne aucune indication, comme dans le cas de l'eau, alors les enseignants font appel aux souvenirs des élèves. Nous reprendrons ce point dans la deuxième partie de l'analyse. Les enseignants, qui ont su élaborer des sujets originaux, ne semblent pas en mesure de proposer des tâches complexes à propos des formules chimiques mais nous ne pouvons pas savoir s'ils en proposent en dehors de cette séance. Enfin, nous constatons que ni l'un ni l'autre ne propose aux élèves de questionnement sur la nécessité de telle ou telle formule. Les formules sont données et il ne semble pas pouvoir en être autrement.

2.3.2 L'organisation du travail

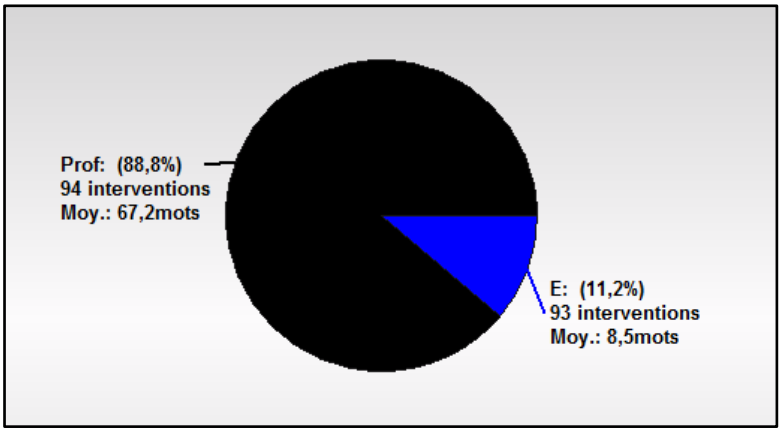
Dans chaque séance, nous relevons le temps de parole de l'enseignant ou des élèves et la répartition de chacune des séances dans les cinq catégories retenues dans la thématique « organisation du travail » (pour mémoire : professeur seul, professeur – élèves, questions élèves, travail individuel et transition).

2.3.2.1 Qui ?

La répartition en pourcentage de la durée des interventions de l'enseignant et des élèves et la moyenne du nombre de mots prononcés à chaque intervention (Graphique 11 et Graphique 12) permettent de montrer que les interventions des élèves sont nombreuses (plus de 90 interventions des élèves dans chacune des séances) mais très brèves dans les deux séances. Les interventions des élèves ne représentent que 4,2% du nombre de mots prononcés pour la séance 1 (Graphique 11) et 11,2% pour la séance 2 (Graphique 12) avec une moyenne de mots égale à 3,2 contre 72,2 prononcés par l'enseignant dans la première séance (Graphique 11) et 8,5 contre 67,2 dans la deuxième séance (Graphique 12). Les élèves développent un peu plus leurs réponses dans la séance 2, ce qui semble cohérent avec l'avis des enseignants à propos du niveau de leur classe.



Graphique 11 Répartition en pourcentage des interventions en fonction du nombre de mots prononcés (séance 1)



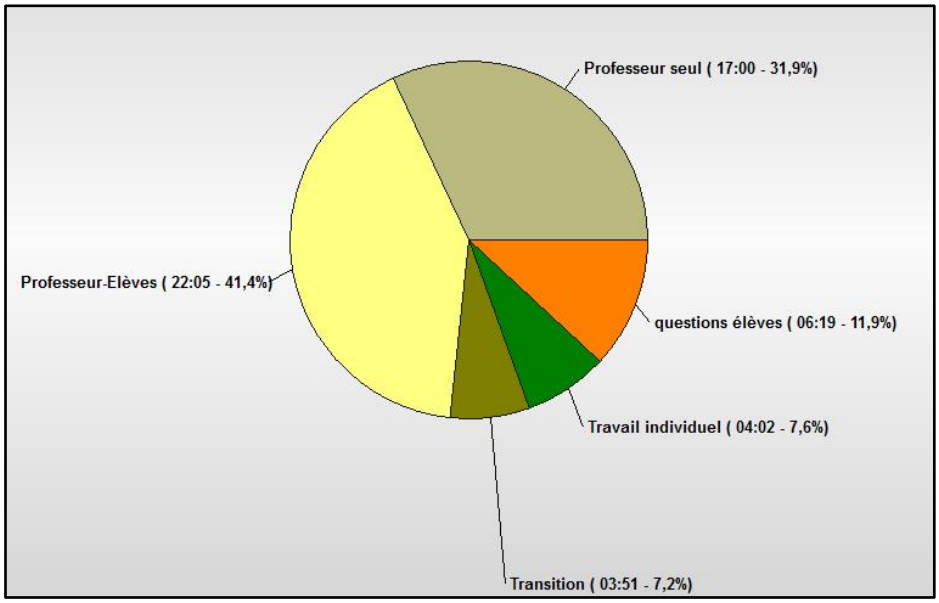
Graphique 12 Répartition en pourcentage des interventions en fonction du nombre de mots prononcés (séance 2)

Avec des interventions aussi brèves des élèves, il est difficile d'évaluer s'il existe un véritable engagement de leur part dans les tâches proposées par les enseignants.

2.3.2.2 Quand ?

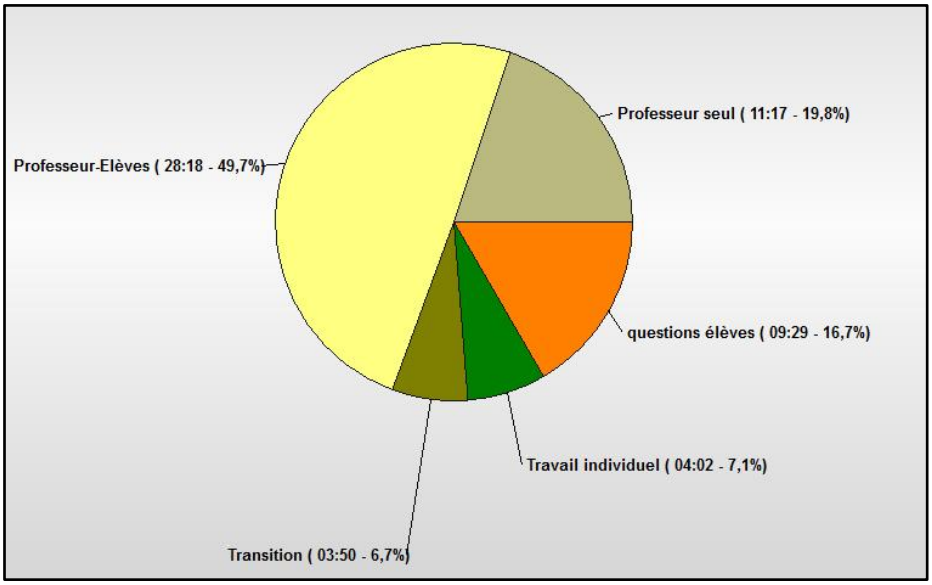
Le logiciel SONAL permet de visualiser et de calculer les proportions des différentes catégories de la thématique « organisation du travail » au cours de chacune des séances (Graphique 13 et Graphique 14). Nous obtenons deux graphiques assez proches. Les deux séances correspondent, pour plus de la moitié du temps, à un cours dialogué (partie jaune et orange) avec, comme nous avons pu le constater dans le descriptif des tâches (Tableau 15 et Tableau 16) des élèves qui répondent pour l'essentiel aux questions posées par les enseignants :

- Dans la séance 1 (Graphique 13), 41,4% du temps correspondent à des échanges dirigés par Mathieu (en jaune) et 11,9% du temps aux questions des élèves avec réponses de Mathieu (en orange) ;



Graphique 13 Répartition des différents types d'organisation du travail en durée et en pourcentage (séance 1)

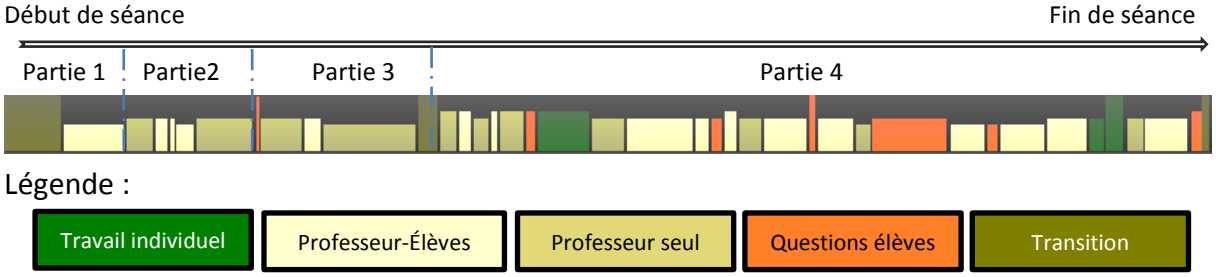
- Dans la séance 2 (Graphique 14), 49,7% du temps correspond à des échanges dirigés par Aude (en jaune) et 16,7% du temps aux questions des élèves dans la séance 1 (en jaune).



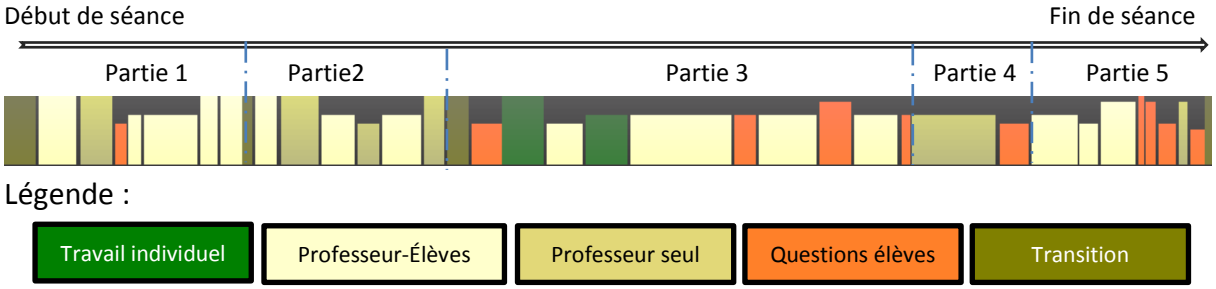
Graphique 14 Répartition des différents types d'organisation du travail en durée et en pourcentage (séance 2)

Les phases d'intervention d'Aude seule sont moins nombreuses que pour Mathieu avec respectivement 19,8% (Graphique 14) contre 31,9% (Graphique 13). Les élèves posent également plus de questions dans la séance 2. Les phases de travail individuel sont similaires dans les deux séances et ne représentent respectivement que 7,6% et 7,1% de chaque séance (Graphique 13 et Graphique 14).

Nous pouvons extraire du logiciel SONAL le déroulement chronologique des cinq catégories retenues dans la thématique « organisation du travail » au cours de chaque séance (Graphique 15 et Graphique 16).



Graphique 15 Analyse chronologique des différentes phases d'organisation du travail (séance 1)



Graphique 16 Analyse chronologique des différentes phases d'organisation du travail (séance 2)

Nous relevons un nombre d'épisodes similaires entre les deux séances avec respectivement quarante et trente-cinq épisodes. Les enseignants ne restent jamais très longtemps sur un même mode de travail. Ils alternent tout au long de la séance entre des phases où ils interviennent seuls, des phases de questionnement des élèves et des phases de travail individuel. Dans la séance 1, l'épisode le plus long (épisode n°11, annexe 9) est une intervention de Mathieu qui dure un petit peu plus de quatre minutes et qui correspond à la synthèse du cours dans la partie 3 avant de lancer la partie application. Dans la séance 2, l'épisode le plus long (épisode n° 21, Annexe 10) dure un petit peu moins de cinq minutes et correspond à la correction collective de l'exercice central de la séance dans la partie 3. Les deux enseignants, au milieu de la séance, proposent une phase de travail individuel des élèves, avec copie du tableau dans la séance 1 et recherche d'un exercice dans la séance 2 (zones vertes des Graphique 15 et Graphique 16). Ces épisodes leur permettent de circuler parmi les élèves et de vérifier individuellement l'investissement et la compréhension des élèves. L'absence de temps mort et l'alternance des modes de travail permettent d'éviter tout effet de lassitude et de conserver ainsi l'attention de l'ensemble des élèves pendant toute l'heure. Mathieu place davantage d'interventions seul en début de séance (zones marron des parties

1, 2 et 3 du Graphique 15) pour arriver très vite à sa partie essentielle, les applications du cours (partie 4 du Graphique 15 et Graphique 16). Aude répartit les phases d'exercice tout au long de la séance, alternées avec des phases bilan où elle intervient seule (Graphique 16). Les élèves ont posé sept questions dans la séance 1 (zones orange du Graphique 15), toutes, à l'exception d'une, dans la partie 4 application, et onze dans la séance 2 (zones orange du Graphique 16) également dans les phases d'exercice. Plus la séance avance et plus les élèves posent des questions. Nous pouvons interpréter cela comme un signe d'adhésion des élèves aux tâches proposées.

2.3.2.3 comment ?

Mathieu utilise un tableau interactif sur lequel il projette les différents documents utilisés pour la séance. Il interroge individuellement les élèves dans les phases de révision et d'application et complète lui-même le tableau pour les corrections (Photo 3). Aucun document n'est distribué aux élèves pendant la séance.

Photo 3 Séance 1

Aude utilise assez peu le tableau et fait travailler les élèves à partir de documents papiers qu'elle a elle-même conçus (Annexes 11). Les élèves doivent répondre directement dans les documents qu'ils peuvent ensuite coller dans leur cahier. Au moment des phases de synthèse, Aude note au tableau le cours que les élèves doivent recopier dans leur cahier.

2.3.2.4 Commentaires

Mathieu considère sa classe comme faible. Cela l'incite sans doute à prendre plus la parole qu'Aude et à ne pas laisser les élèves chercher seuls. Les élèves dans la séance 1 sont moins nombreux que dans la séance 2, ce qui peut aussi expliquer le nombre plus faible des questions posées. Nous pouvons qualifier ces deux séances de cours dialogué. Moins de 10% de chaque séance est réservé à des phases de travail individuel et les enseignants occupent

très majoritairement le temps de parole. Les interventions des élèves sont très courtes, à la fois en durée et en nombre de mots prononcés. On peut supposer que cela correspond aux choix des tâches qui restent simples comme nous pouvons le constater à partir des questions posées par les enseignants.

2.3.3 L'étayage proposé par chaque enseignant

Nous présentons ce que les enseignants mettent en place pour aider les élèves, comment ils les gardent en activité, en faisant le lien avec ce qui a été fait avant et avec un contrat didactique explicite de ce qu'ils doivent savoir et savoir-faire, et enfin comment ils cherchent à les motiver par le choix des exemples et par un discours toujours bienveillant.

2.3.3.1 Le guidage

Nous avons déjà remarqué que les enseignants guident les élèves pas à pas dans les différentes tâches proposées. Mathieu met également en place un guidage visuel. Dans chaque exemple, il utilise un jeu de couleurs rendu possible par l'utilisation du vidéoprojecteur pour faire le lien entre le nom de la molécule et la formule chimique (Photo 4).

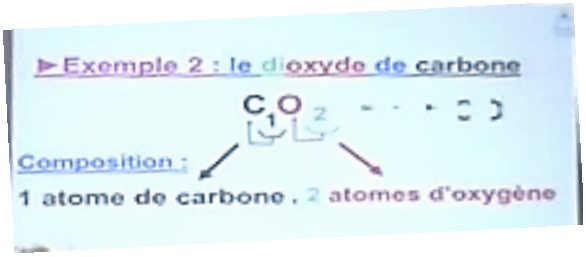


Photo 4 Extrait du tableau (séance 1) : lien entre le nom de la molécule et la formule

Les couleurs sont un facilitateur d'apprentissage des formules chimiques, ce qui semble justifier l'importance que l'enseignant donne à leur utilisation dans sa séance. Et le choix des couleurs n'est pas fait au hasard. Elles correspondent à celles utilisées dans les modèles moléculaires. Mathieu anticipe également sur une erreur des élèves qu'il considère comme « classique » : la confusion entre lettres minuscules ou majuscules dans la formule.

> *[>P] : […] j'ai insisté avec CuO, la lettre minuscule ou majuscule, même si c'est hors cadre, cela me permet ainsi de faire la transition pour bien insister minuscule majuscule. […] C'est ça qui arrive quand on fait une interro sur des rappels par exemple l'année prochaine quand je demande pour certains la formule de l'eau ils vont mettre E majuscule. Monoxyde de carbone ils vont mettre MC par exemple. (Entretien 2 - Lignes 21-28 – Annexe 12)*

Il élabore pour cela une situation originale où le remplacement de la minuscule par une majuscule a des conséquences sur l'interprétation de la formule. Il remplace la minuscule « u » du symbole du cuivre par un « U » majuscule dans la formule de l'oxyde de cuivre (Photo 5).

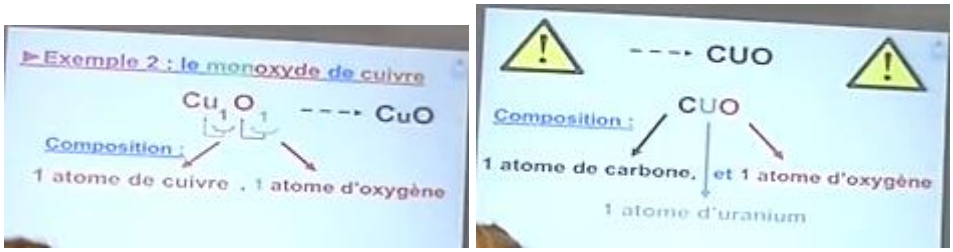


Photo 5 Extraits du tableau (séance 1) : lettre en minuscule ou en majuscule

Il utilise les modèles moléculaires (Photo 6) qui permettent aux élèves d'avoir une représentation visuelle des molécules. Ils sont également pour Mathieu un élément de motivation des élèves en apportant un côté « *ludique* » à la séance.

> *[>P] : le schéma, c'est pour eux que ce soit un peu plus ludique. […]. Certes c'est le modèle éclaté, même si c'est mieux le modèle compact mais c'est plus pour que ce soit plus ludique pour eux. Pour changer des séances de cours classiques. (Entretien 1 - Lignes 279-281 – Annexe 12)*

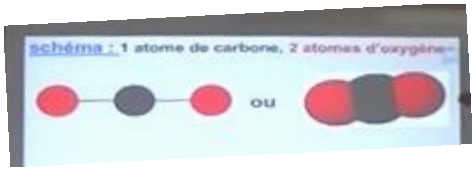


Photo 6 : Extrait du tableau – Séance 1

Pour aider les élèves à comprendre la structure des formules, il propose une analogie avec le cours de physique entre la formule chimique et les schémas électriques du cours d'électricité de cinquième. Celle-ci n'était pas *a priori* préparée à l'avance

> *Donc ce qui va se passer c'est un peu comme en électricité vous avez vu les symboles des atomes on va constituer ces symboles pour constituer la formule chimique. Comme vous lorsqu'en cinquième vous avez appris les symboles des différents composants électriques la lampe la pile, etc. ... avec tous ces symboles on faisait un circuit électrique. Donc c'est exactement le même principe, les symboles vont nous permettre de mettre en place la formule chimique. (Séance n°1 - Épisode 11 - Annexe 9)*

Par contre celle-ci ne nous semble pas adaptée. En effet les composants électriques dans un circuit électrique n'ont pas d'ordre de succession ni de nombre fixé. Cela pourrait laisser penser qu'il est possible de décider du nombre d'atomes à associer et de la façon de les associer.

Aude montre explicitement au tableau par un jeu de flèches les liens entre les différentes parties du nom de la molécule et les symboles et indices de la formule (Figure 40).

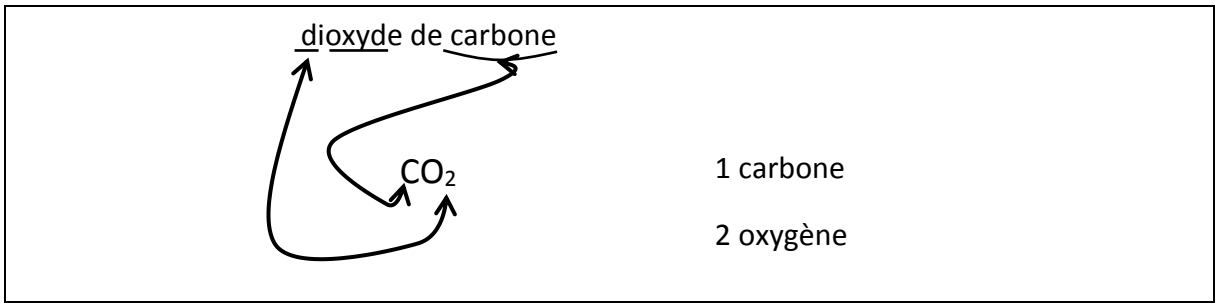


Figure 40 Reproduction du tableau (séance 2) indiquant les liens entre le nom chimique et la formule chimique

Aude met en place moins de stratégie d'aide que Mathieu.

2.3.3.2 Liens avec les séances antérieures et explication de ce qu'il faut apprendre

Aude et Mathieu donnent régulièrement aux élèves les Indications sur ce qu'il faut apprendre et font le lien avec ce qui sera fait lors des prochaines séances. Mathieu le fait notamment neuf fois au cours de sa séance. Il rappelle aux élèves ce qui a été fait dans les cours antérieurs. Dans les deux séances, le contrat didactique est explicite et les élèves savent très précisément ce qu'ils doivent apprendre et savoir-faire à chaque nouvelle notion ainsi que ce qui ne doit pas être appris.

> *[>P] : alors atome cela vient du grec "atomos". C'est pour votre culture générale ça. On ne l'apprend pas par cœur. (Séance n°2 - Épisode 12 - Annexe 10)*

2.3.3.3 Choix d'exemples issus de la vie quotidienne

Les deux enseignants utilisent des exemples pris dans la vie quotidienne tel qu'un texte publicitaire pour Mathieu ou des composés connus des élèves tels que le coca-cola et l'aspirine pour Aude. Mathieu adapte ses exemples aux demandes des élèves en proposant la formule du THC ou tétrahydrocannabinol répondant ainsi à une demande faite à la séance précédente.

> *[>P] : […] Là notre ami Maxime n'est pas là puisque c'était pour lui donc je vais partir sur l'exemple dont il m'avait parlé. Il s'agit du THC. (Séance n°1 - Épisode 38 - Annexe 9)*

Au cours de l'entretien, Aude précise l'importance pour elle de construire ses propres documents pour faire travailler les élèves à partir d'exemples de la vie quotidienne. Aude semble donc consacrer plus de temps que Mathieu à l'élaboration de sujets originaux.

> *Je prends toujours quelque chose avec la vie quotidienne. Là j'ai pris l'aspirine. […]. Voilà. C'est pour toujours leur mettre quelque chose en rapport avec la vie quotidienne. Je fais essentiellement mes cours toujours avec un rapport à leur vie en fait. (Entretien 2 – Lignes 14-20 – Annexe 10)*

2.3.3.4 Un discours bienveillant

Mathieu n'hésite pas à valoriser les réponses proposées par les élèves sans aucun jugement de valeur.

> *[>E] : dessins animés*
>
> *[>P] : dessins animés pas de problème c'est très bien. S'il parle d'H2O dans les dessins animés c'est très bien. (Séance n°1 - Épisode 34 - Annexe 9)*

Après chaque réponse d'un élève, Mathieu reprend ce qu'il a dit ou relance toujours par des petits mots pour le valoriser ou l'encourager. Il prononce notamment quatre-vingt quatre fois dans ce sens des mots tels que : « d'accord », « voilà », « c'est bon », « ça va », « OK », « c'est compris », « pas de souci », « très bien ».

> *[>P] : A quel moment vous avez employé le terme cuivre l'an dernier en cinquième ? Tout début de l'année.*
>
> *[>E] : le sulfate de cuivre*
>
> *[>P] : voilà le sulfate de cuivre. Et la couleur de la poudre était de quelle couleur ?*
>
> *[>E] : bleue*
>
> *[>P] : bleue et ça servait à quoi ?*
>
> *[>E] : à savoir s'il y a de l'eau ou pas*
>
> *[>P] : d'accord et quel était le changement de couleur ?*
>
> *[>E] : blanc*
>
> *[>P] : d'accord*
>
> *(Séance n°1 - Épisode 24 - Annexe 9)*

Le ton de l'enseignant reste bienveillant tout au long de la séance. Il ne cherche pas à tout prix à traiter l'ensemble des exemples qu'il a prévus. C'est « *si on a le temps* » (Épisode 33, Annexe 9). Pendant toute la séance, Aude encourage et rassure de nombreuses fois les élèves au moment des résolutions de tâches. On trouve également une centaine de petits mots d'encouragement dans la transcription tels que : « d'accord », « très bien », « parfait », « c'est

bon », « ça marche », « ça va », « OK », « pas de panique », etc. Elle motive les élèves en leur indiquant qu'ils ont les capacités pour répondre.

> *[>P] : Alors pas de panique. Si vous ne vous en rappelez plus, c'est pas grave. On va le faire ensemble. (Séance n°2 - Épisode 18 - Annexe 10)*

Pendant la phase de travail individuel, elle a un petit mot positif pour chaque élève et surtout dédramatise la situation s'ils se trompent. Elle insiste plusieurs fois au cours de la séance sur ce droit à l'erreur pour enrôler les élèves dans la tâche.

> *[>P] : non on l'a pas encore fait donc on va. Donc non. Mais bon, voilà on est là pour se tromper, pour essayer. (Séance n°2 - Épisode 11 - Annexe 10)*

Comme Mathieu, Aude ne cherche pas à brusquer les élèves et les prévient qu'elle leur laissera le temps nécessaire. La curiosité des élèves est suscitée tout au long de la séance. Ils posent de nombreuses questions que l'enseignant utilise pour proposer de nouvelles situations.

2.3.3.5 Commentaires

Nous avons déjà constaté que les deux enseignants ont tendance à guider pas à pas les élèves dans les tâches à effectuer. De plus, Mathieu qui considère sa classe comme faible, propose plusieurs stratégies de guidage comme l'utilisation des couleurs en lien avec les modèles moléculaires et l'anticipation d'erreur possible. Il s'appuie pour cela sur l'utilisation du numérique (diaporama et tableau interactif). Les deux enseignants cherchent à donner du sens aux apprentissages et à capter l'intérêt des élèves par des situations de la vie de tous les jours. C'est notamment un point essentiel pour Aude. Chacun à sa façon encourage les élèves et a toujours un petit mot bienveillant quand il les interroge. Aude, notamment au moment où les élèves doivent chercher individuellement, les rassure et dédramatise les erreurs ou le fait de ne pas savoir. Les deux enseignants sont bien dans la recherche de stratégies pour la meilleure réussite possible des élèves.

2.3.4 Conclusion de l'analyse de l'activité des enseignants au cours des séances ordinaires

Pour les deux enseignants, les difficultés des élèves par rapport aux formules chimiques sont essentiellement des problèmes syntaxiques. Leurs objectifs portent sur le codage et le

décodage de celles-ci. En cela, ils suivent les capacités indiquées dans le programme de 2008[22] (Annexe 1). Cela relève du déterminant institutionnel qu'ils intériorisent de façon similaire. L'introduction de la formule chimique et du langage symbolique est également l'occasion pour les deux enseignants de différencier atome et molécule. Ni l'un ni l'autre ne semble relever cela comme une difficulté pour les élèves. Leur stratégie semble identique. Les élèves doivent coder la formule chimique à partir de la composition de la molécule déduite elle-même du nom chimique. Si le nom ne donne aucune indication alors les deux enseignants font appel aux souvenirs des élèves ce qui peut sembler paradoxal dans une séance d'introduction des formules chimiques. Les tâches proposées sont simples avec un guidage pas à pas. Peu d'autonomie est laissée aux élèves, en dehors des questions qu'ils peuvent poser à n'importe quel moment de la séance. Les deux enseignants semblent chercher essentiellement à amener les élèves vers des automatismes. Les deux séances correspondent à un cours dialogué. Les élèves participent dans les deux séances avec de nombreuses interventions mais celles-ci sont courtes. Les deux enseignants occupent pour l'essentiel le temps de parole. Les choix d'Aude et de Mathieu sont analogues quant aux contenus abordés et à l'organisation du travail adopté. Leurs composantes médiative et cognitive des pratiques sont proches. Aude et Mathieu se distinguent essentiellement par leur composante personnelle. Les exercices originaux et l'étayage mis en place tout au long des séances semblent indiquer leur implication dans la réussite des élèves. Les exercices proposés par Aude sont en lien avec sa conception personnelle de l'enseignement et d'un contenu qui doit rester connecté avec la vie de tous les jours. L'étayage proposé par Mathieu est aussi sans doute lié à sa vision de la classe qu'il juge faible. Nous observons alors des variabilités dans leurs pratiques, ce que semblent montrer les travaux de Roditi (2003, p. 37), plutôt en rapport avec leurs « *conceptions de l'apprentissage et de l'enseignement* ».

2.4 Analyse de l'utilisation des registres de la chimie, des niveaux et du langage symbolique

Nous cherchons à déterminer au cours de chaque séance si :

- les atomes et les molécules sont présentés comme des concepts ;
- le langage symbolique est utilisé aussi bien pour les deux niveaux : microscopique et macroscopique ;

[22] Au moment où les séances ont été filmées, le programme est celui de 2008.

- le langage symbolique utilisé par les enseignants est explicite ;
- des raisons sont apportées à l'élaboration des formules chimiques.

Ces quatre points doivent permettre de déterminer si le langage symbolique est présenté en tant que méta-niveau.

2.4.1 « Atome » et « molécule » sont-ils présentés comme des concepts ?

Pour mémoire, Mathieu commence par le concept d'atome et introduit dans la séance celui de molécule et Aude fait l'inverse.

2.4.1.1 Séance 1

2.4.1.1.1 Concept d'atome

L'atome a été introduit au cours de la séance précédente. Mathieu projette au tableau ce que les élèves doivent connaître à propos des atomes (Photo 7) : le nom, le symbole et les couleurs utilisés dans les modèles moléculaires.

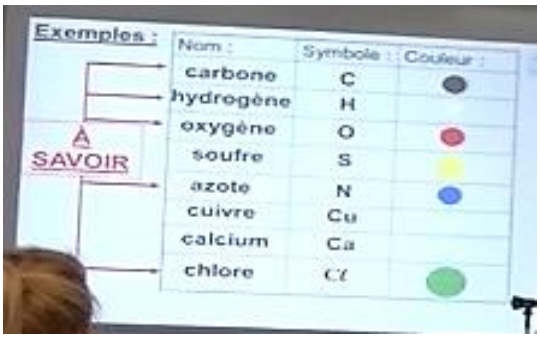


Photo 7 Extrait du tableau (séance 1) : les symboles à apprendre et les couleurs associées

Les couleurs, même si l'enseignant précise qu'elles ne sont pas à connaître par cœur, sont présentées au même niveau d'importance que le nom ou le symbole (Photo 7). Et, quand il interroge les élèves, il demande systématiquement la couleur juste après avoir fait rappeler le symbole.

> *[>P] : donc je vous rappelle vous prenez la première lettre du mot en majuscule donc C pour carbone par contre je vous l'avais indiqué aussi que concernant la couleur vous ne l'apprenez pas par cœur vous avez juste besoin. Vous aurez votre cahier pour l'utiliser lorsque l'on fera les modèles moléculaires donc le noir vous l'avez noté ce n'est pas à apprendre par cœur.*
>
> *[>P] : On passe au suivant hydrogène oui*
>
> *[>E] : euh grand H*

[>P] : oui H majuscule. La couleur tu t'en souviens ?

[>E] : blanc

[>P] : d'accord ce sera blanc. On passe au suivant l'oxygène

[>E] : O

[>P] : OK O. Lève la main Stéphane. O majuscule et la couleur Mathieu ?

[>P] : j'ai pas entendu

[>E] : rouge […]

(Séance n°1 - Épisode 2 - Annexe 9)

Le mot « couleur » et les noms des couleurs correspondent au deuxième groupement de mots le plus cité par l'enseignant après « atome » et avant « molécule ». Il apparaît soixante-seize fois dans la transcription contre cent une fois pour le mot « atome » et soixante-deux fois pour le mot « molécules » comme nous allons le vérifier un peu plus loin (Tableau 18). Donc dans la séance 1 l'atome semble être caractérisé par son symbole et la couleur associée dans le modèle moléculaire. Cette dernière semble bien un signe distinctif qui permet de différencier les « différentes sortes » d'atomes.

[>P] : […] lorsque vous présentez le dioxyde de carbone déjà quelle est la première chose qui vous saute oui ?

[>E] : il y a du noir

[>P] : donc vous allez avoir du rouge et du noir. Automatiquement quand vous voyez qu'il y a deux couleurs différentes c'est que l'on a assemblé dans cette molécule des atomes de différentes sortes.

(Séance n°1 - Épisode 10 - Annexe 9)

Le modèle moléculaire est ce qui permet à l'enseignant de définir l'atome et la molécule.

[>P] : L'atome c'est quand vous avez la sphère seule, la bille seule alors qu'à partir où vous avez des molécules elles vont se mettre par plusieurs pour former justement une molécule.
(Séance n°1 - Épisode 7 - Annexe 9)

La couleur est d'ailleurs la seule caractéristique discriminante des billes. Leur taille n'est jamais évoquée au cours de la séance. Pourtant la bille blanche de l'hydrogène est bien représentée plus petite que celle du chlore par exemple (Photo 7).

2.4.1.1.2 Concept de molécule

La molécule est définie comme un assemblage d'atomes. Que le nombre de chaque type d'atomes soit une caractéristique de la molécule n'est jamais précisé par l'enseignant au cours de la séance. Au contraire, au moment où il définit la notion de molécule, il est possible de penser que le nombre d'atomes est variable.

> *[>P] : Donc quand vous avez l'atome seul on parle d'atomes. A partir du moment où ils vont se mettre plusieurs par deux par trois par la quantité qui sera indiquée vous avez ce que l'on va appeler la molécule. […] Donc on vient de dire justement que lorsque vous prenez donc la sphère seule donc l'atome donc c'est l'oxygène. A partir du moment où vous en prenez deux très rarement elles vont rester seules elles vont toujours se regrouper par deux par trois etcetera. (Séance n°1 - Épisode 7 - Annexe 9)*

Comme indiqué dans la partie 1, nous pouvons qualifier les arguments utilisés par Mathieu de téléologique (Talanquer, 2007). Les atomes ne veulent pas rester seuls et se regroupent. Au cours de l'entretien, nous demandons à Mathieu s'il pense revenir avec les élèves sur la nature et le nombre d'atomes dans la molécule. Nous l'informons des confusions que peuvent faire les élèves dans le cas de deux formules proportionnelles en nombre d'atomes. Il nous indique qu'il n'a pas connaissance de cette difficulté et que cela n'est pas suggéré dans les programmes.

> *[>P] : non c'est quelque chose dont je ne parle pas. Ça n'est pas dans les programmes. Oui mais après c'est vrai que même de moi-même c'est quelque chose que je n'avais pas en tête. Cela pourra après être modifié mais je n'en parle pas, le fait que cela doit être bien fixé. Je n'en parle pas du tout et que c'est pas du tout proportionnel. Non ça je n'en parle pas. (Entretien 1 - Lignes 93-96 - Annexe 12)*

Il indique à la fin de l'entretien (Entretien 1 - Lignes 165-168 – Annexe 12) qu'il essaiera très certainement de travailler davantage avec les élèves à partir de la comparaison des formules CH_4 et C_2H_8. Enfin les molécules ne sont pas présentées en lien avec l'espèce chimique. Il n'est jamais dit explicitement qu'une espèce chimique est nécessairement constituée d'un seul type de molécule. La molécule de monoxyde de cuivre est présentée pour la première fois aux élèves. Mais aucune caractéristique de l'espèce chimique n'est donnée : son aspect, ses propriétés, où on peut la trouver, etc.

2.4.1.2 Séance 2

2.4.1.2.1 Concept de molécule

Aude introduit les molécules à partir de la représentation particulaire d'un gaz présentée à la séance précédente. Comme pour Mathieu, le lien entre molécule et espèce chimique semble toujours implicite et, même si cela a été fait précédemment, il n'est jamais indiqué au cours de cette séance qu'une espèce chimique est constituée d'un très grand nombre de la même molécule. Rien n'est proposé pour faire la distinction entre les propriétés des molécules et les propriétés des espèces chimiques. Pourtant une question posée par un élève nous confirme ce qui a déjà été observé dans de nombreuses recherches : les élèves ont tendance à associer aux molécules les mêmes propriétés qu'aux espèces chimiques (Harrison & Treagust, 2002).

> *[>E] : […] Là la molécule elle est à l'état solide, est-ce que ça peut être un état gazeux ? (Séance n°2 - Épisode 41 - Annexe 10)*

La molécule est caractérisée par le nombre et le type d'atomes présents dans la formule chimique.

> *[>P] : une molécule peut se représenter par sa formule chimique. Alors qu'est-ce qu'elle nous indique cette formule ? Elle nous indique beaucoup de choses. Cette formule nous indique le nom de chaque atome présent, le nom de chaque atome présent […] Donc le nom, le nombre d'atomes de chaque type. (Séance n°2 - Épisode 34 - Annexe 10)*

Mais, comme Mathieu, le fait que si le nombre d'atomes varie on obtient alors une autre molécule n'est jamais explicité. Quand au cours de l'entretien nous présentons les résultats de la comparaison entre CH_4 et C_2H_8 du questionnaire élève, Aude ne semble pas comprendre comment les élèves peuvent se tromper.

> *[>P] : Non je ne fais pas travailler cette partie-là. J'ai du mal à comprendre pourquoi ils répondent que c'est la même. Que cela puisse être la même. (Entretien 2 - Lignes 38-39 - Annexe 13)*

Et quand nous lui demandons pourquoi elle a du mal à comprendre cela, elle considère qu'il n'y a pas d'ambiguïté possible à partir de la définition de la formule chimique qu'elle donne aux élèves.

> *[>P] : (silence) Ben comme moi je leur parle que des atomes. Enfin quand je leur pose cette formule là, enfin une formule brute, je leur explique qu'une formule brute égale une certaine association. Donc si on propose des chiffres différents ben forcément, j'ai, pour moi dans ma tête j'espère qu'ils comprennent que c'est une autre association. Et donc qui dit autre association dit autre molécule. (Entretien 2 - Lignes 41-44 - Annexe 13)*

Pourtant, après réflexion, elle a bien conscience qu'il existe une difficulté quand elle écrit les transformations chimiques.

> *(Silence) En fait, moi je, je fais peut-être la distinction mais euh un peu plus tard quand je parle des transformations chimiques et quand j'ajoute les coefficients. Alors par contre ça c'est très compliqué avec des élèves de quatrième, entre mettre CO2 ou 2CO2. Là il me pose la question, alors pourquoi on met pas C2O4. Ça j'ai déjà eu la question. (Entretien 2 - Lignes 45-48 - Annexe 13)*

Le fait de savoir que les élèves confondent CO_2 ou C_2O_4 dans les équations chimiques ne l'a jamais incitée à insister sur ce point au moment de l'introduction des formules chimiques.

2.4.1.2.2 Concept d'atome

Comme pour Mathieu, il existe des atomes de nature différente. Mais en quoi se différencient-ils ? À la différence de Mathieu, Aude n'utilise pas encore les modèles moléculaires dans cette séance et n'utilise donc pas les couleurs pour caractériser la nature différente des atomes. Elle présente l'atome comme la particule élémentaire de la matière.

> *[>P] : Alors l'atome, on l'appelle aussi particule élémentaire de la matière. C'est à dire, c'est comme si on avait un élément de base, d'accord, à partir duquel on va pouvoir construire. (Séance n°2 - Épisode 12 - Annexe 10)*

L'expression « élément de base » utilisée par Aude pourrait laisser croire qu'il existe une entité unique qui constitue l'ensemble des molécules. Cette vision est assez proche des conceptions de la constitution de la matière de plusieurs scientifiques dans l'histoire des sciences, dont celle de Newton. Aude définit ensuite l'atome à partir de la notion d'élément chimique.

> *Alors pour faire simple, à votre niveau, vous retenez juste qu'un atome en fait, c'est la plus petite quantité d'un élément chimique. (Séance n°2 - Épisode 15 (suite) - Annexe 10)*

Nous avons l'impression qu'elle n'a pas d'autres moyens pour caractériser les différents atomes tout en sachant que cette notion est beaucoup trop compliquée pour les élèves. Elle ne la définit d'ailleurs pas aux élèves en indiquant qu'ils verront cela plus tard. On perçoit dans ces passages la difficulté de l'enseignant pour introduire la notion d'atome dans le cadre du programme de quatrième sans pouvoir détailler la structure de celui-ci.

> *[>P] : Je vous rappelle que l'année prochaine normalement vous verrez ce qu'est un atome plus dans le détail mais ça, ce sera l'an prochain. (Séance n°2 - Épisode 18 - Annexe 10)*

En effet, pouvoir décrire la structure électronique permettrait alors d'associer à chaque atome des caractéristiques autres que le symbole et permettrait de leur attribuer une identité.

2.4.1.3 Commentaires

Comme nous l'avons indiqué dans la partie 1, l'atome peut tout aussi bien être présenté comme un concept formel ou un concept catégoriel. Mais ce n'est pas l'hypothèse atomique permettant d'interpréter les transformations chimiques dans le modèle de la réaction chimique qui est retenue par Aude et Mathieu. L'atome est présenté en tant que particule élémentaire. Pour faire construire un concept catégoriel, l'enseignant doit apprendre aux élèves « à reconnaître et à distinguer les attributs qui le spécifient » (Barth, 2001, p. 37). Dans le cas présent, nous retrouvons l'étiquette « atome » dans les deux séances mais la seule caractéristique appliquée à l'atome est le symbole représenté par une lettre majuscule et éventuellement une lettre minuscule. Il y a donc ici confusion entre « attribut » et « étiquette ». Mathieu ajoute la couleur mais nous ne pouvons pas considérer cela comme un attribut de l'atome. Les deux enseignants semblent démunis, ce qui pour Aude, l'amène à introduire une notion encore plus complexe, l'élément chimique. Ils suivent l'un et l'autre les programmes qui ne proposent aucune caractéristique pour l'atome alors que la masse pourrait être utilisée à ce stade des connaissances. Ils ne présentent pas non plus la constitution électronique de l'atome introduite dans les programmes de troisième et qui pourrait leur permettre de les distinguer à partir du nombre d'électrons.

Par ailleurs, le nombre d'atomes en tant qu'invariant dans la formule chimique, et donc caractéristique d'une molécule, n'est jamais indiqué explicitement aux élèves. Aude et Mathieu ne semblent pas avoir conscience des difficultés des élèves sur ce point et sont surpris quand nous leur présentons les résultats du questionnaire. Enfin, ils n'utilisent pas non plus de façon explicite le registre empirique pour caractériser les espèces chimiques correspondant aux molécules étudiées. À aucun moment au cours des deux séances, il n'est indiqué qu'une espèce chimique est constituée d'une multitude de molécules toutes identiques.

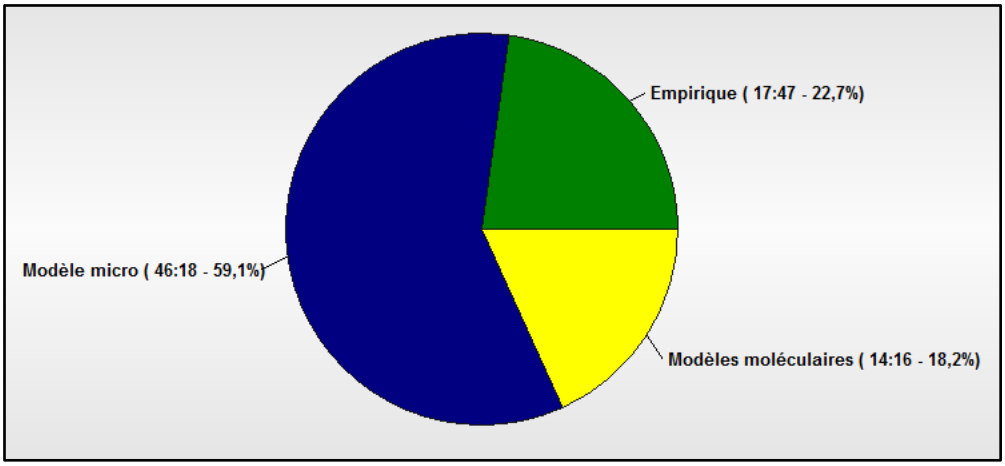
2.4.2 Le langage symbolique est-il rattaché au niveau microscopique ou macroscopique ?

Nous avons regardé à quel niveau, microscopique ou macroscopique, se situent les situations proposées par les enseignants et leur discours. Pour cela, nous utilisons à nouveau les

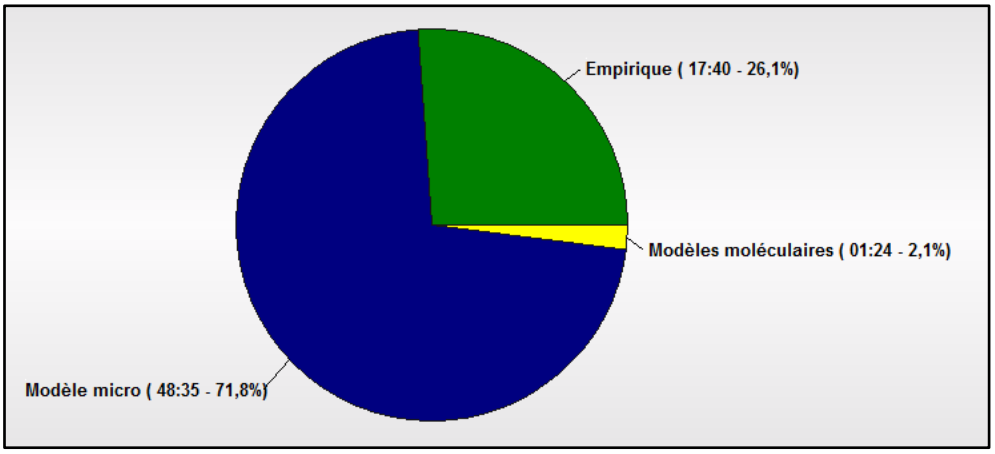
possibilités du logiciel SONAL pour l'analyse chronométrique. Puis nous étudions également le vocabulaire utilisé par les enseignants.

2.4.2.1 Niveau des situations proposées

Les mots-clés nous ont permis d'associer à chaque épisode les catégories en lien avec la thématique « registre de la chimie ». Comme pour la thématique « organisation du travail », le logiciel SONAL nous permet d'obtenir la répartition en durée et en pourcentage des registres empirique, modèles microscopiques, modèles macroscopiques et celui des modèles moléculaires dans lequel se situent les épisodes des deux séances. L'analyse chronométrique (Graphique 17 et Graphique 18) indique le temps passé dans chaque catégorie et nous permet de vérifier que plus de la moitié des épisodes se situent dans le registre des modèles microscopiques et donc au niveau microscopique : 59% pour Mathieu (Graphique 17) et 72% pour Aude (Graphique 18). Le registre empirique, qui est quant à lui du niveau macroscopique, représente au plus un quart des épisodes : 23% séance 1 (Graphique 17) et 26% séance 2 (Graphique 18).



Graphique 17 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de savoir travaillés au cours de la séance hors langage symbolique (séance 1)



Graphique 18 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de savoir travaillés au cours de la séance hors langage symbolique (séance 2)

Dans la séance 1, Mathieu consacre quasiment autant de temps au registre empirique qu'à celui des modèles moléculaires (Graphique 17). Enfin ni l'un ni l'autre n'évoque les réactions chimiques, ce qui correspond au « Modèle Macro » qui n'apparaît pas dans les graphiques.

2.4.2.2 Analyse des termes scientifiques du discours

Le logiciel SONAL nous permet d'obtenir la liste des mots utilisés au cours de chaque séance et leurs occurrences. Nous n'avons retenu que ceux ayant un lien avec le contenu scientifique. Nous avons fait certains regroupements sémantiques indiqués par le symbole « + » à côté du mot :

- Couleur(s)+ : les mots « couleur(s) » et les couleurs citées ;
- Symboles+ : chaque fois qu'un symbole chimique est cité ;
- Formule chimique+ : chaque fois qu'une formule chimique est citée ;
- Espèce(s) chimique(s)+ : pour espèce chimique, composé ou produit (les termes comme « corps pur », « substance », « réactif » n'apparaissent pas) ;
- Dimension+ : chaque fois que nous relevons un mot en lien avec les dimensions des particules ;
- Bille(s)+ : nous avons regroupé les mots boule(s) et bille(s) ;

Les mots sélectionnés ont été classés selon leurs occurrences (Tableau 18 et Tableau 19). Pour permettre de mieux visualiser les registres utilisés, les cases des tableaux ont été colorées comme indiqué ci-dessous dans le Tableau 17. Nous avons placé dans le registre modèle microscopique le mot « modèle(s) » dans la séance 2. Ce dernier est utilisé en effet dans le cas

du modèle particulaire permettant d'interpréter les propriétés des gaz. Le mot « modèle » pour la séance 1 est par contre toujours associé au modèle moléculaire.

Tableau 17 Correspondance des couleurs et des niveaux ou registres du Tableau 18 et du Tableau 19

Registre empirique	
Registre du modèle microscopique	
Registre symbolique	

Modèle moléculaire	
Autres	

Tableau 18 Occurrence des mots utilisés en lien avec les registres de la chimie (séance 1)

Séance 1		
Mot	**Occurrences séance 1**	**Registre**
atome(s)	101	Micro
couleur(s)+	76	
molécule(s)	62	Micro
oxygène	57	Symbolique
symboles+	47	Symbolique
hydrogène	43	Symbolique
carbone	39	Symbolique
formules chimiques+	35	Symbolique
formule(s)	34	Symbolique
modèle(s)	33	
cuivre	28	Symbolique
eau	27	Symbolique
symbole(s)	20	Symbolique
dioxyde	15	Symbolique
dioxygène	15	Symbolique
bille(s)+	12	
chiffre(s)	9	Symbolique
oxyde	8	Symbolique
dihydrogène	8	Symbolique
nature	7	Empirique
indice(s)	6	Symbolique

Tableau 19 Occurrence des mots utilisés en lien avec les registres de la chimie (séance 2)

Séance 2		
Mot	**Occurrences séance 2**	**Registre**
atome(s)	117	micro
molécule(s)	76	micro
carbone	55	symbolique
oxygène	53	symbolique
formule(s)	28	symbolique
formules chimiques+	26	symbolique
dioxyde	26	symbolique
symboles+	20	symbolique
oxyde	20	symbolique
gaz	20	empirique
dioxygène	19	symbolique
hydrogène	17	symbolique
couleur(s)+	15	
azote	14	symbolique
chiffre(s)	13	symbolique
élément(s)	12	
eau	10	symbolique
dimension+	9	micro
particule(s)	8	micro
Avogadro	7	
indice(s)	6	

espèce(s) chimique(s) +	5	Empirique
air	4	Empirique
liaisons	4	
gaz	3	empirique
azote	3	symbolique
transformation(s)	1	empirique
solide(s)	1	empirique

plastique(s)	6	empirique
métal	5	empirique
bille(s)+	4	
nature	4	empirique
mélange	4	empirique
liquide(s)	4	empirique
espèce(s) chimique(s) +	3	empirique
air	3	Empirique
transformation(s)	3	Empirique
modèle(s)	2	Micro
cuivre	1	symbolique
symbole(s)	1	symbolique
dihydrogène	1	symbolique

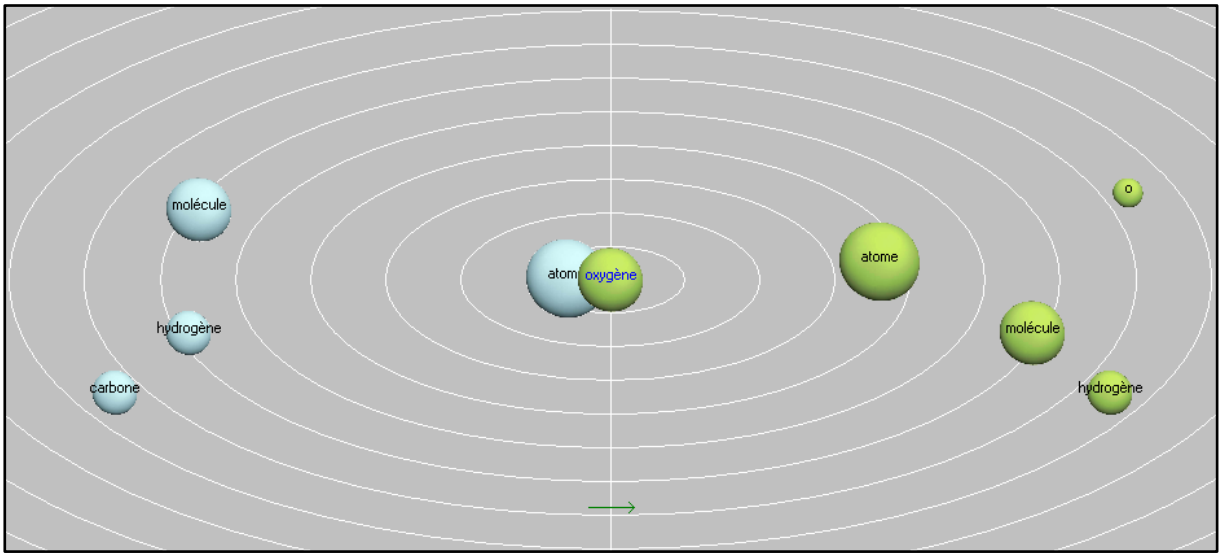
En lien avec le thème central des séances, les termes les plus employés font partie du registre symbolique, noms ou formules, avec trois cent quatre-vingt-quatorze apparitions dans la séance 1 (Tableau 18) et trois cent dix dans la séance 2 (Tableau 19). Dans la séance 1 (Tableau 18), les mots permettant de faire le lien avec le registre empirique, ou niveau macroscopique, ne sont cités que vingt et une fois contre cent soixante-trois fois pour les mots « atome » et « molécule » et, dans la séance 2 (Tableau 19), on compte cinquante-deux termes du niveau macroscopique contre deux cent douze du niveau microscopique. Sur l'ensemble des deux séances le mot « molécule » est cité cent trente-huit fois contre huit fois pour le regroupement « espèce(s) chimique(s)+ ». Le vocabulaire utilisé par les enseignants se situe très majoritairement au niveau microscopique.

Nous remarquons que les mots « microscopique » et « macroscopique » n'ont jamais été prononcés au cours des deux séances par les enseignants. Neuf occurrences, et uniquement dans la séance 2, caractérisent la taille des particules. Donc le fait d'associer les atomes et les molécules au niveau microscopique est à la charge de l'élève.

2.4.2.3 Liens entre le langage symbolique et les niveaux microscopique et macroscopique

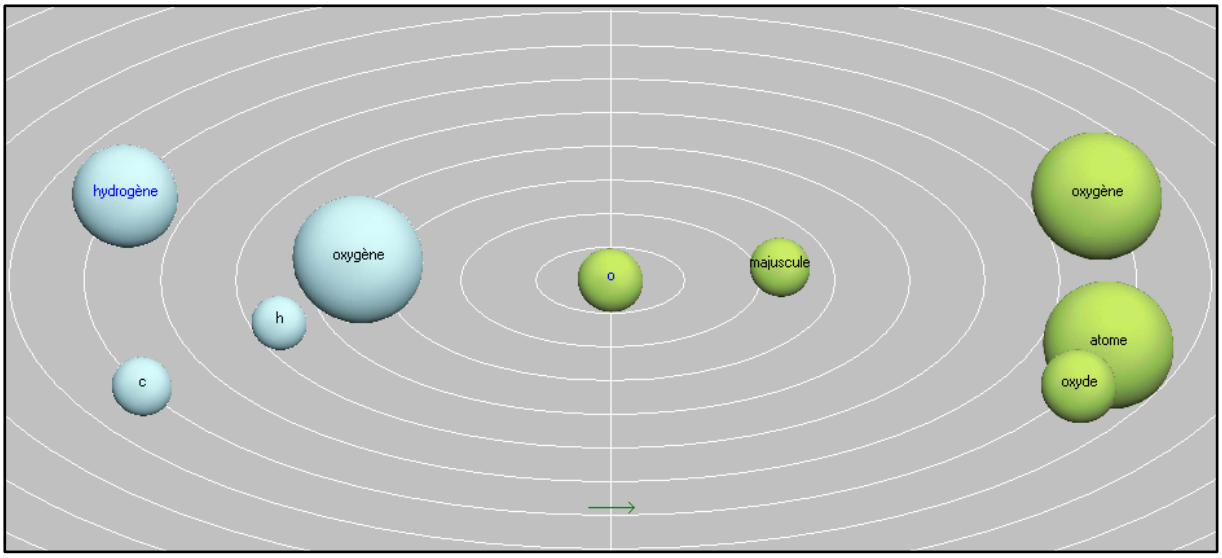
Nous venons de constater que le discours des deux enseignants se situe de façon prépondérante dans le niveau microscopique. Nous explorons maintenant le niveau auquel sont reliés les noms et les formules chimiques à l'aide du logiciel TROPES et les graphes en aire

(Graphique 19, Graphique 20 et Graphique 21). Ce type de graphe permet de visualiser les relations entre différentes classes de mots équivalents d'un point de vue sémantique. Nous avons recherché les associations qui sont faites entre certains noms chimiques et certaines formules chimiques dans l'ensemble des deux transcriptions qui ont été regroupées pour cette étude. Dans les graphes, une classe de mots équivalents est représentée par une sphère. La surface de chaque sphère est proportionnelle au nombre d'occurrences des mots de la classe équivalente. La distance entre la sphère centrale étudiée et les autres est proportionnelle au nombre de relations qui les lient. Plus les sphères sont proches, plus les liens entre les classes d'équivalents sont importants[23]. Nous avons tout d'abord comparé la classe « oxygène » (Graphique 19), qui comprend les noms oxygène et dioxygène, et la classe « O » (Graphique 20), qui comprend les symboles O et O_2. Ils correspondent l'un et l'autre aux occurrences les plus élevées respectivement pour les noms chimiques (cent quarante-quatre occurrences) et pour les symboles ou formules chimiques (vingt-sept occurrences). Le Graphique 19 montre que les relations avec « oxygène » se font dans le niveau microscopique (atome et molécule) et avec le registre symbolique (hydrogène, carbone, O) (Graphique 19). Dans le cas du symbole O ou de la formule O_2, les liens sont d'abord syntaxiques (majuscule) puis symboliques (oxygène, H, hydrogène, oxyde, hydrogène, C) et dans le niveau microscopique (atome) (Graphique 20). Dans les deux cas, nous n'observons pas de lien proche avec le niveau macroscopique.



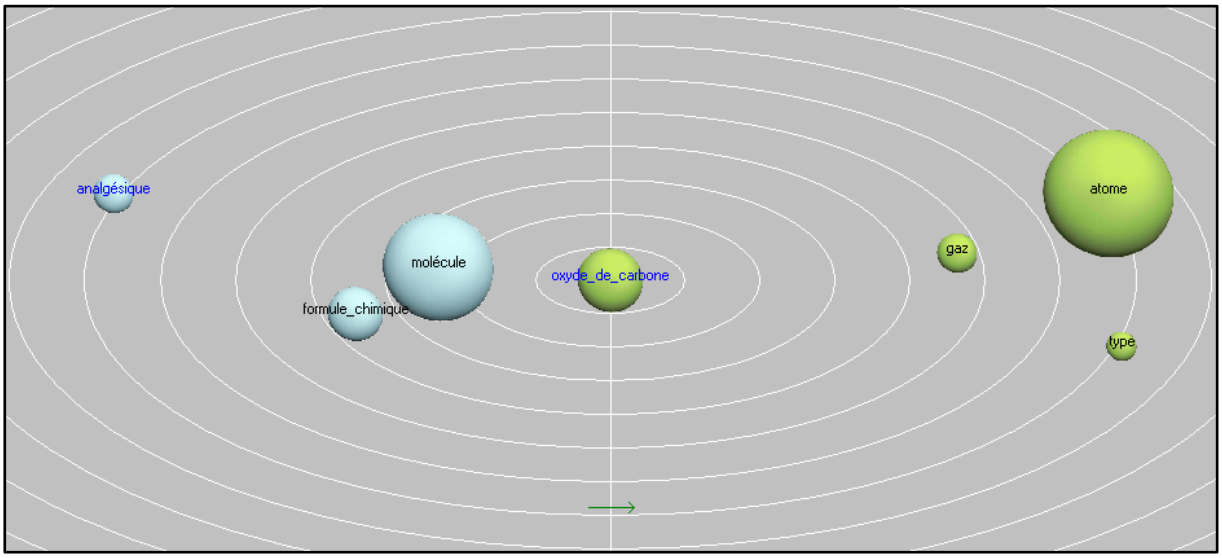
Graphique 19 Graphe en aire de la classe d'équivalent oxygène

[23] Les prédécesseurs de la classe centrale dans les phrases où les mots apparaissent sont situés à gauche dans le graphe et les successeurs à droite.



Graphique 20 Graphe en aire de la classe d'équivalent O

La classe d'équivalent « oxyde de carbone » vient juste après l'oxygène (cinquante occurrences). Sous cette dénomination sont regroupés les termes « dioxyde de carbone », « gaz carbonique » et « CO_2 ». Dans ce graphe (Graphique 21), nous voyons apparaître une référence empirique avec « gaz » mais la référence microscopique avec « molécule » reste à la fois plus proche et plus importante ainsi que le registre symbolique avec « formule chimique » (Graphique 21)[24].



Graphique 21 Graphe en aire de la classe d'équivalent oxyde de carbone

Nous avons également étudié les graphes pour l'eau et sa formule chimique et nous parvenons aux mêmes observations (Annexe 14).

[24] La classe « type » correspond au type d'atomes et « analgésique » fait référence au passage sur l'aspirine dans la séance 2.

2.4.2.4 Commentaires

Les deux séances se situent pour plus des trois quarts au niveau microscopique à la fois dans les situations proposées et dans le discours des enseignants. Cela semble parfaitement cohérent avec les programmes qui introduisent les symboles et les formules chimiques explicitement pour les atomes et les molécules. Très peu de liens sont proposés entre le registre symbolique (noms et formules) et le registre empirique. Au cours de l'entretien, Mathieu nous confirme bien qu'il ne fait jamais remarquer aux élèves que les noms et les formules représentent aussi bien les molécules que les espèces chimiques.

> *[>P] : C'est vrai que je ne parle pas que l'on est en train de travailler au micro et ensuite au niveau macroscopique. Non ça je n'en parle pas. (Entretien 1 - Lignes 74-75 – Annexe 12)*

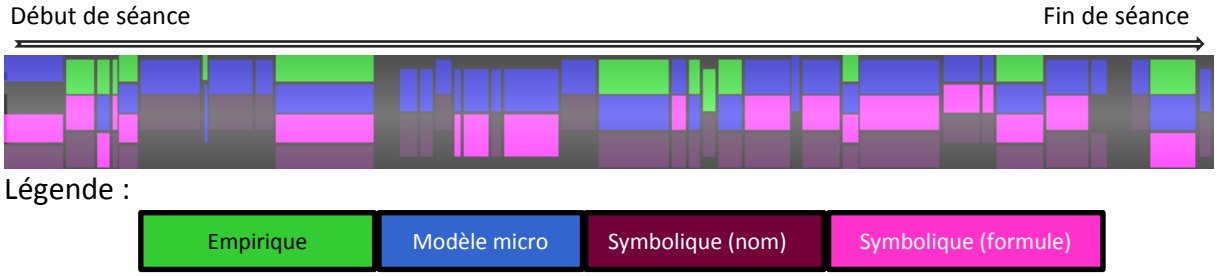
Pourtant plusieurs échanges au cours des séances semblent indiquer que les élèves ne sont pas capables de se repérer entre le registre empirique et le registre des modèles, notamment quand ils indiquent à Mathieu la composition d'une eau minérale alors que celui-ci attend la composition de la molécule d'eau. Mais il est vrai qu'il commence par demander ce qu'il y a dans l'eau sans spécifier le terme « molécule ».

> *[>P] : Est-ce que quelqu'un a en tête ce qu'il y a aussi dans l'eau ? (L'enseignant attend un peu) En général c'est aussi pourquoi je vous la présente parce c'est une formule comme vous avez vu en sixième en SVT le dioxyde de carbone CO2, l'eau c'est une molécule qu'on vous parle assez régulièrement. Oui Hugo*
>
> *[>E] : calcium*
>
> *[>P] : il n'y aura pas de calcium.*
>
> *[>E] : chlore*
>
> *[>P] : pas de chlore ça après ce sera lorsque l'eau est mélangée après tu peux avoir dans un récipient de l'eau avec du calcium c'est comme une eau minérale que tu bois il y a de l'eau et des ions, du calcium dedans d'accord. Il y a du ?*
>
> *[>E] : oxygène*
>
> *(Séance n°1 - Épisode 33 - Annexe 9)*

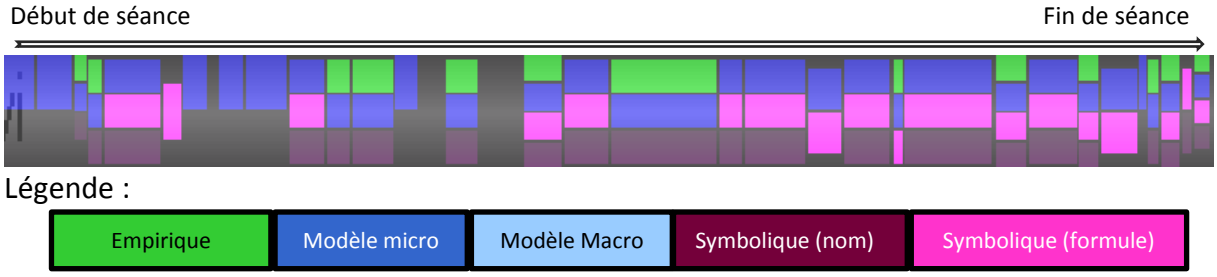
Nous pensons que les situations proposées dans le registre empirique par les enseignants ne sont pas assez nombreuses et que leurs discours ne permettent pas de faire le lien avec le niveau macroscopique. Nous cherchons à déterminer si l'utilisation de ce langage est cependant explicite.

2.4.3 Le niveau du langage symbolique est-il explicite ?

Le Graphique 22 et le Graphique 23 montrent le déroulé chronologique des catégories des registres de la chimie associées à chaque épisode. Cela permet de visualiser à quel niveau le langage symbolique est associé au cours de chaque épisode.



Graphique 22 Analyse chronologique de l'utilisation du registre empirique, du registre des modèles microscopique ou macroscopique et du registre symbolique (séance 1)

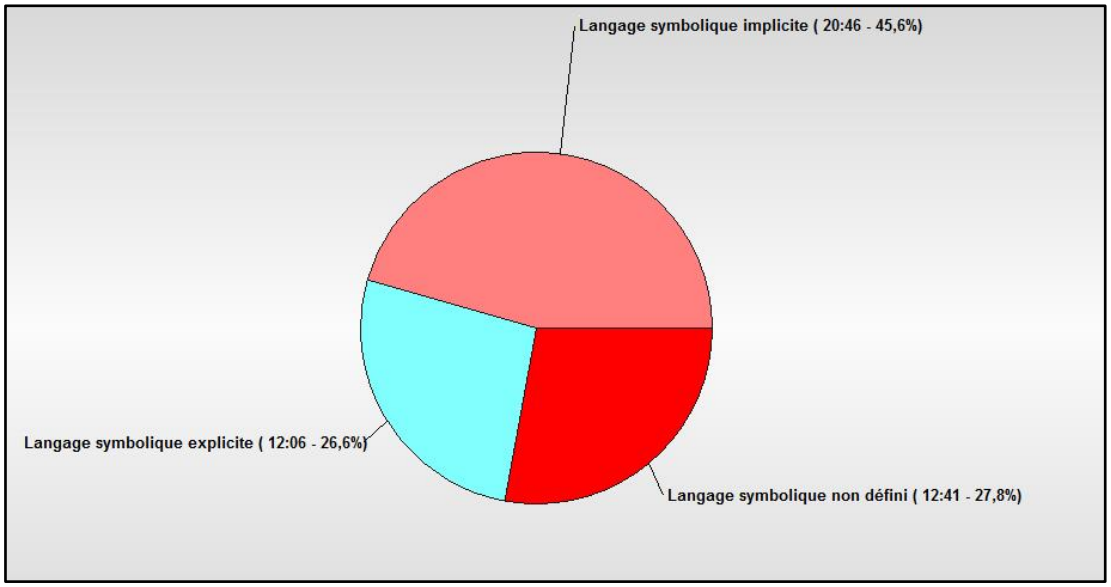


Graphique 23 Analyse chronologique de l'utilisation du registre empirique, du registre des modèles microscopique ou macroscopique et du registre symbolique (séance 2)

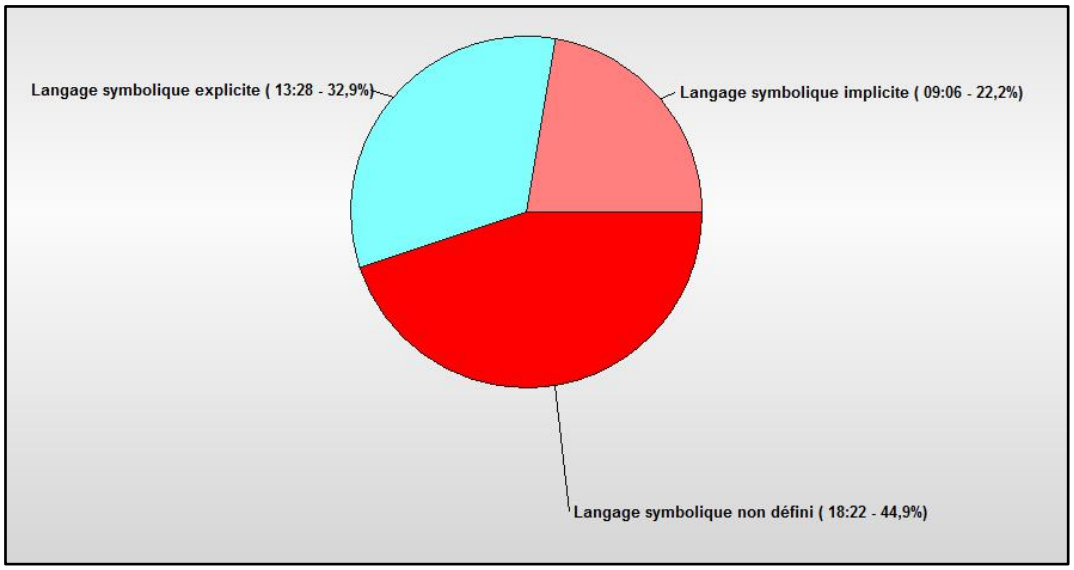
Ces deux graphiques nous permettent dans un premier temps de confirmer le lien préférentiel qui est établi entre langage symbolique et niveau microscopique. Le registre symbolique n'est pratiquement jamais utilisé seul avec le registre empirique. Nous repérons neuf épisodes dans la séance 1 (Graphique 22) et treize dans la séance 2 (Graphique 23) dans lesquels sont présentes à la fois les catégories « Empirique » et « Modèles micro » en lien avec les catégories « Symbolique (nom) » ou « Symbolique (formule) ». Nous examinons plus particulièrement ces épisodes pour déterminer s'il est possible pour un élève de repérer le niveau d'utilisation du langage symbolique.

2.4.3.1 Répartition dans les séances

Nous avons indiqué pour chaque épisode dans les transcriptions (Annexes 12 et 13) si le langage utilisé nous semble « explicite », « implicite » ou « non-défini ». Le logiciel SONAL permet d'obtenir les proportions entre ces trois critères (Graphique 24 et Graphique 25) pour chaque séance.



Graphique 24 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de langage utilisés (séance 1)

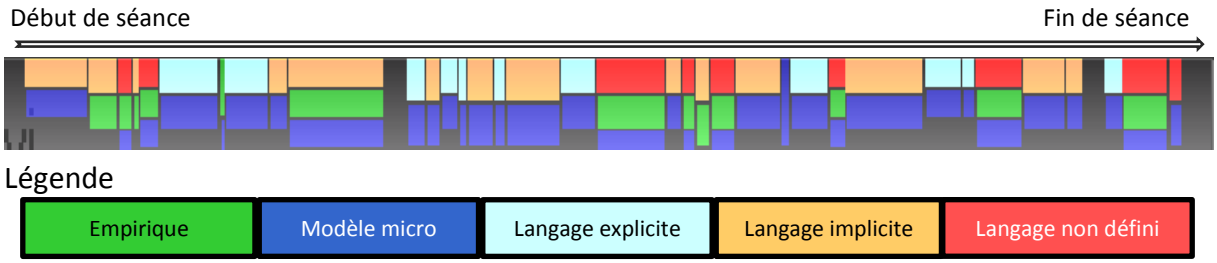


Graphique 25 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de langage utilisés (séance 2)

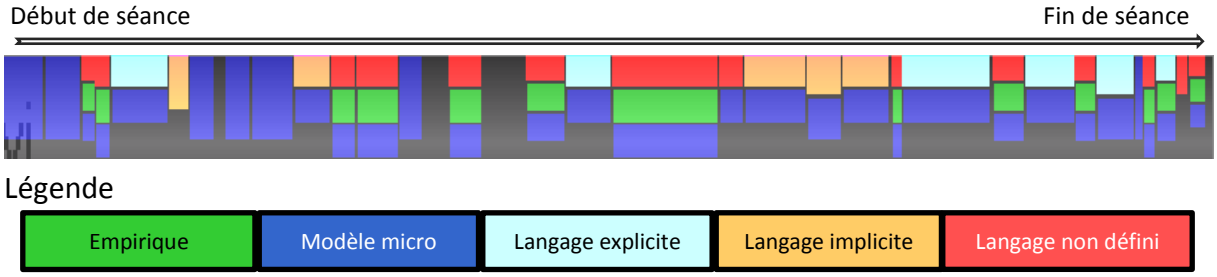
Quand les enseignants utilisent des noms, des formules ou des symboles chimiques, ils le font de manière explicite moins d'un tiers du temps (Graphique 24 et Graphique 25). Mathieu est plus souvent dans un registre implicite (45,6% - Graphique 24) et Aude dans un registre « non défini » (44,9% - Graphique 25). C'est notamment le cas quand elle introduit la notion d'élément chimique et dans la majorité des épisodes associés aux questions des élèves.

Nous avons repris l'analyse chronologique pour chaque séance avec les trois critères pour le langage et en ne conservant que le registre empirique ou le registre des modèles microscopiques. Chaque fois que l'un des critères pour le langage apparaît, le langage

symbolique est présent dans l'épisode. Pour alléger la représentation, les registres symboliques ont été retirés.



Graphique 26 Analyse chronologique des niveaux de langage utilisés en lien avec les registres de la chimie (séance 1)



Graphique 27 Analyse chronologique des niveaux de langage utilisés en lien avec les registres de la chimie (séance 2)

Dans les épisodes où nous retrouvons simultanément le registre empirique et le registre des modèles microscopiques, huit fois sur neuf dans la séance 1 (Graphique 26) et douze fois sur treize dans la séance 2 Graphique 27) l'épisode correspond au critère « langage non défini ». Nous considérons donc que, dans les épisodes où le langage pourrait être présenté aux élèves en tant que méta-niveau, il est impossible de savoir si les noms et formules cités correspondent à l'espèce chimique ou à la molécule. Il semblerait que les enseignants ne soient explicites qu'au niveau microscopique. Nous allons étudier plus précisément leur discours dans les épisodes incluant le registre empirique.

2.4.3.2 Analyse du discours dans les épisodes mentionnant le registre empirique

2.4.3.2.1 Séance 1

La première situation empirique proposée par Mathieu fait référence au gaz dioxygène (Épisode 3 de la transcription Annexe 9). Les termes « espèce » ou « substance chimique » ne sont jamais prononcés ainsi que nous pouvons le constater dans l'extrait ci-dessous.

> *[>P] : […] Vous avez également une explication 100% O2 gaz pour inhalation disponible etc. sous forme liquide enfin différentes indications. (Séance n°1 - Épisode 3 - Annexe 9)*

La formule « O_2 » est certes en lien avec le mot gaz, mais les difficultés des élèves de collège à considérer un gaz comme de la matière (Fillon, 1997) risque de les empêcher de faire le lien

avec le registre macroscopique. Nous considérons dans cet extrait que le niveau de langage est implicite. Dans l'épisode 5 (Annexe 9), suite à la réponse d'un élève proposant « CO_2 » comme entrant dans la composition de l'air, Mathieu ne précise pas que la formule représente dans ce cas l'espèce chimique et non de la molécule.

> *[>P] : Est-ce que vous vous rappelez aussi ce qu'on avait déjà un petit peu parlé lorsqu'un avait parlé de la composition de l'air ? Oui*
>
> *[>E] : CO2*
>
> *[>P] : alors CO2 on avait dit qu'il y avait ça on le verra un petit peu après c'est pour le dioxyde de carbone on avait dit qu'il y en avait dans l'air mais très très peu donc c'était pas dans la composition principale. (Séance n°1 - Épisode 5 - Annexe 9)*

Dans l'épisode 22 (Annexe 9), Mathieu associe le nom « monoxyde de cuivre » explicitement à une molécule. Dans l'épisode suivant, suite à la question de l'élève « *c'est quoi du monoxyde de cuivre* », Mathieu commence par associer explicitement le monoxyde de cuivre à l'espèce chimique puis il indique que cette espèce contient du cuivre. Il s'agit de l'élément chimique, notion encore inconnue des élèves, ce qui pose la question de ce que peut signifier le terme « cuivre » à cet instant. Les élèves peuvent tout aussi bien l'interpréter comme un atome ou comme une espèce chimique. Le nom « cuivre » n'est donc pas défini.

> *[>P] : monoxyde de cuivre c'est une espèce chimique qui contient du cuivre et qui a réagi avec le dioxygène. (Séance n°1 - Épisode 23 - Annexe 9)*

Puis Mathieu, en faisant référence à la transformation chimique, revient au niveau macroscopique et à l'espèce chimique pour le dioxygène mais cela reste implicite. Dans cette seule phrase[25], l'enseignant passe d'un langage explicite à un langage non défini pour finir par un langage implicite. Un élève questionne ensuite Mathieu à propos du cuivre solide. L'élève se situe au niveau macroscopique et donc de l'espèce chimique.

> *[>E] : mais du cuivre c'est pas du solide ?*
>
> *[>P] : si bien sur mais après on peut le trouver dans d'autres espèces chimiques.*
>
> *(Séance n°1 - Épisode 23 - Annexe 9)*

Dans sa réponse, Mathieu reste bien au niveau macroscopique mais il fait référence à l'élément cuivre et non à l'espèce chimique cuivre. Au cours de ces différents échanges avec

[25] La phrase est de plus bancale car ce n'est pas le monoxyde de cuivre qui réagit avec le dioxygène.

les élèves, Mathieu pourrait demander aux élèves de spécifier espèce chimique, atome ou molécule quand ils utilisent des formules ou des noms, mais il n'a pas ce réflexe. Il ne le fait pas non plus pour lui. Dans l'exemple ci-dessous, il commence par le registre empirique avec des noms et des formules qui, depuis le début de la séance, sont associés aux atomes ou aux molécules. Puis il rebascule en fin de phrase dans le registre microscopique.

> *[>P] : Donc vous retrouvez la fameuse formule que vous m'aviez parlé depuis la cinquième que vous avez vu certainement en SVT à chaque fois que l'on parlait du dioxyde de carbone c'était le gaz qui était présent dans les boissons gazeuses vous me parliez à chaque fois de CO2. […] mais à partir de maintenant vous savez que, le dioxyde de carbone, c'est constitué d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène. (Séance n°1 - Épisode 29 - Annexe 9)*

Il nous semble impossible pour un élève de savoir à quel niveau se situe l'enseignant. C'est encore le cas dans ce dernier exemple.

> *[>P] : […] Et donc là encore une fois, tu avais la présence du cuivre dans celle de l'espèce chimique cuivre dans cette poudre mais pourtant ce n'était pas la couleur orange que tu es en train de me parler. La couleur orange que tu es en train de me parler, c'est quand tu as le cuivre métallique. Que des atomes cuivre seul mis les uns à la suite des autres. (Séance n°1 - Épisode 25 - Annexe 9)*

À quoi correspond le nom « cuivre » ? La première fois, cela sans doute à l'atome ou à l'élément chimique, ce que les élèves ne peuvent pas comprendre. Ensuite le nom cuivre est associé à métallique. Il faudrait que les élèves interprètent le terme « métallique » comme renvoyant au niveau empirique. Mais tout de suite après l'enseignant utilise le terme « atome ». Et une nouvelle difficulté surgit. En effet, la juxtaposition de plusieurs atomes pourrait renvoyer à la notion de molécule ainsi qu'elle a été définie en début de séance, malgré l'utilisation du qualificatif « seul ».

2.4.3.2.2 Séance 2

Comme dans la séance 1, on trouve dans l'extrait ci-dessous les mêmes allers retours implicites entre le registre empirique, ou niveau macroscopique, et le niveau microscopique.

> *[>P] : […] C'est les deux gaz, le dioxygène et le diazote, c'est les deux gaz présents majoritairement dans l'air qu'on respire. Alors Solène je t'écoute ? […]*
>
> *[>E] : l'oxygène est un atome alors que le dioxygène est constitué d'atomes d'oxygène*

> *[>P] : donc très bien*
>
> *(Séance n°2 - Épisode 6 - Annexe 10)*

L'enseignant aurait pu là aussi utiliser la situation pour reprendre l'élève en indiquant que le gaz dioxygène est composé de molécules de dioxygène elles-mêmes composées de deux atomes d'oxygène. Nous pourrions penser que cette imprécision provient du discours oral mais nous la retrouvons dans la question 4 du texte de l'exercice (Annexe 11).

> *4) Tu as vu dans le premier chapitre que l'air était composé de dioxygène et de diazote : en t'aidant du texte ci-dessous, explique ce qui différencie l'oxygène du dioxygène. (Séance n°2 - Extrait de l'exercice1 – Annexe 10)*

Aude aurait pu préciser dans la question que l'air est composé de deux espèces chimiques : le dioxygène et le diazote. Mais sachant que dans cet exercice, elle souhaite surtout faire travailler la différence entre le nom « oxygène » pour l'atome et le nom « dioxygène » pour la molécule, la référence à l'air n'était peut-être pas nécessaire et s'avère au final source de confusion. Nous trouvons cette même imprécision dans le texte du deuxième exercice proposé aux élèves. C'est la molécule qui est présente sur Terre et non l'espèce chimique et l'état de gaz est également associé à la molécule.

> *Sur Terre, la molécule de dioxyde de carbone est présente sous forme de gaz qui contribue au réchauffement climatique : son nom sera donc souvent cité lors de la conférence. (Séance n°2 - Extrait de l'exercice2 – Annexe 10)*

Dans l'exemple suivant, le début du discours est explicitement macroscopique en indiquant que « *le CO_2 donc dioxyde de carbone est un gaz dissous* » puis Aude bascule tout de suite après au niveau microscopique.

> *[>P] : On avait dit tout simplement que le gaz qui était, qui faisait la boisson pétillante, c'était du dioxyde de carbone. OK donc rappelez-vous, cette molécule, elle ne vous est pas inconnue. (Séance n°2 - Épisode 22 - Annexe 10)*

Dans l'épisode 28 (Annexe 10), le fait que le terme « doliprane » corresponde à une marque et que le terme « aspirine » soit nécessairement associé à une molécule, semble une évidence pour Aude. Au cours de l'entretien, elle nous indique qu'il lui semble important de partir de la vie quotidienne pour illustrer le niveau microscopique.

> *Je prends toujours quelque chose avec la vie quotidienne. Là j'ai pris l'aspirine. Après voilà cela leur donne quelque chose et ils sont conscients que quand ils prendront de l'aspirine la prochaine fois c'est des molécules, c'est constitué d'atomes. Voilà. C'est pour toujours leur mettre quelque chose en rapport avec la vie quotidienne. (Entretien 2 – Lignes 16-19 – Annexe 13)*

Mais, comme pour Mathieu, toutes les précautions ne sont sans doute pas prises pour passer des exemples de la vie quotidienne aux molécules et aux atomes. Dans l'épisode 20 ci-dessous, la question de l'élève à propos du plastique, pour savoir si c'est une molécule ou un alliage, montre la confusion entre les niveaux microscopique et macroscopique. Aude ne la relève absolument pas et sa réponse peut en ajouter. Un élève de quatrième ne connaît pas les termes « plastique », « métallique », « alliage » et « élément ». Il sera donc difficile pour les élèves de comprendre le début de la réponse d'Aude. Mais elle associe ensuite le terme « mélange » du niveau macroscopique avec le terme « atome ».

> *[>E] : ben le plastique*
>
> *[>P] : oui*
>
> *[>E] : c'est une molécule ou c'est un alliage ?*
>
> *[>P] : alors dans le plastique. Quand on parle d'alliage c'est qu'il y a au moins un élément métallique. D'accord ? Avec soit un autre métal soit avec un autre composé. D'accord ? Pour les plastiques, y a pas de métal qui rentre en compte. Alors c'est un mélange de plusieurs atomes, en général, le plastique c'est des assez grandes molécules et il y a en général des sous-catégories de plastiques.*
>
> *(Séance n°2 - Épisode 20 - Annexe 10)*

Nous avons pu constater dans le questionnaire que les élèves associent la caractéristique « mélange » à une formule constituée de plusieurs atomes. La phrase prononcée par Aude ci-dessus, « c'est un mélange de plusieurs atomes », peut sans doute peut-être favoriser ce type de confusion.

2.4.3.3 Commentaires

À plusieurs reprises dans chacune des séances, nous trouvons des épisodes qui font appel à la fois au registre des modèles microscopiques et au registre empirique. Toutefois le discours des enseignants n'est pas suffisamment précis pour permettre aux élèves de repérer le registre à mettre en lien avec le langage symbolique. Il ne peut pas permettre aux élèves de

comprendre que les noms et les formules représentent aussi bien les molécules que les espèces chimiques selon le contexte. Ces deux séances sont ancrées dans le microscopique. Elles correspondent en effet à l'introduction des formules chimiques en lien avec les atomes et les molécules. Il n'y a sans doute aucune ambiguïté pour les enseignants qui considèrent dans cette séance que les noms et les formules proposés aux élèves en exemple ou en exercice sont représentatifs du niveau microscopique. Ceci pourrait être une des raisons de leur utilisation implicite du langage. Mais pour pouvoir intéresser les élèves et donner du sens au registre microscopique, ils utilisent plusieurs exemples dans le registre empirique. Or le lien entre langage symbolique et le niveau empirique est confus ou absent. Nous pensons que le problème ne vient pas uniquement d'un manque de précision du discours des enseignants mais aussi du fait qu'ils n'ont peut-être pas conscience que le langage symbolique est un méta-niveau et des ambiguïtés que cela peut entraîner chez les élèves si cet aspect n'est pas explicitement évoqué.

2.4.4 Quelles sont les raisons données quant à la constitution des formules chimiques ?

Dans cette dernière partie, nous cherchons dans un premier temps à repérer dans le discours des enseignants les raisons proposées aux élèves permettant de justifier les formules chimiques. Puis à partir des questions des élèves, nous cherchons à inférer les éventuelles raisons qu'ils imaginent.

2.4.4.1 Les enseignants

2.4.4.1.1. Séance 1

Comme nous l'avons déjà indiqué, Mathieu justifie les formules à partir du nom donné à la molécule. Par contre rien ne justifie ce nom. C'est un postulat. Dans la bonbonne de gaz, il y a du dioxygène, même si la publicité dit le contraire.

> *[>P] : c'est ce que l'on avait indiqué parce que vous ce que vous respirez* ***c'est du dioxygène*** *et non pas de l'oxygène. Donc c'est là où entre guillemets c'est une erreur sur le catalogue. […] (Séance n°1 - Épisode 6 - Annexe 9)*

Nous avons également constaté dans l'analyse des tâches, que si le nom ne donne aucune indication, les élèves doivent alors se rappeler la formule. Quand Mathieu essaie de justifier la constitution de la molécule, cela vient des atomes qui ne peuvent rester seuls et qui cherchent à se regrouper.

> *À partir du moment où vous en prenez deux très rarement elles vont rester seules elles vont **toujours** se regrouper par deux par trois etcetera. (Séance n°1 - Épisode 7 - Annexe 9)*

Mathieu illustre cela à l'aide des modèles moléculaires. Il mime le rapprochement des atomes et leur regroupement (Photo 8) et il explique que c'est le choix de l'expérimentateur de les lier ensemble.

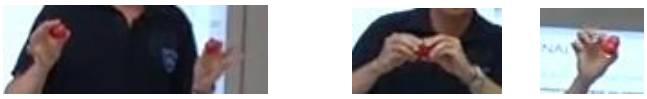


Photo 8 Utilisation des modèles moléculaires pour la molécule de dioxygène

> *[>P] : […] Donc à partir du moment **où vous les avez liées** ensemble c'est ce que l'on appelle une molécule. (Séance n°1 - Épisode 7- Annexe 9)*

Cela donne l'impression aux élèves que toute association est possible à partir du moment où elle est décidée par l'expérimentateur. Le regroupement peut être aussi le fruit du hasard en dépendant de la présence ou non des atomes au moment où la molécule se forme ou cela peut-être une « **tendance** ».

> *Donc là **par exemple si vous prenez ces deux atomes** d'oxygène ils vont **avoir tendance** à se regrouper ensemble pour former la molécule de dioxygène. (Séance n°1 - Épisode 7 (suite) - Annexe 9)*

Au cours de l'entretien, Mathieu ne voit pas comment justifier une formule chimique en dehors des modèles moléculaires.

> *[>P] : après c'est vrai que la seule façon de leur montrer c'est en leur donnant les modèles moléculaires. De voir qu'ils ne peuvent pas la construire. (Entretien 1 – Lignes 112-113 – Annexe 12)*

Pendant la séance, il utilise même le terme « *liaison* » pour justifier la formation de la molécule, l'assemblage restant le choix de l'expérimentateur en lien avec les possibilités des modèles moléculaires.

> *[>P] : […] vous allez avoir vos billes, donc les billes au départ vont être seules et vous allez avoir à disposition des petites tiges qui vont vous permettre de faire les liaisons entre les atomes […]. Vous prenez les deux avec une couleur rouge et tout simplement vous les mettez ensemble. (Séance n°1 - Épisode 7 - Annexe 9)*

Quand nous l'interrogeons à propos de l'utilisation du mot « *liaison* », Mathieu reconnaît lui-même qu'il se met en difficulté et qu'il ne pourrait pas donner d'explications si un élève lui

posait la question. Par contre en troisième après l'introduction de l'électron, il indique qu'il commence à utiliser les règles de Lewis.

> *[>I] : et alors par moment, tu as employé le mot liaison ou lié. Alors est-ce que c'est la première fois que tu en parles ?*
>
> *[>P] : oui […]*
>
> *[>I] : que veux dire ce terme lié pour toi à ce moment là ? S'il y en a un qui dit mais monsieur ça veut dire quoi lier ?*
>
> *[>P] : en quatrième j'aurais dû mal à répondre. En troisième on a commencé à faire la structure de l'atome avec les électrons, etcetera euh ce serait plus facile à expliquer en troisième avec euh mise en commun de commencer à parler un petit peu de Lewis. Donc là je parlerais plus en troisième. Donc je ferais la position de l'autruche en quatrième et je dirais je vous en parlerai en troisième. (Entretien 1 – Lignes 214-226 – Annexe 12)*

Pour mémoire, le modèle de la liaison covalente n'est introduit qu'à partir du programme de première depuis 2011 et l'était en seconde auparavant. Mathieu nous indique au cours de l'entretien (Lignes 238-241 – Annexe 12) qu'il ne sait pas comment historiquement est apparue la première représentation du trait de liaison, confirmant ainsi que la seule interprétation à sa disposition est le modèle de Lewis.

2.4.4.1.2 Séance 2

Aude, comme Mathieu, justifie la formule chimique par les noms et sinon fait appel aux souvenirs des élèves. Les formules sont dans un premier temps issues de textes historiques. Cela semble être une raison suffisante.

> *[>P] : […] Donc **on vous le dit dans le texte**, le dioxygène c'est une molécule. Donc si on va un petit peu plus loin, on vous donne la formule chimique du dioxygène. Alors c'est quoi, Matthieu ?*
>
> *[>E] : c'est deux atomes d'oxygène*
>
> *[>P] : alors parce que la formule chimique c'est quoi ? **C'est écrit dans le texte**. (Séance n°2 - Épisode 7 - Annexe 10)*

Il y a bien une tentative pour introduire une nécessité. Il faut que l'« *association* » des atomes soit « *cohérente* ».

> *Les atomes peuvent se combiner d'une certaine façon entre eux. D'accord. Et pour former, pour former **une association on va dire cohérente**, ayant une bonne cohésion, d'accord.*

> *Chaque atome est bien placé et **a envie**, entre guillemet, de rester là où il est. OK. (Séance n°2 - Épisode 45 - Annexe 10)*

Mais comme Aude ne peut expliquer cette cohésion, cela se transforme en une raison anthropomorphique avec un atome qui « *a envie* » de rester avec les autres. Elle utilise à nouveau cet argument au cours de l'entretien quand elle nous explique ce qu'elle répond aux élèves qui lui proposent d'écrire C_2O_4 au lieu de $2CO_2$ dans les équations de réaction. Cette fois-ci, il s'agit du bien-être des atomes.

> *Parce que C2O4 c'est, c'est enfin j'ai dit que ce n'est pas réalisable. CO2 ça s'associe d'une certaine façon. Les atomes vont s'associer et **vont être bien dans cet état là**. Dans cette configuration là. (Entretien 2 - Lignes 48-52 - Annexe 13)*

Si ce ne sont pas les atomes eux-mêmes qui se mettent en place, c'est alors le scientifique qui les combine comme dans l'exemple de l'aspirine ci-dessous.

> *[>P] : en fait pour faire une molécule d'aspirine, **on va aller chercher** : 9 atomes de carbone, 8 atomes d'hydrogène, 4 atomes d'oxygène. **On va essayer de combiner le tout**. (Séance n°2 - Épisode 45 - Annexe 10)*

Comme Mathieu, les seules solutions sont pour Aude :

- soit de repousser l'explication aux années ultérieures car c'est encore trop compliqué à expliquer ;

> *Alors comment ça se combine. Ça, c'est pas simple à comprendre quand on est élève de quatrième. On explique cela bien plus tard. (Séance n°2 - Épisode 45(suite) - Annexe 10)*

- soit d'utiliser dans la séance suivante les modèles moléculaires pour justifier les formules et montrer celles qui sont possibles ou non avec le nombre de trous dans les billes.

> *[>P] : […] avec par exemple pour le carbone, j'ai quatre trous. Pas un de plus. Donc je leur montre que des fois c'est pas possible d'associer, exemple, je vais prendre une bêtise, exemple, je vais prendre un carbone avec cinq hydrogènes, c'est pas possible. (Entretien 2- Lignes 61 – 68 – Annexe 13)*

Au final, comme Mathieu, Aude est démunie s'il faut expliquer aux élèves les liaisons entre les atomes.

> *[>P] : en fait quand je me pose la question, je me dis en même temps comment expliquer euh autrement. Voilà. En fait j'essaye toujours, surtout au collège, j'essaye d'expliquer le*

plus simplement possible mais c'est vrai en fait on ne peut pas tout dire. Enfin le principe de liaison, je ne me vois pas expliquer le principe de liaison. Alors je leur montre qu'il y a un lien avec le petit morceau en plastique qui relie ma petite boule noire à ma petite boule rouge ou ma petite boule blanche mais euh. Je parle d'un ensemble cohérent. (Entretien 2- Lignes 84 – 88 – Annexe 13)

2.4.4.2 Les élèves

Pour mémoire (Graphique 15 et Graphique 16), nous avons relevé respectivement sept et dix épisodes pendant lesquels les élèves ont posé des questions au cours de la séance 1 et de la séance 2. Nous allons analyser certaines de ces questions montrant tout d'abord la curiosité des élèves cherchant à comprendre les assemblages d'atomes puis celles qui nous semblent correspondre à des raisons qu'ils avancent.

2.4.4.2.1 Curiosité des élèves

Les élèves ne posent pas de questions à propos des formules telles que H_2O ou CO_2. Celles-ci sont habituelles dans les cours de chimie ou de Sciences de la Vie et de la Terre. CO_2 est même passé dans le langage courant. Les élèves ne sont donc pas surpris par ces formules, ce qui n'est pas le cas par exemple de la formule de l'aspirine. Celle-ci contient beaucoup plus d'atomes que toutes les formules qu'ils ont déjà rencontrées. Un élève cherche alors à savoir pourquoi, ce qui met Aude dans l'embarras. Aucune réponse satisfaisante n'est sans doute possible à ce stade.

[>E] : pourquoi madame il y en a autant ?

[>P] : C'est comme ça, c'est une molécule qui est assez grande, d'accord. Et encore celle-ci c'est loin d'être la plus grosse.

[>E] : il peut y en avoir plus ?

[>P] : mais évidemment.

(Séance n°2 - Épisode 40 - Annexe 10)

Mathieu semble également soulever la curiosité d'un élève en proposant la formule CUO et en indiquant que la molécule correspondante n'existe pas. Nous avons vu que dans l'épisode 7, les élèves peuvent penser que l'assemblage des atomes dépend de l'expérimentateur. Un élève demande pourquoi CUO ne peut pas exister. La première réponse de Mathieu est plutôt vague et fait appel à une notion inconnue des élèves : la structure des molécules. Elle ne satisfait pas l'élève.

> *[>P] : parce que au point de vue structure, cela ne peut pas exister.*
>
> *[>E] : mais pourquoi ça peut pas exister ?*
>
> *[>P] : on expliquera après avec les modèles moléculaires.*
>
> *[>E] : ah*
>
> *(Séance n°1 - Épisode 27 - Annexe 9)*

Il nous semble pourtant que Mathieu aurait pu rester sur la contrainte empirique et indiquer à l'élève que les chimistes n'ont jamais trouvé dans la nature une espèce chimique dont la molécule est composée d'atome de carbone, d'uranium et d'oxygène. Au lieu de cela, il préfère justifier à partir des modèles moléculaires. Mais les élèves cherchent aussi les raisons qui font que les atomes peuvent rester ensemble en demandant s'ils peuvent se détacher dans l'épisode 8 ou dans l'épisode 18 de la séance 1.

> *[>E] : alors deux atomes d'hydrogène, ils sont pas collés alors ? (Séance n°1 - Épisode 18 - Annexe 9)*

Il y a même un élève qui voudrait comprendre la couleur rouge des billes d'oxygène.

> *[>P] : […] je vous avais expliqué que les deux petites particules réunies, cela faisait deux petits cercles rouges et tout simplement on allait l'expliquer c'est ce qu'on va expliquer maintenant, enfin dans quelque temps*
>
> *[>E] : et vous allez expliquer pourquoi elles sont rouges ?*
>
> *[>P] : ben bien sûr.*
>
> *(Séance n°2 - Épisode 5 - Annexe 10)*

Aude n'a sans doute pas perçu le caractère réel, pour l'élève, de la couleur associée à l'atome.

2.4.4.2.2 Propositions de raisons

Dans deux exemples qui suivent, les élèves cherchent des raisons à l'existence des combinaisons des atomes. Par exemple, pourquoi est-ce O_2 et pas O ?

> *[>E] : alors on a plus d'oxygène parce que l'on en a besoin pour vivre ?*
>
> *[>P] : alors on a plus d'oxygène, on en a besoin pour vivre. Alors c'est pas aussi simple que ça. (Séance n°2 - Épisode 32 - Annexe 10)*

Le scientifique peut-il réaliser les combinaisons comme il le souhaite et dans ce cas réaliser O_3 ?

> *[>E] : Euh est-ce que maintenant les scientifiques sont capables d'assembler eux-mêmes les atomes ? Par exemple trioxygène (Séance n°2 - Épisode 36 - Annexe 10)*

Les raisons invoquées par les élèves semblent plutôt anthropocentrées mais peut-il en être autrement ?

2.4.4.3 Commentaires

Les contraintes proposées pour justifier les formules semblent provenir soit des modèles moléculaires qui permettent de lier ou non entre eux les atomes, soit d'une vision anthropomorphique et des explications téléologiques avec des atomes qui ont envie d'être ensemble, soit d'une vision anthropocentrique dépendant alors du choix de l'expérimentateur. Ou alors c'est le fait du hasard. Au final, la formule chimique découle du nom chimique qui est présenté comme une assertion. Chaque fois que cela est possible, Aude et Mathieu s'appuient tous les deux sur le nom pour créer une contrainte rendant ainsi nécessaire la formule proposée. Mathieu finit par présenter les liaisons entre les atomes mais il ne voit pas comment faire en quatrième pour les justifier en dehors du modèle de Lewis. Les élèves ont posé des questions quant à l'élaboration des molécules et des raisons qui amènent la formule proposée. Leur curiosité semble indiquer leur probable adhésion à la résolution de tâches complexes à ce sujet. Au cours des entretiens, nous sentons Aude et Mathieu démunis pour justifier la composition d'une molécule. Mais ont-ils les connaissances didactiques et épistémologiques pour cela ? Aucun des deux n'imagine qu'un élève puisse voir la même molécule dans deux formules proportionnelles. Aucun des deux ne propose de justifier les formules à partir de contraintes empiriques, ce qui, comme nous allons le voir dans la partie 3, a permis aux chimistes du XIXe siècle d'élaborer les premières formules sans connaissance de la structure électronique de l'atome.

2.4.5 Conclusion de l'analyse de l'utilisation des registres de la chimie, des niveaux et du langage symbolique

Nous observons des choix analogues pour les deux enseignants en termes de contenus. Tous les deux font le choix d'un concept catégoriel pour l'atome, qu'ils caractérisent par son symbole, et d'une formule chimique qui se déduit du nom et se justifie par les modèles moléculaires. Les noms et les formules chimiques ne sont quasiment jamais utilisés pour représenter le niveau macroscopique. Et quand c'est le cas, c'est difficilement perceptible

pour l'élève, le discours de l'enseignant étant souvent soit implicite soit trop imprécis pour pouvoir y associer un niveau ou un registre identifié. Les élèves ne peuvent pas percevoir le langage symbolique comme un méta-niveau. En effet, à aucun moment les deux enseignants n'essaient de justifier les formules chimiques à partir de contraintes empiriques. Leurs seules justifications émanent du registre des modèles moléculaires. Or l'un et l'autre essaient de respecter la progression et les consignes du programme. Ils sont alors dans l'incapacité de justifier les formules. Ils semblent souvent démunis face aux questions des élèves.

3. Ce que disent et font les enseignants : conclusion

Le questionnaire initial a montré les difficultés des enseignants au moment de l'introduction des formules chimiques : difficultés pour établir des règles explicites, difficultés pour donner des justifications dans le cadre du programme et difficultés pour percevoir la spécificité du langage symbolique en tant que méta-niveau.

Dans les deux séances de classe observées, Aude et Mathieu effectuent des choix analogues quant aux contenus chimiques proposés et à l'organisation du travail adoptée. Ils proposent les mêmes présentations des concepts « atome » et « molécule ». Ils utilisent les mêmes registres de la chimie et les mêmes mises en relation avec le registre symbolique. Les contraintes institutionnelles semblent à l'origine de ces choix alors que le niveau de la classe et la vision personnelle de chaque enseignant à propos de l'enseignement les amènent à investir les marges de manœuvre possibles différemment dans les exercices et l'étayage. Nous retrouvons en cela des résultats déjà constatés dans plusieurs travaux en mathématiques et en chimie (Horoks, 2008 ; Kermen & Barroso, 2013 ; Robert, 2007 ; Roditi, 2003). Nous pensons que même si cette étude ne porte que sur deux enseignants, les régularités que nous avons pu observer correspondent à ce que nous pourrions appeler une séance ordinaire sur l'introduction des formules chimiques en quatrième.

Dans la théorie de l'activité et dans le cadre de la double approche des pratiques des enseignants, ce qui contribue pour une grande partie à l'apprentissage des élèves pour une notion visée, sont les activités chimiques des élèves à partir des tâches proposées par les enseignants (Robert & Vandebrouck, 2014). À partir de celles proposées pendant les deux séances, nous qualifions l'activité déclenchée chez les élèves d'activité « productive » (Pastré, 2007). Elle correspond à la réalisation d'exercices ou de réponses données aux questions

orales posées par les enseignants. Mais nous pensons que la réussite de ces tâches ne permet pas à elle seule la compréhension des concepts clés atome et molécule et du langage symbolique en tant que méta-niveau.

> *On peut transmettre des représentations, des savoirs ; on ne peut pas transmettre des concepts : les concepts ne peuvent être que le résultat d'une activité de conceptualisation. Ce fut l'intuition de Piaget : la dimension constructiviste de l'apprentissage. (Pastré, 2007, p. 56)*

Au cours des deux séances observées, nous n'avons pas relevé de traces de l'activité de conceptualisation. La dimension constructiviste nous semble absente.

Les tâches proposées dans les deux séances ne font quasiment pas appel au registre empirique. Celui-ci n'est pas suffisamment sollicité par les deux enseignants. À aucun moment les enseignants ne semblent percevoir l'intérêt de se référer au registre empirique pour élaborer le langage symbolique. Ce résultat semble tout à fait cohérent avec le fait que les élèves associent majoritairement les noms et formules au domaine microscopique dans les réponses au questionnaire élève. Les enseignants n'ont pas nécessairement conscience des difficultés des élèves dans leur utilisation du langage symbolique. Ont-ils conscience de la dualité macroscopique/microscopique de la chimie alors que celle-ci n'est jamais évoquée explicitement dans les programmes ou les ouvrages scolaires ? Les deux entretiens nous amènent à penser que non.

Que ce soit donc à partir du registre empirique mais également du registre des modèles, les formules ne sont jamais questionnées. En dehors de l'utilisation des structures électroniques des atomes, les enseignants questionnés ou filmés semblent démunis pour élaborer les raisons qui permettent de justifier telle formule plutôt qu'une autre. Dans le cas des deux enseignants observés, les formules proposées semblent plus correspondre à un savoir assertorique qu'apodictique. Nous n'avons observé que deux enseignants mais les résultats du questionnaire élève nous permettent de penser qu'il ne s'agit sans doute pas de cas isolés. Nous nous interrogeons alors sur les connaissances didactiques et épistémologiques des enseignants. Leur permettent-elles de concevoir ce qu'il est nécessaire de rendre explicite et de justifier pour le langage symbolique ?

Conclusion Partie 2

Cette étude semble indiquer que l'enseignement du langage de la chimie n'est pas une priorité dans les programmes français. Pourtant les élèves et étudiants jusqu'à la dernière année du secondaire éprouvent de grandes difficultés dans l'interprétation et l'utilisation de ce langage. Comme nous l'avons déjà indiqué dans la première partie, des études antérieures (Johnson, 2000 ; Solomonidou & Stavridou, 2000 ; Stavridou & Solomonidou, 1998) ont déjà montré l'importance de construire le concept de substance chimique en conjonction avec la notion de réaction chimique. Des travaux ont proposé des progressions pédagogiques pour relier les modèles microscopiques et macroscopiques (de Vos & Verdonk, 1987 ; Sanger, 2000), ou les formules et des modèles microscopiques (Roletto & Piacenza, 1994) ou encore les formules avec les représentations du modèle particulaire (Sanger, 2000). Des travaux récents (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014 ; Sevian & Talanquer, 2014) proposent une progression centrée sur le concept d'« identité chimique ». Tous ces aspects sont pertinents et ne peuvent être ignorés mais ne semblent pas inclure un apprentissage spécifique du langage chimique.

Dans les domaines de connaissances tels que les sciences- physiques, Weil-Barais (1994, p. 443) indique que de nombreux auteurs « *mettent l'accent sur le fait que les opérations de pensée, les concepts et les systèmes symboliques restent étroitement associés aux situations dans lesquelles le sujet a été amené à les utiliser* ». L'institution et les enseignants introduisent le langage symbolique de la chimie à un niveau microscopique. Nous constatons que les élèves continuent toujours à l'associer à ce niveau en fin d'études secondaires. Nous pensons qu'il est nécessaire de développer l'enseignement de la chimie avec le niveau macroscopique, et cela dès les premières années de l'enseignement de la chimie.

Nous avons observé ce que deux enseignants proposent au moment de l'introduction des formules chimiques au collège. Nous avons pu constater qu'ils semblent démunis pour justifier celles-ci aux élèves. Que ce soit dans les programmes, dans les ouvrages scolaires ou dans ce que proposent Aude et Mathieu, nous ne trouvons pas de travail en lien avec le registre empirique au moment de l'introduction de ces formules et le langage utilisé en collège n'est jamais explicitement relié au niveau macroscopique. La compréhension du langage symbolique en tant que méta-niveau reste à la charge de l'élève.

Le langage du chimiste pourrait-il être à l'origine d'une interprétation incorrecte du concept de substance chimique ou, au contraire, la compréhension erronée du concept de substance chimique amène-t-elle les élèves vers ces difficultés de lecture des noms et des formules ? Il est difficile de répondre par l'affirmative à cette question. Mais le fait que la vision des élèves des noms et des formules soit essentiellement microscopique ne semble pas provenir uniquement de la compréhension erronée de la notion de substance chimique. Nous faisons l'hypothèse qu'elle est aussi liée à une présentation et une utilisation du langage dans l'enseignement essentiellement en lien explicite avec le modèle microscopique de la matière. Cela peut constituer un obstacle pour l'apprentissage de la chimie.

Une progression reliant le macroscopique, le microscopique et le langage symbolique nous semble nécessaire. Il est possible, pour introduire le langage symbolique, de proposer auprès des élèves un travail autour de l'élaboration des formules en cherchant les raisons empiriques et théoriques qui justifient une formule plutôt qu'une autre. Les scientifiques au cours de la première moitié du XIXe siècle ont été capables de proposer des formules avec un modèle de l'atome proche de celui que connaissent les élèves en collège, un modèle sans connaissance des structures électroniques, en partant de leurs connaissances empiriques. Nous pensons que l'histoire de l'élaboration du langage symbolique peut nous fournir les outils pour une séance présentant les formules chimiques.

> *« Sans doute pour toutes connaissances, les premières leçons demandent des prouesses pédagogiques. » (Bachelard, 2010, p. 30)*

Partie 3 : Enquête historique

INTRODUCTION **226**
CHAPITRE 1 : ÉLABORATION DU LANGAGE **227**
1. AVANT LAVOISIER : LE PASSAGE À UNE SCIENCE 228
2. LAVOISIER OU L'ÉLABORATION D'UNE NOMENCLATURE 229
3. LES FORMULES DE DALTON 231
3.1 La théorie atomique de Dalton 232
3.3 Les formules et les symboles de Dalton 234
4. LES FORMULES DE BERZELIUS 238
4.1 Une nouvelle écriture pour exprimer les proportions chimiques 238
4.2 Une écriture plus qu'une simple représentation : un « outil de papier » 240
4.3 Une écriture support d'une doctrine 241
4.4 La formule au centre des recherches 243
5. LES FORMULES DES ORGANICIENS 244
5.1 Évolution de la nomenclature 246
5.2 De la formule brute à la formule développée 248
5.3 Conclusion : la chimie organique ou un changement de paradigme 258
CHAPITRE 2 : LA FORMULE CHIMIQUE AU CŒUR DES DÉBATS **259**
1. UNE MÊME FORMULE MAIS PLUSIEURS INTERPRÉTATIONS 259
1.1 L'atome n'existe pas ou les équivalentistes 259
1.2 Les atomistes 270
2. DES CONTROVERSES 276
2.1 La confusion règne dans les formules 277
2.2 La formule de l'eau a changé plusieurs fois 278
2.3 La formule des corps simples 282
3. UNE FORMULE MACROSCOPIQUE OU MICROSCOPIQUE ? 289
3.1 Pour un équivalentiste 289
3.2 Pour un atomiste 290
3.3 Discussion 291
CONCLUSION DE L'ENQUÊTE HISTORIQUE **292**

Introduction

Pour Dagognet, le problème de la représentation en chimie se subdivise en trois parties : *« le nom, la peinture, la fresque* » (2002, p.7). Il faut :

- nommer les espèces chimiques ou le « *voco-structural* » (2002, p. 6). Le nom ne doit pas simplement servir à désigner ou à catégoriser. Il doit également servir à traduire la structure de la substance ;
- représenter les espèces chimiques ou ce que Dagognet appelle « *la langue écrite* » (2002, p. 172). Le système pictural doit à la fois permettre d'indiquer la composition de la substance et également éclairer sur les arrangements des différents constituants ;
- cartographier l'ensemble des familles chimiques en permettant d'avoir accès aux propriétés de chacune et aux liens possibles entre elles. C'est la classification périodique. Les chimistes arrivent à rassembler avec très peu de signes et quelques colonnes « *non seulement le réel dans toute son étendue mais avec aussi ses variétés* » (Dagognet, 2002, p. 7).

Nous allons nous intéresser à l'élaboration historique du langage en limitant notre étude aux deux premiers aspects : nommer et représenter. Dans les programmes de chimie en France, nous avons vu qu'ils correspondent aux premiers éléments de langage présentés aux élèves : les noms chimiques et les formules chimiques (ou formules brutes) au cycle 4 en lien avec les notions d'espèces chimique pour les noms et d'atomes et de molécules pour les formules. Les formules développées sont introduites au lycée en lien avec la notion d'isomérie en seconde puis avec la liaison chimique en première Scientifique, même si nous pensons que le fait d'utiliser les modèles moléculaires dès la classe de quatrième fait déjà intervenir la notion d'arrangement des atomes au sein de la molécule.

Dans le premier chapitre de cette partie, nous allons étudier comment s'est élaboré le langage symbolique (nom et formules). À partir de la fin du XVIIIe siècle, les chimistes ont donc tour à tour nommé, écrit et dessiné les espèces chimiques ou les particules. Cette élaboration (nom, formule chimique, formule développée) débute avec la nomenclature de Lavoisier qui, pour Dagognet, « *allume délibérément l'incendie de la révolution chimique sémantique et*

ordinatrice » (2002, p. 7). Elle se prolonge avec Berzelius qui élabore et développe la « *langue écrite* » (Dagognet, 2002, p. 172) pendant la première moitié du XIXe siècle et elle se termine avec les organiciens, notamment Wurtz, qui ne peuvent plus, à partir de quatre lettres (C, N, H et O) et des formules chimiques de Berzelius, traduire toute l'explosion des nouveaux composés chimiques. La chimie de cycle 4 est avant tout orientée vers l'étude des molécules. Nous faisons donc le choix d'orienter l'étude historique essentiellement vers la chimie des gaz et non des solides. Nous n'étudierons pas le développement de la cristallographie au XIXe siècle et ses différentes représentations. Puis dans la deuxième partie, nous étudierons plus spécifiquement les controverses de la première moitié du XIXe siècle autour de l'élaboration des formules chimiques entre les atomistes et les équivalentistes ainsi qu'entre atomistes.

Chapitre 1 : Élaboration du langage

En reprenant le cours de l'histoire, nous allons montrer que les noms et les formules se sont développés en même temps que la chimie en tant que science. Le langage du chimiste est l'outil pour représenter les différents concepts ou modèles qui vont s'élaborer au cours du XIXe siècle (espèce chimique, atome, molécule, réaction chimique, etc.) mais nous voulons montrer qu'il est aussi l'outil qui permet de penser ces nouveaux concepts et modèles et qui permet de les faire évoluer (distinction atome et molécule, notion d'atomicité et arrangement des atomes dans la molécule, nouvelles synthèses chimiques, …). Nous débutons l'étude historique avec la chimie pré-lavoisienne dans laquelle les noms et symboles utilisés sont réservés à des initiés, ne font qu'illustrer les propos des chimistes et ne disent rien des concepts développés. Nous allons ensuite montrer qu'à partir de Lavoisier, le langage du chimiste s'élabore en lien étroit avec le développement des connaissances empiriques et le développement des nouveaux modèles d'interprétation, qu'il existe une dialectique entre le registre des représentations, le registre empirique et le registre des modèles. Nous allons pour cela distinguer quatre étapes :

- Lavoisier ou l'élaboration d'une nomenclature en lien avec le développement de l'analyse chimique et le développement de la notion d'espèce chimique et de corps simple ;

- Dalton ou l'élaboration des premières formules atomiques en lien avec la théorie des proportions définies et des combinaisons multiples ;
- Berzelius ou l'élaboration de la formule chimique en lien avec le développement des mesures quantitatives de poids, les théories sur les volumes de gaz, le développement de l'électrochimie amenant à une vision dualistique de la matière en termes d'interactions électrostatiques ;
- les organiciens : élaboration des formules développées en lien avec le développement des composés organiques, de la chimie de synthèse, de l'interprétation des réactions en termes de substitutions et de la notion d'isomérie amenant les chimistes à une interprétation en termes d'arrangement des atomes au sein de la molécule.

1. Avant Lavoisier : le passage à une science

La chimie ne commence à s'élaborer en tant que science qu'à partir du XVIIIe siècle (Annexe 15.1). Jusque-là, les outils de communication des chimistes (les noms, Annexe 15.2 ; les symboles, Annexe 15.3) ne semblent pas faits pour faciliter l'apprentissage de la chimie et son développement. La diversité des noms (Annexe 15.2) et la multiplication des symboles (Annexe 15.3) semblent ne contrarier en rien l'enseignement transmis « *d'adepte à initié* » (Ponot, 1971, p. 68-69). Mais au XVIIIe siècle avec l'évolution des chimistes vers des pratiques identifiées de laboratoire, les « *redondances et homonymies* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 64) sont enfin dénoncées comme telles. Des plaintes s'élèvent contre l'imperfection de la nomenclature. Dumas parle même de langage de cuisinière :

> *Ainsi, l'on disait : huile de vitriol, beurre d'antimoine, foie de soufre, crème de tartre, sucre de saturne ; les chimistes semblaient avoir emprunté le langage des cuisinières. (Dumas, 1836, p. 326)*

Un langage explicite, rationnalisé et accessible au plus grand nombre, devient nécessaire. Et cette nécessité devient pressante pour permettre le développement de la chimie et son enseignement en tant que discipline à part entière. Elle va s'opérer avec Lavoisier. Pour Laszlo (1993, p. 27), ce passage est une véritable « *rupture épistémologique* ».

Laszlo, présente deux extraits de texte, avant et après Lavoisier, portant sur un thème analogue de chimie. Le premier extrait provient des *Clefs de la philosophie spagyrique* de Le Breton (1722) :

> *L'union de l'esprit avec l'humide radical est d'autant plus forte que le mixte est plus libre des impuretés excrémentielles ; c'est, disent les Philosophes, le ciel et la terre conjoints et réunis, c'est le frère et la sœur, l'époux et l'épouse qui s'embrassent très étroitement.*

Le deuxième extrait est pris dans *les lettres de la chimie* d'Octave Ségur (1803) :

> *L'attraction de composition doit détruire la force d'agrégation qui unit les molécules. C'est pour faciliter l'action de l'attraction chimique qu'on broie, qu'on pile, qu'on fait ce qu'on appelle l'analyse mécanique des corps avant de les unir.*

Ces deux extraits illustrent pour Laszlo l'ampleur de cette mutation et le début d'une nouvelle science.

> *L'alchimie était aussi spiritualisme […]. Après Lavoisier, la chimie n'est plus que l'étude froide et réfléchie d'une matière sans âme. (Laszlo, 1993, p. 27)*

2. Lavoisier ou l'élaboration d'une nomenclature

Dès la moitié du XVIIe siècle, plusieurs chimistes tentent de rénover le langage : Macquer, van Bochaute, Bergman. En 1775, ce dernier essaie de remplacer les vieux noms par des dénominations systématiques mais il reste beaucoup trop ancré sur les vieilles théories (Sliwka, 2003). La chimie du XVIIe siècle est celle des opérations. Le livre de Lémery en 1677 est une « collection de recettes » (Laszlo, 1993, p. 28). À partir du XVIIIe siècle, on observe un véritable changement d'approche de la chimie. Celle-ci s'intéresse avant tout aux substances et à leurs propriétés caractéristiques, reléguant en arrière-plan les opérations. Les chimistes cherchent à obtenir de nouveaux composés et à en déterminer leur composition. Pour réaliser cela, Lavoisier s'appuie sur des pesées qui n'avaient jusqu'à présent jamais atteint ce niveau de précision. L'invariance de la masse au cours des réactions de composition et de décomposition lui sert de méthode opératoire. Tous les corps dérivent d'association et l'analyse chimique doit permettre de déterminer leur composition. Au cours d'une expérience capitale, il décompose l'eau en ses éléments constitutifs, l'hydrogène et l'oxygène, puis la recompose à partir de ceux-ci. Il démontre « ainsi la complémentarité des deux moments, analyse et synthèse » (Laszlo, 1993, p. 29). L'objectif de Lavoisier devient la recherche des simples. Le développement, dans la palette du chimiste, des mesures quantitatives rend possible cette recherche. Une fois les corps composés décomposés et les corps simples obtenus, il les recombine pour retrouver à nouveau les corps composés.

> *La chimie marche donc vers son but et vers sa perfection en divisant, subdivisant, et resubdivisant encore, et nous ignorons quel sera le terme de ses succès. (Lavoisier, 1864, p. 137)*

C'est donc en cette fin de XVIIIe siècle quand la chimie devient une science qu'un nouveau langage s'élabore. Pour Guyton de Morveau, une nomenclature est affaire de convention et permet de résoudre les problèmes de communication. Lavoisier mesure de son côté à quel point « *conceptualisation et langage sont étroitement liés* » (Laugier, 1998, p. 141). Le langage n'est pas qu'un simple outil de communication mais peut être un véritable obstacle à la connaissance. En tant qu'adepte de Condillac, Lavoisier est convaincu de « *l'importance heuristique de la langue dans la formation des concepts scientifiques* » (Laugier, 1998, p. 134).

> *L'impossibilité d'isoler la nomenclature de la science et la science de la nomenclature tient à ce que toute science physique est nécessairement formée de trois choses : la série des faits qui constituent la science ; les idées qui les rappellent ; les mots qui les expriment. Le mot doit faire naître l'idée ; l'idée doit peindre le fait : ce sont trois empreintes d'un même cachet ; et, comme ce sont les mots qui conservent les idées et qui les transmettent, il en résulte qu'on ne peut perfectionner le langage sans perfectionner la science, ni la science sans le langage. (Lavoisier, 1801, p. 1‑2)*

La nomenclature de Lavoisier trouve sa justification dans ses propres travaux. Son œuvre repose, selon Dagognet (2002, pp. 20–21), sur trois piliers :

- « *le concept de la composition – combinaison* » d'où le rien ne se crée. Tout n'est que décomposition et recomposition ;
- « *une classification méthodique* » qui doit indiquer les corps simples à partir desquels le reste est issu ;
- et « *une nomenclature rationnelle* ».

La nouvelle nomenclature devient l'outil permettant de comprendre et d'interpréter la chimie autour des espèces chimiques en partant du simple pour aller au complexe (Annexe 16.1). Pour Lavoisier, un langage est nécessaire pour étudier et apprendre les principes de la chimie mais il est également nécessaire pour permettre le développement de la chimie (Annexe 16.2). La nouvelle nomenclature permet de propager les principes théoriques en en facilitant l'apprentissage (Annexe 16.2).

Lavoisier a posé les premiers éléments de langage à partir desquels la chimie peut se développer. Les chimistes ont les noms pour dire les espèces chimiques et les réactions. Mais il manque encore les symboles et une algèbre, même si une première tentative est proposée par Hassenfratz et Adet en 1787 (Annexe 16.3).

3. Les formules de Dalton

Lavoisier a ouvert la voie de l'analyse quantitative.

> *Décomposer, identifier, nommer, classer, ces activités qui constituent la « carte de visite » de la chimie scientifique ont désormais le corps simple pour notion de base et la balance pour instrument privilégié. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 141)*

Jusqu'à présent, les chimistes, et à leur tête Berthollet en France, pensent que les espèces peuvent se combiner en proportions quelconques. Mélange, dissolution et réaction chimique sont encore des notions confondues.

> *Les chimistes ont admis pendant longtemps que les corps pouvaient se combiner, suivant des proportions quelconques, et que le même corps composé ne renfermait pas, nécessairement, ses principes constituants dans des rapports pondéraux identiques. Ce n'est qu'à partir de l'époque, assez récente, où l'usage de la balance s'est introduit dans les laboratoires de chimie, que l'on reconnut la fausseté de cette opinion. Dès lors, les chimistes s'occupèrent, à l'envie, de déterminer la composition des corps ; les procédés de l'analyse chimique se perfectionnèrent successivement ; et, bientôt, on reconnut une série de lois remarquables qui régissent les combinaisons chimiques. (Regnault, 1850, p. 518)*

En ce début de XIXe siècle, les chimistes se lancent dans de nombreuses analyses pondérales et volumétriques en décomposant et en analysant les espèces chimiques. Ils commencent alors à s'intéresser à l'interprétation des réactions en recherchant les proportions des différents *simples* dans les espèces chimiques. En une petite dizaine d'années, plusieurs lois empiriques voient le jour et vont permettre aux chimistes de différencier la réaction chimique des mélanges et des dissolutions : la loi des nombres proportionnels, la loi des proportions définies, la loi volumétrique des gaz et la loi des combinaisons multiples (Annexe 17.1). Dalton réalise la synthèse de ces lois en relançant une nouvelle théorie atomique de la matière.

3.1 La théorie atomique de Dalton

Pourquoi une théorie à ce moment de l'histoire de la chimie ? L'explosion démographique des corps simples met la chimie en tension (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 147). Il est nécessaire de formuler des idées générales sur les combinaisons chimiques et sur la constitution des corps sinon la chimie risque de redevenir une « *science des monographies* » alors que l'analyse chimique devait l'en éloigner.

> *Va-t-on sacrifier la claire ordonnance d'un système au profit d'un simple inventaire de propriétés individuelles qu'il faut apprendre sans trop chercher à comprendre ? (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 147)*

À partir de mesures expérimentales sur les masses, Dalton en déduit une hypothèse sur la matière au niveau microscopique.

> *Esprit élevé, Dalton ne s'arrêta pas aux faits, mais chercha à en rendre compte par une conception théorique. (Wurtz, 1864, p. 12)*

Il admet que la matière ne peut se décomposer indéfiniment et qu'elle est composée de petites particules indivisibles. Il pose que chaque corps simple est constitué de particules ultimes qu'il nomme atomes. Ces particules, identiques entre elles pour un même corps simple, changent quand on passe à un autre corps simple. Dalton généralise ensuite son hypothèse atomique aux corps composés. Ceux-ci sont également constitués de particules ultimes qu'il nomme indifféremment atomes ou molécules[26]. Les réactions entre les espèces chimiques se passent au niveau de l'unité de matière, les atomes individuels tous identiques pour une même substance, et résultent de leurs combinaisons.

> *Pour Dalton, l'atome est l'invariant dans les transformations chimiques. » (Scheidecker-Chevallier, 1997, p. 180)*

Dalton écrit dans *A new System of Chemical Philosophy* :

> *L'analyse et la synthèse chimique ne vont pas plus loin que séparer les particules des unes des autres, et les réunir.(traduit par Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991, p. 82)*

Ces combinaisons s'effectuent alors en proportions définies et en proportions multiples. L'hypothèse atomique n'est pas une nouveauté en chimie. Apparaissant dans l'Antiquité, on la retrouve en chimie à partir du XVIIe siècle et elle est évoquée par des chimistes illustres

[26] Dalton ne fera jamais la distinction entre atome et molécule.

comme Lémery, Boyle, Van Helmont, etc... Mais l'hypothèse atomique introduite par Dalton porte plus sur les unités minimales de combinaisons chimiques, hypothèse qui sera controversée par les équivalentistes, que sur des *minima* de structure de la matière, *minima* admis par quasiment l'ensemble des chimistes du XIXe siècle (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p.148).

> *Enfin M. Dalton a émis l'idée que les combinaisons entre deux corps se font, de manière qu'un atôme de l'un s'unit à un atôme de l'autre, ou à deux, ou à trois, ou à un plus grand nombre Il résulteroit de cette manière d'envisager les combinaisons, qu'elles se font dans des proportions constantes , sans qu'il y en ait d'intermédiaires, et sous ce rapport la théorie de M. Dalton se rapprocheroit de celle de M. Proust. (Gay-Lussac, 1809, p.209)*

Chaque corps simple est spécifique car constitué « *d'atomes chimiques* » tous identiques possédant leurs qualités propres (Scheidecker-Chevallier, 2003, p. 58). Les atomes de chaque corps simple sont caractérisés par un poids[27] invariable et le poids de la combinaison est égal à la somme des poids de chaque atome formant la combinaison. Avec le poids atomique, les chimistes peuvent désormais exprimer la composition d'un corps en termes d'atomes constituants, établissant un lien direct entre les données expérimentales et leur interprétation. Le poids atomique leur permet de « *caractériser, nommer, écrire, et classer une population sans cesse croissante de substances simples et composées* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 148). Déterminer le poids des atomes va devenir « *le programme de toute une génération de chimistes* » (Scheidecker-Chevallier, 1997, p. 179).

L'hypothèse de Dalton permet donc de donner une explication simple à la théorie des proportions définies et des proportions multiples.

> *Sans l'hypothèse atomique, ces lois (lois des proportions définies et des combinaisons multiples) demeurent mystérieuses comme les lois de Kepler en attendant Newton. Avec l'hypothèse atomique, et les symboles figurés auxquels Dalton résume son système, elles acquièrent une signification intuitive immédiate. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 150 - 151)*

Dalton peut alors proposer des « formules chimiques » pour les corps composés et élaborer un symbolisme nécessaire à la représentation de la combinaison définie de la molécule et nécessaire à l'écriture de la réaction chimique en termes de proportions définies.

[27] Le terme de « poids » était celui utilisé par les chimistes de cette époque à la place de « masse ». Nous le conservons dans toute la partie historique.

3.3 Les formules et les symboles de Dalton

L'écriture des formules pour les corps composés et l'agencement des atomes dans la molécule, qui présuppose la détermination du poids atomique des éléments, devient une préoccupation centrale (Bensaude-Vincent, 2005, p. 196‑197). Ce sont ces formules qui vont être controversées pendant au moins un demi-siècle plus que l'interprétation corpusculaire de la matière.

3.3.1 Les formules

Un enjeu fondamental du travail de Dalton est d'établir les poids relatifs des atomes aussi bien pour les corps simples que pour les corps composés. Il écrit que cela doit lui permettre d'établir « *le nombre de particules simples élémentaires qui constituent une particule composée, et le nombre des particules moins composées qui entrent dans la formation d'une particule plus composée* » (Dalton traduit par Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991, p. 83). Il écrit plus loin :

> *If there are two bodies, A and B, which are disposed to combine, the following is the order in which the combinations may take place, beginning with the most simple: namely,*
>
> *1 atom of A + 1 atom of B = 1 atom of C, binary*
>
> *1 atom of A + 2 atom of B = 1 atom of D, ternary*
>
> *2 atom of A + 1 atom of B = 1 atom of E, ternary*
>
> *1 atom of A + 3 atom of B = 1 atom of F, quaternary*
>
> *3 atom of A + 1 atom of B = 1 atom of G, quaternary "*
>
> *(Dalton, 1808, p. 213)*

Dalton propose une série de règles générales qui permettent d'établir les formules chimiques des combinaisons chimiques. Il décide pour cela d'appliquer un principe de simplicité. Lorsque A et B réagissent et ne donnent qu'un seul composé, celui-ci doit être binaire de formule AB. S'ils donnent deux composés : l'un est binaire AB et l'autre est tertiaire ABB ou AAB, etc. (Dalton, 1808, p. 214). Dalton en déduit notamment que l'eau est un composé binaire d'hydrogène et d'oxygène de poids relatifs approximativement 1 pour 7[28], que l'ammoniaque est un composé binaire d'azote et d'hydrogène de poids relatifs approximativement 1 pour 5,

[28] Les proportions atomiques représentent les proportions des corps simples dans la décomposition du corps composé.

que l'oxyde carbonique pesant environ 12 est un composé binaire formé d'un atome de carbone (charbon dans le texte) et d'un oxygène, et que l'acide carbonique pesant environ 19 est un composé ternaire formé d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène. Les poids sont relatifs au poids de l'hydrogène fixé à 1 (Dalton, 1808, p. 215). Wurtz (1886, p. 23) résume dans un tableau (Figure 41) les principales formules proposées par Dalton[29].

NOTATION DE DALTON

(1808)

Poids atomiques (moléculaires)		Formules
8	*d'eau* sont représentés par	HO
14	*d'hydrogène sulfuré*	HS
6	*d'ammoniaque*	HAz
6	*de gaz oléfiant*	HC
7	*de gaz des marais*	H^2C
12	*d'oxyde de carbone*	CO
19	*d'acide carbonique*	CO^2
17	*de protoxyde d'azote*	Az^2O
12	*de bioxyde d'azote*	AzO
31	*d'acide nitreux*	Az^2O^3
19	*d'acide nitrique*	AzO^2

Figure 41 Exemples de formules de Dalton (Wurtz, 1886, p. 23)

Pour représenter ses formules chimiques, Dalton élabore de nouveaux symboles et, comme pour Lavoisier avec sa nomenclature, ceux-ci doivent permettre la propagation de ses théories.

3.3.2 Les symboles

Dalton adopte de nouveaux symboles pour donner à sa théorie une « *expression saisissante* » (Wurtz, 1886, p. 21).

> *C'est là l'origine de la notation atomique, langage de symboles et de nombres plus concis et plus clair que celui des mots et qui est devenu, depuis, un grand instrument de progrès pour la science et un grand secours pour l'enseignement. (Wurtz, 1886, p. 21)*

Dans *A New System of Chemical Philosophy* (1808, pp. 218-219), Dalton expose les symboles qu'il a choisis arbitrairement pour représenter les atomes de vingt corps simples ainsi que dix-sept combinaisons, de binaire à septénaire, de ces mêmes atomes. Les signes proposés sont de petits cercles encadrant des marques caractéristiques pour chaque corps simple (Figure

[29] Wurtz utilise dans le tableau les notations de son époque qui ne correspondent pas à celles de Dalton.

42) avec par exemple : un point au centre pour l'hydrogène, une barre pour l'azote, rien pour l'oxygène, une croix pour le soufre. Les atomes de carbone[30] sont noirs et ceux des métaux portent, au centre, une lettre initiale du nom de chacun d'eux (Figure 42). Crosland (1980, p. 258) considère que les représentations en cercle ne sont pas arbitraires mais représentent, pour Dalton, l'atome tel qu'il l'imagine dans la réalité.

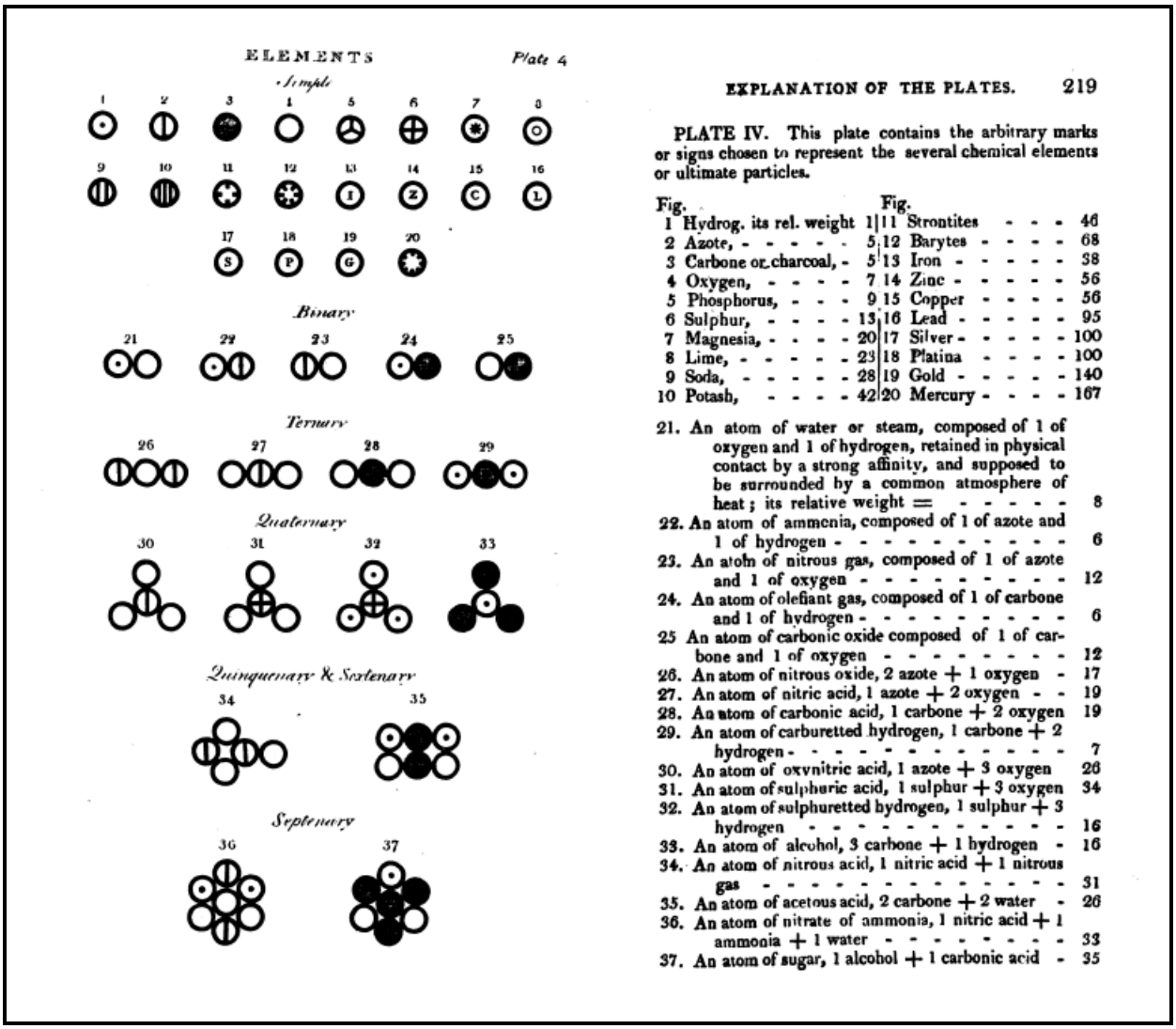


Figure 42 Planche 4 et sa légende des éléments chimiques et de leurs combinaisons (Dalton, 1808, p. 218-219)

Pour les corps composés, Dalton groupe les symboles des atomes constituant le mixte.

> *C'était très ingénieux et très clair. Pour prendre connaissance de la composition atomique d'un corps, il suffisait, en effet, de compter le nombre de ces atomes qui s'étalaient, en quelque sorte, les uns à côté des autres. (Wurtz, 1869, p. 70)*

[30] Pour Dalton, le carbone est du charbon.

L'eau (symbole 21 de la Figure 42) est représentée par les symboles des atomes d'hydrogène et d'oxygène juxtaposés. L'acide sulfurique (symbole 31 de la Figure 42) forme un groupe de quatre atomes circulaires : trois atomes d'oxygène disposés symétriquement autour d'un atome de soufre placé au centre. L'acide acétique (symbole 35 de la Figure 42) comprend six atomes, deux atomes de carbone, formant en quelque sorte l'axe de la molécule, et, de part et d'autre de cet axe, un atome d'oxygène et un atome d'hydrogène. Le système de représentation de Dalton permet ainsi de visualiser l'arrangement des atomes les uns par rapport aux autres dans la combinaison, arrangement nécessairement symétrique comme le montrent les symboles 26 à 37 (Figure 42).

Les symboles de Dalton vont être, au final, assez peu utilisés par la communauté des chimistes. Comme ceux de ses prédécesseurs, ils posent des problèmes de typographie et leur agencement symétrique dans la molécule est sans raison empirique ou théorique. Ils sont assez rapidement remplacés par ceux de Berzelius.

> *Le seul inconvénient de cette représentation graphique des molécules, c'était l'étendue qu'elles prenaient sur le papier dès que la composition des corps se compliquait. Et puis n'y avait-il pas quelque chose d'arbitraire dans la disposition symétrique que Dalton s'était efforcé de leur donner ? (Wurtz, 1869, p. 70)*

Quand avec la découverte des isomères au milieu du XIXe siècle certains organiciens vont commencer à interpréter les faits observés en termes d'arrangements d'atomes au sein de la molécule, quelques chimistes vont à nouveau utiliser les symboles de Dalton (Figure 43).

Figure 43 Représentation de l'albumine et de la gélatine (Crosland, 1980, p. 262)

Ils permettent également d'illustrer des molécules aux propriétés similaires mais de constitution différente. En 1844, Gerhardt reprend les symboles de Dalton (Figure 44) pour mettre en évidence les parentés entre l'acide oxalique et les sels dérivant de cet acide.

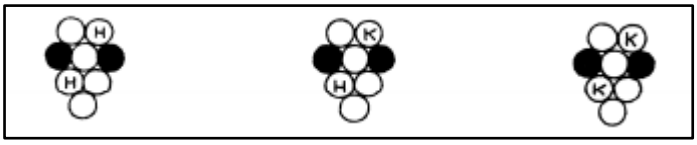


Figure 44 Représentation de l'acide oxalique, du sel acide et du sel neutre de potassium (Crosland, 1980, p. 263)

Mais Dalton, en proposant trop tôt un arrangement des atomes, et qui plus est, arbitrairement symétrique, a très certainement fragilisé son système dont ses propres notations.

4. Les formules de Berzelius

Berzelius part des travaux de Dalton tout en lui reprochant de ne pas s'être suffisamment confronté à l'expérience. Lui-même est un expérimentateur de très grande qualité. Il est très vite reconnu par l'ensemble de la communauté scientifique pour l'ensemble de ses mesures de poids atomiques des *simples*. Il est alors amené à changer certaines formules de Dalton. Pour réaliser ce travail, il définit une nouvelle notation propre à indiquer la composition atomique des corps. Comme pour ses prédécesseurs, cette nouvelle « écriture » va servir à propager à la fois la théorie atomique et sa vision dualistique dans les combinaisons chimiques. Mais elle va aussi faciliter les avancées en chimie et notamment le développement de la chimie organique en tant que « *paper tools* » (Klein, 2001a).

4.1 Une nouvelle écriture pour exprimer les proportions chimiques

Berzelius s'attelle très rapidement à l'élaboration d'une nouvelle écriture. Les symboles de Dalton, ou de ces prédécesseurs, sont difficilement compréhensibles et posent des problèmes typographiques. Les « *signes chimiques* » doivent être accessibles et permettre de visualiser sans effort les proportions chimiques. L'écriture doit servir le développement de la chimie et ne doit pas être uniquement un outil de représentation.

> *Lorsque nous essayons d'exprimer les proportions chimiques, nous trouvons qu'il est nécessaire d'avoir des signes chimiques. On en a employé depuis longtemps, quoiqu'ils aient été jusqu'à présent de peu d'utilité. À l'époque l'alchimie des signes fut créé par le besoin s'exprimer d'une manière mystique et incompréhensible pour le vulgaire. La chimie antiphlogistique voulut leur en substituer d'autres, fondés sur le même principe scientifique que les nouveaux noms chimiques : le signe devait indiquer les parties constituantes d'un corps composé. Mais quoique ces signes, il faut l'avouer, fussent bien choisis, ils n'étaient guère utiles car il est plus aisé d'écrire un mot en abrégé que de dessiner une figure, qui d'ailleurs, pour être si aisément remarquée, doit être plus grande que les caractères ordinaires de l'écriture. En proposant ici d'autres signes, je chercherai à éviter ces inconvénients. (Berzelius, 1819, p. 109‑111)*

Le symbolisme doit permettre de représenter le nombre relatif des atomes dans les combinaisons chimiques et d'exprimer par des signes la composition en qualité et en quantité. Il a donc l'idée de représenter les atomes par des lettres en prenant l'initiale ou les deux premières lettres du nom latin de l'élément, plus commode à ses yeux au plan international (Dagognet, 2002, p. 63). Il propose alors O pour l'atome d'oxygène, H pour l'hydrogène, K pour le kalium (ou potassium), Au pour aurum (ou or), etc.

> *Les signes chimiques doivent être des lettres alphabétiques pour pouvoir être facilement tracés et imprimés sans défigurer le texte. Je choisis donc à cet effet la lettre initiale du nom Latin de chaque corps simple ; mais plusieurs de ces corps ayant la même initiale, je les distingue de la manière suivante : .1° Les corps simples non métalliques {les métalloïdes) ne seront désignés que par la lettre initiale, quand même elle serait commune à quelque métal ; et 2° le métal qui aura la même initiale qu'un autre métal ou un métalloïde sera indiqué par les deux premières lettres de son nom, ou, si elles se trouvaient les mêmes dans un autre nom, on ajoutera à l'initiale la première consonne différente. Par exemple, S = sulphur ; Si = Silicium, St= stilbium ; Sn = Stannum , C = Carborricum, Co = Colbaltum, Cu = Cuprium, ·O = Oxigenium. (Berzelius, 1819, p. 109-111)*

Une combinaison formée de deux atomes différents est alors représentée par deux lettres juxtaposées et, si celle-ci renferme plusieurs atomes d'un même élément, le symbole est affecté d'un coefficient. L'écriture est encore de nos jours celle de Berzelius. Seule la position du coefficient a changé en passant d'un exposant à un indice.

> *Le nombre des atomes est désigné par des chiffres. Un chiffre à gauche multiplie tous les atomes placés à sa droite, jusqu'au premier -H ou jusqu'à la fin de la formule. Un petit chiffre placé à la droite de la lettre, en haut, comme un exposant algébrique, multiplie seulement les poids atomiques placés à gauche. Par exemple, S^2O^5 signifie un atome d'acide hypo-sulfurique, et 2 S^2O^5 signifie deux atomes du même acide. (Berzelius, 1835, p. 90)*

Pour simplifier encore ses formules, Berzelius propose de remplacer le symbole de l'oxygène, employé fréquemment dans les formules, par un point au-dessus de l'autre atome. Il utilisera également une lettre barrée en son milieu pour indiquer des atomes doubles. Il remplace le sulfate cuivrique par $\dot{Cu}\,\dddot{S}$, et le sulfate ferrique par $\dddot{Fe}\,\dddot{S}^3$, (Berzelius, 1835, p. 91). Les représentations de Berzelius par rapport à celles de Dalton présentent l'avantage de ne pas indiquer la disposition des atomes dans la composition (Wurtz, 1869, p. 68‑70).

4.2 Une écriture plus qu'une simple représentation : un « outil de papier »

En moins de vingt ans, les notations de Berzelius sont adoptées par la communauté internationale (Crosland, 1980). Elles deviennent incontestables grâce notamment à la renommée et à l'autorité incontestée de son concepteur (Wurtz, 1864, p. 27). Certains n'y voient que de simples abréviations n'apportant rien d'autre qu'un allégement de l'écriture (Dagognet, 2002), mais pour d'autres elles sont la possibilité de réfléchir à la constitution des composés et à l'interprétation des réactions chimiques (Camel, 2012, p. 83). Les chimistes peuvent enfin traduire les expériences réalisées en laboratoire par des équations chimiques (Laugier, 1998, p. 163).

> *Ce système de notation, si simple dans son principe, se prête à toutes les hypothèses sur le groupement des atomes et à l'interprétation des réactions les plus compliquées (Wurtz, 1869, p. 70).*

Au-delà de cette possibilité de visualisation, les formules de Berzelius sont un outil de développement de la chimie organique. Elles permettent en effet aux chimistes d'apporter un ordre dans la jungle de la chimie organique de cette première moitié du XIXe siècle (Klein, 2001b, p. 256). Dans les années 1830 et 1840, les chimistes européens décrivent souvent la chimie organique comme chaotique, et labyrinthique. Klein montre comment les chimistes ont réussi à pénétrer cette jungle et créer un ordre chimique au moyen des formules de Berzelius. Elles sont d'abord utilisées comme outil de construction de modèles simples ou « *primaires* » de réactions chimiques sous la forme d'équations. Puis, les formules de Berzelius permettent de faire évoluer les modèles primaires de recombinaison chimique en modèles de second ordre incorporant des hypothèses supplémentaires aux réactions en modélisant la constitution des substances organiques. Elles sont alors utilisées comme « *outils* » pour construire de nouvelles taxinomies pour les substances organiques. Elles sont pour Klein (2001a) des « *paper tools* ».

> *The term 'paper tools' is introduced to emphasize that the pragmatic and syntactic aspects of symbol systems are fully comparable to physical laboratory tools. (Klein, 2001a, p. 7)*

Le fait de pouvoir visualiser les structures chimiques et la manipulation des formules sur papier ont un pouvoir de suggestion pour des recombinaisons possibles. Cela ouvre de nouvelles voies (Klein, 2001a, p. 23). Dans les années 1820, des chimistes utilisent les formules de Berzelius pour exprimer la composition des substances organiques et grouper une série de

phénomènes analogues. L'écriture des équations chimiques permet de proposer une théorie interprétant les faits relatifs à la formation, à la composition et aux métamorphoses d'une classe entière de corps. L'analyse de Klein (2001a) à propos du travail de Dumas pour modéliser la création du chloral à partir du chlore et de l'alcool illustre bien le rôle joué par les formules dans le développement des concepts de la chimie, notamment celui de substitution qui va devenir clé pour la chimie à partir de 1840.

> *MM. Dumas et Boullay ont publié sur les éthers qu'on nomme composés un travail qui fait époque dans la science. Ils reconnurent que ces corps renferment les éléments d'un acide uni précisément à 2 volumes de gaz oléfiant et 1 volume de vapeur d'eau, c'est-à-dire aux éléments de l'éther. Attribuant au gaz oléfiant un rôle analogue, jusqu'à un certain point, à celui de l'ammoniaque, ils ont comparé les éthers aux sels ammoniacaux. C'était la première fois qu'en chimie organique une série de phénomènes analogues était groupée par la théorie et que les faits relatifs à la formation, à la composition, aux métamorphoses d'une classe entière de corps recevaient une interprétation simple, à l'aide de formules et d'équations atomiques. (Wurtz, 1869, p. 77)*

Le concept de substitution n'est pas la conséquence d'un programme de recherche délibéré des chimistes mais plutôt le résultat imprévu et inattendu d'expériences et de travaux sur papier à partir des formules chimiques de Berzelius (Klein, 2001a, p. 23). Et c'est au final l'outil qu'il élabore qui va faire tomber sa théorie dualistique.

4.3 Une écriture support d'une doctrine

4.3.1 La vision dualistique de Berzelius

La vision de la chimie par Lavoisier puis Berzelius est une chimie essentiellement minérale où les espèces sont perçues comme l'association de deux termes : pour Lavoisier, le comburant et le combustible ou l'oxygène et le radical ; pour Berzelius, les électropositifs ou métaux et les négatifs ou métalloïdes (Dagognet, 2002). Les décompositions électriques sont en plein développement en ce début de XIXe siècle. Berzelius se représente les atomes de Dalton comme des sphères mécaniquement indivisibles. Ces sphères sont des sortes de petits dipôles contenant un pôle positif et un pôle négatif. C'est cette polarité des atomes qui permet d'expliquer la réactivité chimique (Scheidecker-Chevallier, 2003, p. 59). Toute combinaison chimique dépend de deux forces opposées provenant de l'électricité positive et de la négative. Dans la théorie dualistique de la combinaison chimique de Berzelius un corps binaire n'ayant

presque jamais ses deux électricités exactement saturées conserve une électricité résiduelle et peut alors produire de nouvelles combinaisons ternaires, quaternaires, etc. Tout corps composé, quel que soit le nombre des éléments le constituant, peut alors être divisé en deux parties électriquement opposées. Les formules doivent faire apparaître cette dualité : « *(PbO, SO_3) pour le sulfate de plomb, (NaO, Az_2O_5) pour l'azotate* » (Dumon & Cokelez, 2006, p. 52)

> *Berzelius, le grand continuateur de Lavoisier, a complété le système de la chimie dualistique. Il a donné à la théorie atomique, d'une part, une base solide par des déterminations de poids atomiques aussi exactes que nombreuses, et, de l'autre, une expression nouvelle par l'usage de formules adaptées à l'idée du dualisme. (Wurtz, 1869, p. 61)*

Il étend sa vision dualistique aux composés organiques et propose pour cela de nouvelles notations en utilisant deux types de formules :

- les « *formules empiriques* »[31] qui indiquent les résultats de l'analyse de la substance mixte ;
- les « *formules rationnelles* »[32] qui « indiquent la division électrochimique des atomes » (de Menten, 2013, p. 145).

> *Les formules qui servent à désigner les compositions chimiques, sont dites empiriques ou rationnelles. Les premières expriment en poids atomiques la composition en 100 de la combinaison ; elles sont l'expression de l'analyse des corps. Les formules rationnelles, au contraire, énoncent la vue théorique, suivant laquelle on se représente la combinaison des parties constituantes des corps. La formule SKO^4 est la formule empirique du sulfate de potasse ; elle nous montre que c'est un corps contenant 4 at. d'oxygène, 1 at.de potassium et 1 at. de soufre ; $KOSO^3$ en est la formule rationnelle ; car elle nous fait voir que, sur 4 at. d'oxygène, 1 at. est combiné avec 1 at. de potassium, en oxyde de potassium ou potasse, et les 3 autres at. avec 1 at. de soufre en acide sulfurique. (Louyet, 1841, p. 123)*

Comme pour Lavoisier, le système de représentation de Berzelius lui permet de porter sa théorie.

4.3.2 Une vision qui ne parvient pas à s'adapter

Les Français sont à la pointe dans le développement de nouvelles molécules en chimie organique, chimie qui est en plein essor depuis le début du XIXe siècle. Berzelius tente d'adapter sa vision dualistique pensée comme « *l'expression d'une réalité chimique* »

[31] Ou formules brutes actuelles.
[32] Ou formules semi-développéesactuelles.

(Massain, 1966, p. 176) à ces évolutions, en décomposant, comme pour la chimie minérale, les molécules organiques en un radical et de l'oxygène.

> *chaque produit organique peut être considéré comme divisible en oxygène et en un radical composé. (Berzelius, 1819, p. 98)*

Il propose des formules rationnelles pour les molécules organiques sur le modèle dualistique. Cela donne notamment pour l'acide acétique en notation actuelle : ($C_4H_6O_3$ + H_2O). Cette formule est établie à partir de la formule de l'acide sulfurique (SO_3 + H_2O). Mais tout son système va très vite se retrouver inadapté car « *cette théorie est loin d'être féconde en chimie organique* » (Scheidecker-Chevallier, 2003, p. 59). Laurent (1854) considère que la conception de Berzelius à propos de l'arrangement des atomes amène celui-ci à complexifier toutes les formules de la chimie organique. Berzelius essaie d'introduire un radical électropositif qui doit pouvoir s'associer avec l'oxygène dans les composés organiques. Il essaie également de simplifier au maximum les formules. Il propose d'écrire l'acétyle $^{4}_{6}\mathrm{A}$ plutôt que C^4H^6. Il se rend pourtant compte que cela ne pourra pas être aussi simple qu'avec les composés inorganiques (Dumon & Luft, 2008, p. 29).

> *il est probable que, dans la plupart des cas, le radical électropositif, hors de l'oxide construit d'une manière déterminée, ne peut pas exister isolément. (Berzelius, 1819, p. 99)*

Il n'est pas capable de reconnaître les faiblesses de sa théorie dans le cadre de la chimie organique et il la défend jusqu'au bout avec acharnement (Massain, 1966, p. 169). « *Il devient incompréhensible et critiqué* » (de Menten, 2013, p. 145) et malgré toutes ces tentatives, cela ne va pas sauver son édifice.

4.4 La formule au centre des recherches

Les ouvrages du début du XIXe siècle, quand ils traitent de substances, commencent par donner les propriétés physiques et chimiques de celles-ci avant d'en donner la composition. Cela s'inverse en moins d'un demi-siècle. La détermination des formules empiriques est au centre des recherches. Leur établissement est étroitement lié à celui du poids atomique dont la détermination accapare les laboratoires européens durant les trente premières années. Au cours de cette période, la vision dualistique de Berzelius prend le dessus sur toute autre théorie en chimie. Ses représentations symboliques s'imposent à toute la communauté scientifique. Les notations de Berzelius par rapport aux notations de Dalton l'emportent parmi

les chimistes. Elles peuvent en effet être utilisées par tous les équivalentistes qui rejettent l'atome et donc toute représentation qui pourrait suggérer son existence. Or c'est le cas des symboles de Dalton qui vont même jusqu'à proposer un arrangement des atomes au sein de la molécule (Klein, 2001a). Les lettres de Berzelius sont pour cela beaucoup plus neutres et susceptibles de toutes les interprétations possibles. Elles peuvent faire l'unanimité dans la communauté des chimistes même si par ailleurs ceux-ci vont s'affronter pendant plus de cinquante ans sur l'interprétation théorique de ces lettres. Les formules s'appuient sur des mesures expérimentales rigoureuses amenant aux poids relatifs, ce qui ne peut que satisfaire les équivalentistes, tout en permettant également une interprétation corpusculaire de la matière. Les outils de représentation de Berzelius permettent aux notions d'atomes et de molécules de gagner progressivement du terrain au détriment de la notion d'équivalent. En permettant de réfléchir à la composition des substances organiques et à l'interprétation des réactions chimiques, elles permettent à la chimie organique de se développer (Crosland, 1980). Les organiciens sont à leur tour amenés à élaborer de nouvelles théories ainsi que de nouvelles formules. C'est pourtant la chimie organique qui va sonner le glas de la théorie dualistique et des formules rationnelles de Berzelius.

> *Les formules rationnelles ont beaucoup d'utilité lorsqu'il s'agit de faire ressortir graphiquement certaines analogies de réactions, certains rapports entre des corps de composition différente ; chacun peut les varier à son gré suivant les relations qu'il veut dépeindre ; mais les construire uniquement d'après les idées dualistiques, c'est leur donner une signification étroite et contraire à l'esprit de la science. Il faut laisser aux formules rationnelles la plus grande latitude ; il serait même fort avantageux d'y introduire de nouveaux signes.(Gerhardt, 1844, p. 12)*

5. Les formules des organiciens

La chimie organique se développe et, avec elle, de nouveaux concepts, de nouveaux débats et de nouveaux problèmes apparaissent.

> *Le progrès cumulatif, sans accroc, cède la place à une marche moins linéaire, plus enchevêtrée. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 139)*

Le développement de l'analyse et des techniques de synthèse multiplie l'identification de nouvelles espèces chimiques. Le problème de la gestion et de la classification de ces nouvelles

substances se pose alors à nouveau. Avec Lavoisier, la chimie part du *simple* pour aller au complexe. Avec la chimie organique, cette façon de procéder s'inverse. Laurent n'hésite pas à partir du monde animal ou végétal à la différence de ses prédécesseurs qui y avaient renoncé pour rester dans le monde minéral (Dagognet, 2002). Il considère que l'étude des substances ne peut être séparée de l'étude des réactions. L'analyse seule ne suffit plus.

> *[…] pour classer les réactions, il faut d'abord une classification des corps. Mais comme nous ne pouvons obtenir celle-ci qu'à l'aide des réactions, nous tombons inévitablement dans un cercle vicieux. Il ne peut en être autrement ; cela revient à dire que la classification des corps et l'étude des réactions doivent se prêter un mutuel secours et s'améliorer progressivement. (Laurent, 1854, p. 201)*

Les organiciens vont rechercher dans le complexe les proportions de quatre éléments : le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote. Une nouvelle façon de penser la chimie s'installe tout doucement.

> *Le ressort de l'explication chimique se déplace du corps simple ou de l'élément vers la notion de groupement ou d'édifice moléculaire. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 166)*

La chimie s'est construite en tant que science à partir de la classification de Lavoisier et des formules de Berzelius. Là où ils avaient réussi à remettre de l'ordre avec une vision dualistique, on assiste au contraire à un imbroglio de formules avec l'apparition et l'analyse des nouvelles substances organiques.

> *Chaque auteur cherche, par de nombreuses réactions, à appuyer la sienne, qu'il croit la meilleure, comme si l'on pouvait donner la moindre idée du groupement des molécules en disposant sur le papier, un peu plus à gauche ou à droite, tel ou tel symbole. (Gerhardt, 1844, p. 12)*

On a pour l'alcool six ou sept formules différentes.

> *M. Dumas le représente par $C^4H^8 + H^4O^2$ et par $C^2H^8 + C^2H^4O^2$; M. Berzélius par $(C^2H^6)O$; M. Liebig par $(C^4H^{10})O + H^2O$; MM. Zeise et Mitscherlich par $C^4H^{10}O^2 + H^2$; M. Malguti par $C^4H^6O + H^4 + H^2O$; M. Persos par $C^2 (H^{12}C^2O^2)^{16}$. (Gerhardt, 1844, p. 12)*

Pour l'acide acétique, on trouve tour à tour : $C^4H^6O^3 + H^20$; $C^4H^6O^4 + H^2$; $C^4H^6 + O^3 + H^2O$; $C^3H^6O + CO^2 + H^2O$; etc. Laurent est capable de citer onze formules, « *liste interminable, qui déroule les fantaisies de chacun et l'inacceptable confusion de tous* » (Dagognet, 2002, p. 76). Le développement de la chimie organique rend nécessaire le remplacement de la vision

dualistique. Trois théories vont alors se développer : la théorie des radicaux (Annexe 18.1) qui propose interprétation dualistique des composés organiques, la théorie des substitutions qui entraînera la disparition de la vision dualistique de Berzelius (Annexe 18.2) et la théorie des types (Annexe 18.3) qui propose une classification des composés organiques devenue nécessaire avec l'augmentation incessante des nouvelles substances, cette dernière ne reposant pas sur une vision atomique de la matière. Les atomistes – organiciens vont de leur côté rechercher la formule atomique capable d'exprimer la réalité moléculaire. Pour représenter le développement de la chimie organique et les nouvelles idées en termes d'arrangement des atomes, une nouvelle nomenclature et un nouveau symbolisme deviennent nécessaires.

5.1 Évolution de la nomenclature

À la fin du XVIIIe siècle, les substances identifiées en chimie organique sont : l'alcool, quelques acides plus quelques composés comme l'acétone, l'éther, l'éthylène et le chlorure d'éthylène. Mais ce nombre va exploser.

> *Quand on considère le grand nombre de substances organiques qui ont été découvertes depuis une dizaine d'années et la rapidité croissante avec laquelle les chimistes en découvrent chaque jour de nouvelles ; lorsqu'on voit que, avec un simple carbure d'hydrogène et le chlore, on a pu faire une centaine de composés, et que, avec ceux-ci, on peut en faire un grand nombre d'autres ; enfin lorsqu'on songe à l'absence de tout système, de toute nomenclature, pour classer et dénommer cette multitude de corps, on se demande, avec inquiétude, s'il sera possible, dans quelques années, de se diriger dans le labyrinthe de la chimie organique. (Laurent, 1854, p. X.)*

L'afflux de nouvelles espèces chimiques amène un « développement anarchique de la nomenclature » (Dumon & Luft, 2008, p. 54). On associe à des composés issus d'un traitement à la chaleur le préfixe *pyro-* et le préfixe *para-* est utilisé pour des substances voisines (de Menten, 2013, p. 216). Le nom de l'inventeur ou une caractéristique du composé peuvent à nouveau servir de base à la dénomination comme au temps des alchimistes. Chevreul nomme les acides gras selon les matières dont ils sont extraits. L'acide extrait de l'huile de palme devient l'acide palmitique. Le nom de fuchsine, substance colorante rouge préparée à partir de l'aniline, dérive soit de fuchsia par analogie à la couleur, soit de Fuchs, traduction allemande de Renard et nom de la firme qui prépare industriellement ce produit (Cottez,

1994). Les chimistes utilisent toujours les suffixes de la nomenclature de Lavoisier, *-ique* et *-eux* des acides, *-ate* et *ite* des sels, *-ure* des combinaisons non oxygénées, mais en introduisent de nouveaux. Au début du XIXe siècle, une série d'alcaloïdes prennent la terminaison *-ine* « *suffixation fourre-tout* » (Cottez, 1994).

> *On sent combien il est fâcheux que la morphine, l'insuline, la caféine, la naphtaline, l'allantoïne, etc., substances qui n'ont entre elles pas plus d'analogie que le chlore, et le sulfure de plomb, soient pourtant désignées par des noms qui offrent à l'esprit l'idée d'une réunion dans la même famille. (Dumas cité par Cottez, 1994)*

Ce n'est plus comme en 1787 la constitution d'unités lexicales désignant des substances de même famille. Il s'agit le plus souvent, pour répondre à une découverte ou une exigence ponctuelle, d'une « *dénomination dont la séquence phonétique terminale suggère une utilisation systématique en tant que morphèmes* » (Cottez, 1994). L'observation de comportements semblables amène à utiliser des suffixes semblables : le *-ol* des alcools, le*-al* des aldéhydes et le *-one* des cétones. Une nomenclature se constitue directement à partir de la théorie des radicaux reprenant la dénomination du radical avec ses substituants : hydrure de benzoyle, hydrure d'acétyle, etc... (de Menten, 2013, p. 217). Pour pouvoir imposer un nouveau système de dénomination, il faut avoir une autorité importante sur le groupe. Ce n'est pas le cas des organiciens atomistes pendant plus de la moitié du siècle. C'est le cas de Berzelius. Il critique les noms proposés au hasard et suggère une nomenclature dans laquelle les substances et les radicaux similaires sont désignés avec des suffixes similaires. Il suggère également l'utilisation de termes basés sur le nombre d'atomes des éléments, en particulier le carbone, contenus dans une molécule. Dans son désaccord avec Laurent, il le critique sévèrement à propos de ses propositions de nomenclature (Crosland, 1980). Laurent veut une nomenclature systématique pour la chimie organique basée sur le regroupement des atomes en molécules et sur les combinaisons chimiques. Il consacre la cinquième et dernière partie de son ouvrage *Traité de chimie* aux problèmes de classification et termine par la nomenclature. Il met tant de conditions pour l'élaboration de celle-ci que la tâche lui semble impossible.

> *Le problème à résoudre pour obtenir une bonne nomenclature chimique est entouré de tant de difficultés, que quand on a bien examiné celles-ci, on doit renoncer à l'entreprise.*
>
> *Il faut, en effet, trouver des noms qui remplissent les conditions suivantes :*

1°. D'être simples, euphoniques et en harmonie avec les noms auxquels on est habitué.

2°. De pouvoir passer dans toutes les langues sans blesser le génie de celles-ci.

3°. D'indiquer la composition des corps.

4°. D'indiquer leurs fonctions.

5°. D'être faciles à retenir, de sorte qu'on puisse abandonner la nomenclature actuelle et adopter la nouvelle sans faire le plus léger effort de mémoire.

6°. Enfin, d`être indépendants de toute idée hypothétique sur l'arrangement des atomes. (Laurent, 1854, p. 431)

Laurent fait des propositions sans chercher à les rendre parfaites car il reste persuadé que les chimistes ne pourront se défaire de leurs habitudes.

Je ne donne donc ma nomenclature, ainsi que ma classification et ma notation, que comme des essais que je soumets au jugement des chimistes ; essais susceptibles de perfectionnements dans le cas où l'on voudrait les adopter. (Laurent, 1854, p. 432)

Gerhardt s'attelle à son tour à la tâche et utilise dans son *Traité* les nombres dans le but de mettre en évidence la position d'un composé dans la série homologue. Pour Crosland (1980, p. 341), les fondements d'une nomenclature systématique dans la chimie organique reviennent à Hofmann. Celui-ci s'inspire des travaux de Laurent. Hofmann suggère que les hydrocarbures saturés doivent être désignés par des termes se terminant par *-an*. Les trois premières paraffines sont appelées Methan, Aethan et Propan et les membres supérieurs de cette série reçoivent des noms basés sur le nombre latin correspondant au nombre d'atomes de carbone dans le composé. En 1892, il y aura enfin accord dans la communauté des chimistes à propos de la théorie atomique et de la structure chimique de la molécule et le congrès de Genève pourra enfin mettre un peu d'ordre dans toutes ces dénominations en imposant les premières règles du nom officiel accompagné éventuellement d'un nom usuel choisi par le découvreur. Le principe sera basé sur la structure de la molécule, quand celle-ci est connue (de Menten, 2013, p. 217). Les hydrocarbures prendront leur dénomination actuelle ainsi que les alcools, les composés carbonylés et les acides.

5.2 De la formule brute à la formule développée

Pendant un demi-siècle, les chimistes pratiquent l'analyse élémentaire. En Allemagne, Liebig forme dans son laboratoire toute une génération de chimistes de 1824 à 1852 dont l'analyse

est la base de sa formation. Les chimistes caractérisent les substances qu'ils arrivent à isoler par leur composition et leur propriétés physiques : point de fusion, point d'ébullition et quelques autres constantes physiques. En 1856, Perkin, encore convaincu que la composition élémentaire est en correspondance biunivoque avec la structure moléculaire, tente la synthèse de la quinine ($C_{20}H_{24}N_2O_2$) par simple doublement de l'allyltoluidine ($C_{10}H_{13}N$) (Laszlo, 2010, p. 14). Biot, en 1854, dans la préface de *Méthode chimique* de Laurent remet en question les méthodes d'analyse des chimistes pour caractériser une molécule. Elles ne peuvent apporter toutes les informations nécessaires.

> *Les opérations de l'analyse chimique appliquées à un produit, soit naturel, soit artificiel, font seulement connaître l'essence, et les proportions de poids relatives, des substances simples, ou réputées telles, qui le composent. Elles n'apprennent point si les molécules matérielles de ces principes constituants, y entrent dans un état de combinaison général, le même pour toutes ; ou si elles y sont réparties en groupes distincts, combinés entre eux sans décomposition individuelle, et coexistant avec leurs qualités propres, dans le produit total. (Biot, 1854, p. V)*

Cela fait en effet plusieurs années que la notion d'isomérie est connue.

5.2.1 L'isomérie ou la nécessité de penser l'arrangement des atomes

Ce phénomène est découvert dans les années 1820 par Liebig et Wöhler. C'est Berzelius qui lui donne son nom en 1830. Les chimistes acceptent l'existence de ces substances de composition semblable et aux propriétés différentes. Mais ils sont encore peu à rejeter l'analyse chimique comme méthode incontournable d'identification des espèces chimiques.

> *On a beaucoup d'exemples de corps qui, formés des mêmes éléments simples, en mêmes proportions de poids, ont des propriétés physiques et des affections chimiques très diverses. Mais, sur ce point le plus élevé de la chimie rationnelle, l'analyse chimique ne peut nous donner aucune indication immédiate, puisque ses résultats ne définissent chaque composé que par les éléments simples qu'elle en retire, soit isolés, soit combinés en groupes dont elle ne saurait affirmer la préexistence. (Biot, 1854, p. Vj)*

Laurent en fait partie. Alors que la notion d'atomes n'est pas encore admise par l'ensemble des chimistes, Laurent va plus loin en distinguant la molécule de l'atome, reprenant en cela les théories d'Ampère, et en affirmant que les propriétés chimiques de la molécule dépendent au final plus de l'arrangement des atomes la constituant que de sa composition atomique.

> *J'admets avec tous les chimistes que les propriétés des corps composés dépendent de la nature, du nombre et de l'arrangement des atomes, mais j'admets de plus que l'ordre a souvent plus d'importance que la matière sur ces propriétés. (Laurent, 1854, p. 368)*

Dans son ouvrage *Méthode de chimie*, Laurent (1854, p. 322) développe une série d'arguments pour montrer qu'il y a « *prédisposition dans l'arrangement des atomes* » rendant compte des propriétés chimiques de certains corps composés. Les nombreux cas d'isomérie ainsi que les nouvelles observations expérimentales amènent des chimistes comme Couper, Kekulé, Loschmidt, Crum-Brown, Boutlerow, Wurtz à s'interroger également sur cette question.

> *[…] étant donnés deux corps qui, différant par leurs propriétés, renferment les mêmes atomes et en égal nombre, on peut arriver, en groupant les atomes diversement, à construire avec des matériaux identiques deux molécules distinctes par leur forme. Ces différences de structure rendent compte des différences de propriétés : ainsi on ne se borne plus à constater l'isomérie, on en trouve la raison d'être, on en donne l'explication. »(Wurtz, 1869, p. 41)*

Boutlerow observe dans différentes molécules des différences de comportement pour les atomes en fonction de leur environnement.

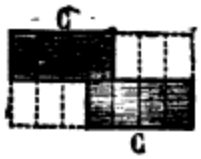
> *Dans le glycocolle et dans la glycolamide, les relations chimiques des atomes élémentaires constituants ne sont pas non plus les mêmes. Les deux atomes, identiques par leur nature, et entrant dans la composition de la même molécule, prennent donc un caractère chimique différent lorsque l'influence exercée par chacun d'eux sur les autres parties constituantes de la même molécule est différente. L'existence de cette influence est un fait. Il est facile de remarquer qu'un élément offre des relations diverses suivant la nature des éléments avec lesquels il est combiné. (Boutlerow, 1864, p. 114)*

Au final, la multiplication des cas exige l'abandon des formules empiriques au profit d'une formule rationnelle qui doit pouvoir indiquer l'arrangement des atomes dans la molécule. De nouvelles représentations des composés chimiques se développent progressivement et, en parallèle, on assiste à l'« *l'émergence d'une notion nouvelle se dégageant des travaux des partisans de la nouvelle chimie : l'atomicité* » (Dumon & Cokelez, 2006, p. 52).

5.2.2 L'atomicité

Les chimistes constatent que différents éléments ne se combinent que dans certains rapports. Les atomes de Dalton, par leur poids atomique, ne permettent pas d'expliquer ce fait. Il est alors nécessaire de prêter aux atomes une autre propriété intrinsèque. C'est le principe de l'atomicité. Il va se développer lentement et par étapes. Il est contenu en germe dans la loi des proportions multiples et dans les lois de Gay-Lussac où l'on voit déjà que la capacité de combinaison du chlore, celle de l'oxygène et celle de l'azote avec l'hydrogène sont différentes. En 1858 Kekulé établit dans un mémoire, simultanément avec Couper, que le carbone doit être envisagé comme un élément tétratomique. Il constate que les combinaisons saturées du carbone se font toujours avec quatre autres atomes d'un élément monoatomique : le gaz des marais CH_4, le perchlorure de carbone, CCl_4, le chloroforme : $CHCl_3$, etc. Dans les séries renfermant plusieurs atomes de carbone, Kekulé admet alors que ceux-ci sont liés entre eux et peuvent former une chaîne. Wurtz (1864, p. 132), qui porte en France les idées sur l'arrangement des atomes, décrit ainsi celles de Kekulé :

> *Ainsi, dans toutes les combinaisons saturées qui renferment 2 atomes de carbone, 1 atome de carbone est directement combiné avec un autre atome de carbone et échange avec lui une unité de force chimique ; de telle sorte que des 8 unités de force chimique qui résident dans 2 atomes de carbone, 2 unités sont satisfaites par la combinaison du carbone avec le carbone, et qu'il n'en reste plus que 6 qui soient, pour ainsi dire, disponibles. Voilà pourquoi 2 atomes de carbone ne peuvent jamais fixer plus de 6 atomes d'un élément monoatomique ; voilà pourquoi le corps C_2H_6 constitue l'hydrocarbure-limite de la série des combinaisons de carbone et d'hydrogène qui renferment 2 atomes de carbone. M. Kekulé représente cette saturation partielle du carbone par du carbone, par une construction graphique analogue à la suivante*



Les résultats expérimentaux dans l'analyse des composés organiques montrent que la proportion en hydrogène dans les carbures ne dépasse pas celle donnée par une formule générale du type C_nH_{2n+2}. Ces mêmes carbures d'hydrogène sont dits alors saturés car ils ne peuvent entrer en combinaison directe avec aucun autre élément. Ils ne sont modifiables que par substitution. Wurtz donne l'exemple des métaux qui se distinguent par des combinaisons différentes avec l'atome de chlore (un, deux ou trois atomes).

> *De telles inégalités dans la capacité de combinaison des métaux pour le chlore sont inhérentes à la nature de leurs atomes ; c'est pour cette raison qu'on les désigne sous le nom d'atomicité. (Wurtz, 1869, p. 209)*

L'atomicité représente alors l'aptitude d'un élément à former des combinaisons plus ou moins complexes avec un autre élément. Elle doit être distinguée de l'affinité qui mesure la force de combinaison. Wurtz (1871, p. 143‑144) désigne l'atomicité comme synonyme de valeur de combinaison. Il souhaite introduire ce terme « anglais » de valence dans le langage scientifique français, cette notion permettant de différencier les atomes entre eux ce que ne permet pas de faire la notion d'équivalence. Les chimistes français qui vont accepter la notion d'atomicité vont tous abandonner celle d'équivalent. L'atomicité devient un instrument de prévision ainsi qu'un instrument de programmation pour la recherche, comme dans la découverte des glycols par Wurtz en 1856.

> *« Au lieu de retracer un mode hypothétique, elle indique les voies par lesquelles peut se faire une synthèse » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 191‑192).*

Pour exprimer l'atomicité, les chimistes adoptent une nouvelle formule dite « développée ». Alors que celles de Gerhardt permettaient de classer les corps en fonction d'une structure de base arbitrairement choisie comme type ou modèle, la formule développée met en évidence toutes les possibilités d'échanges et de combinaisons (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 191‑192).

5.2.3 De nouvelles représentations

Le besoin de formules s'amplifie pour pouvoir interpréter les nouveaux phénomènes tels que les isomères, les nouvelles réactions et les synthèses chimiques pour ne citer qu'eux (de Menten, 2013). Les corps simples ne sont plus nécessairement des atomes. Ceux-ci peuvent « *épuiser sur eux-mêmes* » leur capacité de combinaison ou une partie de leur capacité (Wurtz, 1871, p. 156). Ce n'est donc que vers le milieu des années 1850 que les idées d'Ampère retrouvent leur place. Les formules, rationnelles ou dites de constitution, doivent permettre de visualiser les relations qui existent entre les atomes dans une molécule (Dumon & Cokelez, 2006, p. 298).

> *MM. Kolbe et Kekulé veulent donc tous deux déterminer la manière dont les atomes élémentaires sont liés chimiquement entre eux dans une molécule composée. M. Kolbe désigne cette manière par le mot constitution ; quant à moi, je préfère la nommer structure*

> *chimique, dénomination à laquelle on n'a pas encore attaché de significations différentes, et qui par cela même est moins susceptible de donner lieu à des malentendus. (Boutlerow, 1864, p. 102 -103)*

Boutlerow considère que l'arrangement des atomes constitue plus qu'« *un assemblage mécanique et qu'il est le fondement des propriétés chimiques de ce composé* » (Dumon & Luft, 2008, p. 80). Il pense qu'« *à un composé donné on ne peut attribuer qu'une seule structure représentative et à une structure donnée ne peut correspondre qu'un composé* » (Dumon & Luft, 2008, p. 79). Il rejette alors les représentations de Gerhardt car celles-ci se contentent seulement d'indiquer le type de métamorphose que la molécule peut subir. De nombreux chimistes, Couper (1858), Kekulé (à partir de 1857), Boutlerow (1861), Loschmidt (1861), Crum Brown (1861), Hofmann (1865), proposent leurs représentations porteuses d'information sur la connectivité des atomes au sein de la molécule (Figure 45)[33]. Pour des raisons assez évidentes d'imprimerie, les notations de Couper puis celles de Wurtz (Figure 47) vont finir par s'imposer.

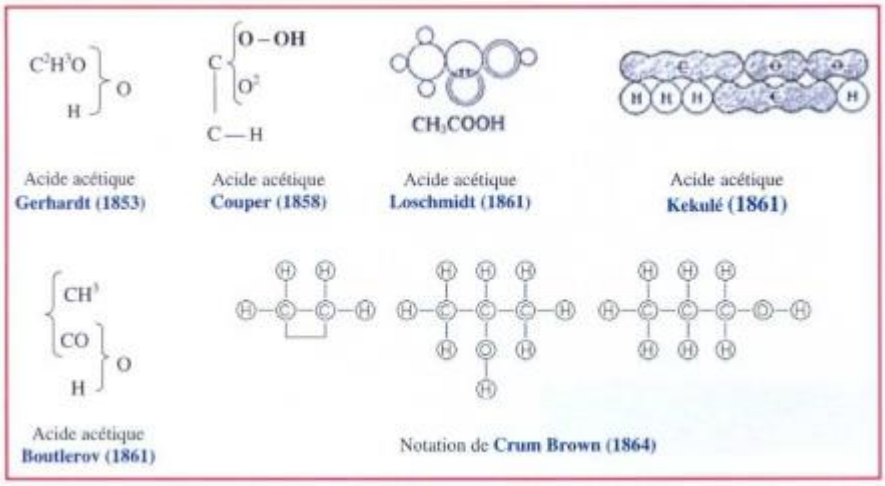


Figure 45 Évolution de la représentation de la molécule (Dumon & Cokelez, 2006, p. 53)

Les formules rationnelles, en permettant de visualiser la *structure chimique*, permettent à Boutlerow d'envisager l'existence de nouveaux isomères dans les chaînes carbonées à quatre carbones. Il met également en évidence l'isomérie de fonction dans les alcools. Boutlerow utilise en 1864 le terme de liaison chimique repris ensuite par Frankland en 1866. Frankland considère en effet que cela permet de donner une expression plus concrète au terme d'atomicité. Mais pour les chimistes de l'époque, en dehors de Loschmidt qui envisage pour

[33] Dans la représentation de Boutlerow (Figure 45), la parenthèse gauche indique l'union des atomes de carbone.

les molécules une « *structure rappelant notre système solaire* » (Dumon & Luft, 2008, p. 78), il n'est pas question d'une jonction matérielle entre les atomes (Dumon & Cokelez, 2006, p. 53). Comme pour la nomenclature de Lavoisier, les représentations doivent également avoir une vertu pédagogique. Frankland poussera en Angleterre l'utilisation de la notation de Crum-Brown, celle-ci semblant la plus accessible pour la compréhension de la notion de valence et la visualisation des différentes possibilités d'isomérie.

> *Pendant plus de dix ans j'ai acquis une expérience considérable dans leur utilisation avec des classes importantes d'étudiants chimistes, et j'ai été très satisfait du résultat. Par le moyen de cette méthode, les étudiants arrivent au même point dans leur curriculum, dans environ deux tiers du temps qui était nécessaire en utilisant la méthode ancienne. (Frankland cité par Dumon et Luft, 2008, p. 85)*

Chimiste allemand élève de Liebig, Hofmann fait une partie de sa carrière en Angleterre et développe un modèle en bois à des fins pédagogiques (Figure 46).

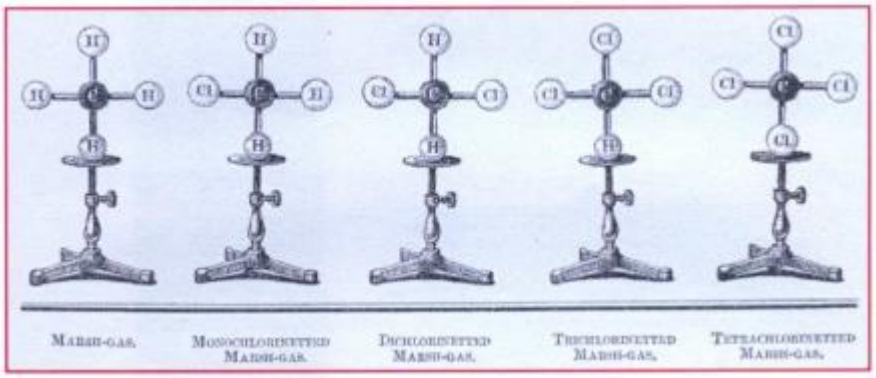


Figure 46 Les modèles pédagogiques d'Hofmann (Cokelez & Dumon, 2005, p. 297)

Chaque atome est symbolisé par une balle de cricket d'une couleur donnée : blanc pour l'hydrogène, vert pour le chlore, rouge pour l'oxygène, et noir pour le carbone. La valence d'un atome est figurée par le nombre de bras de la balle. Ainsi les balles vertes et blanches ont un seul bâton de métal comme raccordement, tandis que les noires en tant qu'atomes de carbones tétravalents sont dotées de quatre baguettes. Avec ce modèle Hofmann explique non seulement la structure de la molécule mais il met également en évidence la multiplicité des combinaisons possibles. C'est l'ancêtre de nos modèles moléculaires.

5.2.4 Le symbolisme de Wurtz

Le symbolisme, utilisé pour la première fois par Couper en 1858, et développé en France par Wurtz, est celui que nous utilisons encore maintenant. Il propose de relier les atomes de

carbone par un trait d'union. Wurtz élabore cette représentation à partir de la tétratomicité du carbone de Kekulé.

> *Dans tous les composés que nous venons de mentionner, un seul atome de carbone est invariablement uni à un nombre d'éléments dont les atomicités réunies atteignent toujours quatre et ne dépassent jamais ce nombre. On est en droit d'en conclure que le carbone y joue le rôle d'un élément tétratomique. Ce fait important, d'abord mis en lumière par M. Kekulé, peut être exprimé d'une manière saisissante si nous représentons les composés précédents par des formules atomiques développées, c'est-à-dire disposées de manière à montrer les rapports réciproques des atomes et leur saturation mutuelle. Dans ces formules, une atomicité échangée contre une autre est représentée par un simple trait d'union, deux atomicités par deux traits d'union superposés, etc. (Wurtz, 1871, p. 425)*

Les carbones non « *saturés* », c'est-à-dire ceux à qui il manque un atome d'hydrogène, peuvent s'unir entre eux pour retrouver leur saturation. Les quatre traits, autour de l'atome de carbone, peuvent donc symboliser l'état de saturation du carbone.

> *Prenons deux molécules de gaz des marais si nous enlevons à chacune d'elles un atome d'hydrogène, nous formerons deux restes CH_3, dans lesquels l'atome de carbone ne sera plus saturé. En perdant H, il a recouvré une force de combinaison qui va le rendre capable de s'unir de nouveau à un atome d'hydrogène ou à suppléer un atome d'hydrogène là où il en manque un. Les atomes de carbone vont donc échanger cette force en se portant l'un sur l'autre. Les voilà rivés l'un à l'autre par l'échange d'une unité de saturation, escortés chacun de 3 atomes d'hydrogène. Telle est la signification de la formule dans laquelle cet échange d'unités de saturation est marqué par les traits qui séparent les lettres. (Wurtz, 1871, p. 156)*

Cet auteur propose également des formules dites de nos jours semi-développées mettant en évidence la chaîne carbonée (Figure 47).

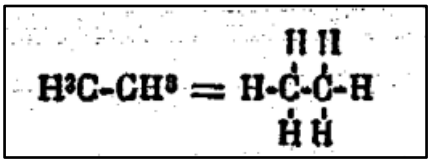


Figure 47 Formules proposées par Wurtz (Wurtz, 1871, p. 156)

Wurtz utilise cette notation pour la première fois dans les leçons qu'il réalise au collège de France en 1863. Il propose également une écriture pour la réaction chimique (Figure 47).

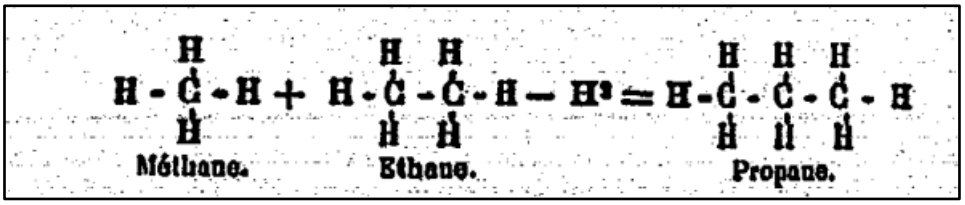


Figure 48 Une équation chimique (Wurtz, 1871, p. 157)

Wurtz ne considère pas sa notation comme la description de l'agencement des atomes dans l'espace mais bien uniquement comme un outil permettant d'indiquer les relations qui peuvent exister entre atomes.

> *Et ici il faut immédiatement se prémunir contre une erreur. Les expressions du genre de celle qu'on vient décrire ne sont pas destinées à marquer à chaque atome la position dans l'espace. Elles indiquent les relations qui existent entre les atomes. […] les traits d'union intercalés entre les atomes ne font que marquer leur degré de saturation. Ils indiquent le nombre et l'échange des unités de saturation ils ne signifient pas autre chose. Chaque atome de carbone quadrivalent est entouré de quatre traits ; les atomes d'hydrogène univalents ne sont liés que par un seul. (Wurtz, 1871, p. 157)*

Les formules typiques ne servent qu'à classer les molécules en fonction de leurs métamorphoses possibles. Avec les formules développées, les chimistes vont plus loin en posant l'hypothèse de l'atomicité et notamment celle de la tétratomicité du carbone, biatomicité de l'oxygène et l'atomicité simple de l'hydrogène (Figure 49) et en indiquant ainsi les arrangements des atomes au sein de la molécule. Elles permettent d'interpréter l'ensemble des faits connus en 1860, et notamment l'isomérie.

1. Le tableau suivant comprend des composés oxygénés de l'une et de l'autre espèce et fera comprendre la distinction dont il s'agit.

COMBINAISONS RENFERMANT DE L'OXYGÈNE TYPIQUE.

	Eau.	Hydrate de méthyle.	Oxyde de méthyle.	Hydrate d'éthyle.	Oxyde d'éthyle.	Oxyde d'éthylène.
Formules typiques.	$\left.\begin{matrix}H\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}CH^3\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}CH^3\\CH^3\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}C^2H^5\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}C^2H^5\\C^2H\end{matrix}\right\}O$	C^2H^4O
Formules de constitution.	H-O-H	$\begin{matrix}CH^3\\\dot{O}\\\dot{H}\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH^3\\\dot{O}\\\dot{C}H^3\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH^3\text{-}CH^3\\\dot{O}\\\dot{H}\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH^2\text{-}CH^3\\\dot{C}O\\\dot{C}\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH^2\\\dot{O}\\\dot{C}H^2\end{matrix}$

COMBINAISONS RENFERMANT DE L'OXYGÈNE DANS LE RADICAL.

	Aldéhyde.	Acétone.
Formules typiques.	$\left.\begin{matrix}C^2H^3O\\H\end{matrix}\right\}$	$\left.\begin{matrix}C^2H^3O\\CH^3\end{matrix}\right\}$
Formules de constitution.	$\begin{matrix}CH^3\\\dot{C}HO\end{matrix}$	$\begin{matrix}CH^3\\CO\\\dot{C}H^3\end{matrix}$

Figure 49 Les formules typiques et les formules de constitution (Wurtz, 1871, p. 139)

Une fois admise l'hypothèse de la possibilité de liaisons multiples pour les atomes, Wurtz propose une notation pour les doubles liaisons. L'union de deux atomes d'oxygène se fait par un double échange de leurs deux unités de saturation. Il représente donc cela par deux traits d'union. Il écrit :

> *Si O=O représente un couple saturé, le symbole -O-O- représente un couple non saturé et capable de fixer eux atomes d'hydrogène par exemple. Cette conception rend compte de la constitution de l'eau oxygénée. (Wurtz, 1871, p. 159)*

Mais refléter la structure des composés n'est déjà plus la seule ambition des formules développées. Tout comme les modèles moléculaires avec des tiges et des boules, introduites par Hofmann, ces dernières se laissent manipuler, ré-agencer et permettent d'imaginer, en visualisant, de possibles isomères dérivés d'un composé donné par déplacement des doubles liaisons ou autres.

> *Planes ou spatiales, les formules sont moins des miroirs de la structure que des instruments qui anticipent et assistent la fabrication de nouvelles molécules. Le nom dit moins la nature intrinsèque de l'objet nommé que le rapport des chimistes à cet objet, l'utilisation qu'ils peuvent en faire, le parti qu'ils peuvent en tirer. (Bensaude-Vincent, 2005, p. 222 - 223)*

5.3 Conclusion : la chimie organique ou un changement de paradigme

Avec la profusion des nouvelles substances apportées par la chimie organique, les chimistes ont à nouveau besoin de classer, nommer et représenter. Les tentatives pour élaborer une nomenclature adaptée à la chimie organique ne vont aboutir qu'à l'instant où les organiciens atomistes font autorité dans la communauté des chimistes et qu'un consensus existe autour de la structure de la molécule. Il en est de même pour les tentatives de classification et de représentations. Cela doit passer par le concept de l'atomicité. Pour arriver à cela, un changement de paradigme est nécessaire. La combinaison chimique ne peut plus être interprétée uniquement en termes de forces électriques. Place à la théorie des substitutions. La molécule ne peut plus être vue uniquement comme un corps binaire composé d'un radical électropositif et d'un autre électronégatif. Molécule et atome deviennent deux entités différentes. Le corps simple peut être constitué de plusieurs atomes identiques. L'atome est à la fois caractérisé par son poids et son atomicité. Les carbones peuvent s'unir pour former des chaînes ouvrant la voie à la chimie de synthèse. Les propriétés physico-chimiques des substances dépendent tout autant de la composition que de l'arrangement des atomes qui constituent les molécules. Avec les organiciens, l'évolution des théories fait à nouveau évoluer le langage. La formule rationnelle, plus qu'une écriture, permet de comprendre ce qui se passe au cours des réactions chimiques. Elle met en évidence les différences entre les substances en faisant ressortir les fonctions de la molécule, ce que la notation en équivalent ne permet pas de faire.

> *[…] si les formules chimiques servaient uniquement à représenter l'équivalence entre les corps Mais il n'en est pas ainsi. Leur langage est plus élevé et plus significatif. Elles sont faites pour marquer la complication des molécules. (Wurtz, 1864, p. 31)*

Ces nouvelles formules, en proposant une représentation de l'arrangement des atomes dans la molécule, sont à leur tour le point de départ de raisonnements simples et efficaces qui permettent de faire évoluer les théories.

> *[…] c'est la méthode chimique qui est modifiée, nous dirons même « inversée » : au lieu de partir des faits et de les exprimer par une formule suggérant les arrangements, on partira d'une constitution supposée – suggérée certes par les faits, mais non déduite naturellement d'eux – et on ira aux faits pour leur en demander la ratification. Inversion de la méthode chimique qui, au lieu de construire la théorie par généralisation et induction à partir des*

> *faits, demande aux faits de sanctionner la théorie première, théorie exprimée au moyen de la formulation, articulation désormais centrale de la méthode. (Blondel – Mégrélis citée par Dumon et Luft, 2008, p. 82)*

Chapitre 2 : La formule chimique au cœur des débats

Nous reprenons dans ce chapitre les débats qui se sont déroulés dans toute la première moitié du XIXe siècle autour de la formule chimique au regard de nos préoccupations didactiques. Le premier que nous étudions est celui entre les équivalentistes et les atomistes. La formule de l'eau a plusieurs fois évolué de Dalton jusqu'au congrès de Karlsruhe. Nous cherchons les différentes raisons de ces changements de même que celles de l'établissement des corps simples avec plusieurs atomes. Enfin comment faut-il lire la formule dans tous les ouvrages de l'époque ? Est-elle la formule de l'espèce chimique ou de la molécule ?

1. Une même formule mais plusieurs interprétations

Au milieu du XIXe siècle, deux théories se combattent en France pour interpréter les phénomènes chimiques : la théorie des équivalents et la théorie des atomes. Les équivalentistes refusent toutes les théories corpusculaires. Dans le clan des atomistes, certains ne voient dans l'atome qu'une hypothèse alors qu'il est une réalité pour d'autres. Pourtant tous utilisent le même formalisme pour représenter les espèces chimiques.

1.1 L'atome n'existe pas ou les équivalentistes

La théorie des équivalents se développe avec la loi des proportions multiples en même temps que toute la chimie d'analyse.

> *0n conçoit que l'idée de rapports simples et de proportions multiples n`ait pu se répandre dans la science qu'à une époque où les méthodes analytiques avaient atteint déjà un certain degré de perfection. (Pelouze & Fremy, 1854, p. 16)*

Elle est établie à partir des travaux successifs de Wenzel, Richter, Bergman, Dalton, Wollaston, Berzelius, Gay-Lussac, etc. Pour Regnault (1850), elle reprend l'ensemble des lois qui régissent les combinaisons chimiques, notamment la loi des proportions définies et la loi des proportions multiples de Dalton. Mais alors qu'ils acceptent cette dernière, les équivalentistes

refusent la théorie atomique. Wollaston remplace l'atome de Dalton par l'équivalent chimique, les deux notions utilisant les mêmes analyses pondérales. Malgré cette différence d'interprétation, les équivalentistes vont utiliser le symbolisme et les formules chimiques de Berzelius pour présenter leurs résultats.

1.1.1. Quand l'atome devient équivalent

En ce début de XIXe siècle avec le développement de l'analyse chimique, les chimistes sont capables de comparer les rapports pondéraux des éléments[34] dans différentes séries de combinaisons. Ils étudient préférentiellement celles avec l'oxygène, celui-ci donnant des combinaisons avec la plupart des corps simples. Prenons l'exemple de l'azote. Il peut faire cinq combinaisons avec l'oxygène. L'analyse chimique permet de déterminer les proportions pondérales entre l'azote et l'oxygène dans ces différentes combinaisons (Figure 50).

Protoxyde d'azote.....	Azote.....	63,63
	Oxygène.....	36,37
		100,00
Deutoxyde d'azote.....	Azote.....	46,66
	Oxygène.....	53,34
		100,00
Acide azoteux.....	Azote.....	36,84
	Oxygène.....	63,16
		100,00
Acide hypoazotique.....	Azote.....	30,43
	Oxygène.....	69,57
		100,00
Acide azotique.....	Azote.....	25,93
	Oxygène.....	74,07
		100,00

Figure 50 Proportions pondérales en azote et en oxygène dans les combinaisons possibles (Regnault, 1850, p. 519)

En ramenant l'oxygène à 100 dans la première combinaison, les chimistes obtiennent une valeur pondérale de 175 pour l'azote. Puis ils déterminent les quantités pondérales d'oxygène dans les autres formules en ramenant la valeur pondérale de l'azote à celle obtenue dans la première formule. Ils observent alors qu' un équivalent d'azote peut se combiner avec 1, 2, 3 4, 5 équivalents d'oxygène (Figure 51).

[34] Le terme « élément » est utilisé au sens de Lavoisier comme le constituant du corps simple.

Protoxyde d'azote.....	Azote.....	175,0
	Oxygène.....	100,0
		275,0
Deutoxyde d'azote.....	Azote.....	175,0
	Oxygène.....	200,0
		375,0
Acide azoteux.....	Azote.....	175,0
	Oxygène.....	300,0
		475,0
Acide hypoazotique.....	Azote.....	175,0
	Oxygène.....	400,0
		575,0
Acide azotique.....	Azote.....	175,0
	Oxygène.....	500,0
		675,0

Figure 51 Quantités pondérales d'oxygène pour un même poids d'azote (Regnault, 1850, p. 519-520)

Ces observations sont reproduites sur de nombreuses combinaisons. Dalton peut alors en déduire la loi des proportions multiples. Mais il va plus loin en proposant la théorie atomique qui permet alors d'interpréter ces combinaisons. Dans l'exemple ci-dessus, le plus petit terme pondéral de l'azote est pour Dalton une particule ultime qu'il nomme atome. Les poids proposés par Dalton pour les atomes sont donc les poids relatifs correspondant aux rapports pondéraux. En 1814, Wollaston, partant de celle des poids atomiques de Dalton, propose une nouvelle table en renommant les atomes équivalents. Dans un cours de chimie en 1854, la « *loi de Dalton* » est présentée comme la loi des combinaisons multiples des quantités pondérales (Pelouze et Fremy, 1854). La notion de particule ultime n'est pas évoquée.

> *Loi de Dalton*
>
> *Vers l'année 1807, Dalton, chimiste anglais, publia un ouvrage ayant pour titre : Nouveau système de philosophie chimique, dans lequel il exposa une théorie complète des proportions chimiques. Il établit dans cet ouvrage la loi des proportions multiples qui peut être formulée ainsi : lorsque deux corps se combinent en plusieurs proportions, si l'un d'eux est considéré sous le même poids dans les divers composés, les quantités pondérales de l'autre sont entre elles en rapport simple. En représentant le premier corps par A et le second par B, les autres composés formés par les deux mêmes corps seront exprimés par A + 2B, A + 3B, A + 4B, etc. (Pelouze et Fremy, 1854, p. 22)*

Atomes et équivalents sont donc confondus dès le départ et ils ne représentent que « *les proportions pondérales suivant lesquelles les corps se combinent* » (Wurtz, 1869, p. 43). La vraie théorie atomique n'est pas encore née mais celle des équivalents se développe à partir des rapports pondéraux observés dans les différentes combinaisons chimiques.

> *On donne le nom d'équivalents chimiques aux nombres qui représentent les quantités pondérales des différents corps qui peuvent se remplacer mutuellement dans les combinaisons. (Berthelot, 1860, p. 12)*

1.1.2 Que représente la formule pour un équivalentiste ?

1.1.2.1 Comment les chimistes déterminent-ils les équivalents ?

Les chimistes étudient en premier toutes les combinaisons des corps simples en commençant par les métalloïdes. Ils obtiennent alors les rapports pondéraux dans lesquels les combinaisons s'effectuent avec l'oxygène (Figure 52).

100 parties d'oxygène se combinent avec				
12,50 et avec	6,25	»	»	parties d'hydrogène ;
442,00	221,00	88,5	»	parties de chlore ;
200,00	100,00	66,6	»	parties de soufre ;
175,00	87,5	58,3	43,7	parties d'azote ;
75,00	37,5	»	»	parties de carbone ;

Figure 52 Exemple de table d'équivalents (Laurent, 1854, p. 2)

Les expériences et les analyses leur permettent de constater que si 12,50 d'hydrogène, 442 de chlore, 200 de soufre, etc. peuvent se combiner avec 100 d'oxygène, référence choisie pour déterminer les poids, alors les 12,5 d'hydrogène peuvent aussi se combiner avec 442 de chlore, 200 de soufre, etc... Puis ils continuent avec les métaux en étudiant les oxydes. L'analyse leur donne les quantités pondérales qui se combinent avec 100 parties d'oxygène (Figure 53).

100	d'oxygène	+ 1349	d'argent	= l'oxyde d'argent ;
100	—	+ 250	de calcium	= la chaux ;
100	—	+ 158	magnésium	= la magnésie ;
100	—	+ 489	potassium	= la potasse ;
100	—	+ 858	baryum	= la baryte ;
100	—	+ 1294	plomb	= l'oxyde de plomb.

Figure 53 Proportions pondérales des combinaison des métaux avec l'oxygène (Pelouze & Fremy, 1854, p. 30)

Puis ils analysent les sulfures formés avec ces mêmes métaux. Il faut 200 de soufre avec les 1349 d'argent. Ils observent alors que 200 de soufre s'unissent également avec les autres métaux en conservant toujours les mêmes quantités pondérales (Figure 54).

250 de calcium pour produire le sulfure de calcium ;			
158 de magnésium	—	—	de magnésium ;
489 de potassium	—	—	de potassium ;
858 de baryum	—	—	de baryum.

Figure 54 Quantité pondérale des métaux qui se combinent avec 200 de soufre (Pelouze & Fremy, 1854, p. 30)

Donc 200 de soufre et 100 d'oxygène produisent « *des séries parallèles d'oxydes et de sulfures métalliques* » (Pelouze & Fremy, 1854, p. 30). Ce même travail peut être reproduit avec les autres quantités présentées dans la Figure 52. Les chimistes considèrent alors que toutes ces quantités pondérales sont équivalentes et les nomment « équivalents ».

> *Les quantités pondérales 12,5 d'hydrogène, 100 d'oxygène, 200 de soufre, 491 de sélénium, 443,2 de chlore, 978,3 de brome, 1578,2 d'iode présentent donc des propriétés relatives très remarquables : elles s'équivalent pour former des combinaisons binaires analogues. C'est à cause de cela qu'on a désigné ces quantités pondérales équivalentes par les noms de nombres proportionnels ou d'équivalents chimiques. (Regnault, 1850, p. 526)*

La référence choisie est la quantité pondérale 100 pour l'oxygène qui représente l'équivalent d'oxygène. L'équivalent des autres corps simples est la quantité pondérale qui peut se combiner avec l'équivalent d'oxygène.

1.1.2.2 Les nombres proportionnels

Mais l'équivalent n'est pas une règle suffisante pour caractériser les corps simples. En effet, deux corps simples peuvent s'unir en formant plusieurs combinaisons. Quelle est alors la combinaison qui permet de définir l'équivalent ? Les chimistes réalisent et analysent pour chaque corps simple les proportions pondérales des oxydes qu'ils peuvent faire avec l'oxygène. Comme il y a plusieurs combinaisons possibles, soit plusieurs équivalents, ils associent à chaque corps simple une quantité pondérale dite « nombre proportionnel ». Celui-ci correspond pour chaque corps simple à la proportion avec laquelle il se combine avec 100 parties d'oxygène au premier degré d'oxydation[35].

> *On est convenu alors de prendre pour équivalent d'un corps la quantité pondérale de ce corps qui s'unit à 1 équivalent, c'est-à-dire à 100 d'oxygène, pour produire le premier degré d'oxydation. (Pelouze & Fremy, 1854, p. 31)*

[35] Ou la plus petite proportion d'oxygène dans les différentes combinaisons possibles.

Si l'étude des oxydes n'est pas possible, les chimistes procèdent alors en fonction des affinités chimiques. Les composés chlorés et soufrés sont particulièrement utilisés. Les chimistes recherchent alors les quantités pondérales qui se forment avec 443 de chlore et 200 de soufre. Cela leur permet d'établir des tableaux d'équivalents (Figure 55).

NOMS.	SYMBOLE.	POIDS DE L'ÉQUIVALENT.
Oxygène.	O.	100
Soufre.	S.	200
Chlore.	Cl.	443
Brôme.	Br.	1000
Iode.	I.	1586
Argent.	Ag.	1349
Calcium.	Ca.	250
Potassium.	K.	489
Baryum.	Ba.	858
Plomb.	Pb.	1294

Figure 55 Équivalents de quelques corps simples (Pelouze & Fremy, 1854, p. 31)

Si cela ne suffit toujours pas, ils choisissent alors une référence, par exemple l'argent, et étudient les sels de sulfate ou de nitrate des différents métaux en référence à l'argent. Ils trouvent alors les quantités de métaux équivalentes entre elles. Ils peuvent procéder de même avec les acides et les oxydes. De combinaisons en combinaisons et de proche en proche, ils déterminent les quantités pondérales équivalentes à 100 parties d'oxygène et établissent le tableau des équivalents ou des nombres proportionnels de l'ensemble des corps simples adoptées par tous les « équivalentistes » (Annexe 19.1). Un corps simple peut donc avoir plusieurs équivalents, par contre il n'aura qu'un seul nombre proportionnel. Mais les termes équivalents ou nombres proportionnels sont souvent confondus dans les ouvrages des chimistes. Grimaux (1866, p. 13) propose de réserver le mot équivalent à l'idée « *d'analogie de fonction* » et le nombre proportionnel au « *rapport pondéral* ». La connaissance des nombres proportionnels devrait plutôt servir à prévoir au cours d'une réaction chimique les quantités de substances qui réagissent et qui sont produites (Grimaux, 1866, p. 26).

1.1.2.2 La formule chimique

C'est à ce stade que la confusion commence entre les équivalentistes et les atomistes. Ils vont en effet utiliser les mêmes notations mais celles-ci n'ont pas la même signification. Pour la combinaison correspondant aux nombres proportionnels, les équivalentistes associent une formule binaire. Les équivalents ou nombres proportionnels sont représentés par les symboles de Berzelius. 100 parties d'oxygène sont représentées par O. 12,5 parties d'hydrogène représentent l'équivalent d'hydrogène au premier degré d'oxydation et sont

donc représentées par H. L'eau correspond à la combinaison de 100 parties d'oxygène avec 12,5 parties d'hydrogène et a donc pour formule HO. Pelouze et Fremy, dans leur cours *Traité de chimie minérale* (1854, p. 69-72), donnent le tableau de tous les équivalents et de leurs combinaisons avec l'oxygène. Les équivalentistes considèrent que tous les corps simples sont équivalents. Ils doivent donc tous pouvoir donner une combinaison simple avec l'oxygène. Nous trouvons dans le tableau (Pelouze & Fremy, 1854, p.69-72) entre autres les formules suivantes : HO pour l'eau, KO pour la potasse, NaO pour la soude. Dans la famille de l'azote, la série des oxydes est par degré d'oxydation croissant : AzO, AzO^2, AzO^3, AzO^4, AzO^5. Pour rappel, la série que nous connaissons est : N_2O, NO, NO_2^-, NO_2 et NO_3^-.

1.1.2.3 Des règles supplémentaires

La stratégie pour fixer les formules pose des problèmes. En effet, les chimistes peuvent être amenés à trouver des degrés d'oxydation inférieurs encore inconnus au moment où ils établissent leurs tables. C'est le cas avec l'argent et la découverte de Wöhler d'un degré d'oxydation inférieur donnant alors AgO pour le sous-oxyde trouvé par Wöhler et AgO^2 pour l'oxyde ordinaire. La même mésaventure pourrait se produire avec l'iode. Pour pouvoir conserver une formule analogue dans les combinaisons réalisées entre l'hydrogène et le chlore ou l'iode, il est en effet nécessaire de considérer que toutes les combinaisons de l'iode avec l'oxygène n'ont pas été découvertes. Pelouze explique dans son cours qu'il est nécessaire, avant de donner tous les équivalents ou nombres proportionnels, de commencer par déduire la formule des combinaisons de l'iode et de l'oxygène. Les équivalentistes utilisent alors les analogies chimiques et la loi de l'isomorphisme. Ils observent notamment que le seul oxyde d'aluminium connu est isomorphe avec l'oxyde de fer Fe^2O^3. Donc la formule du tableau des équivalents est pour l'aluminium Al^2O^3 et non AlO, formule correspondant à la règle initiale de la combinaison binaire.

> *La formule d'un corps se fixe en général à l'aide des analogies chimiques ou de considérations déduites des lois de l'isomorphisme. (Pelouze & Fremy, 1854, p. 35)*

L'ensemble des règles utilisées pour les nombres proportionnels sont rappelées par Pelouze dans son cours (voir annexe 19.2).

1.1.3 Plusieurs formules possibles

Pour définir leurs formules, les équivalentistes font donc le choix du nombre proportionnel qui donne la formule la plus simple et celui qui permet d'« *attribuer aux composés analogues des formules analogues* » (Laurent, 1854, p. 4). Les nombres dans les formules indiquant des proportions, la formule la plus simple pour le gaz oléifiant, ou de nos jours l'éthène, est CH^2 au lieu de C^2H^4.

> *Monsieur Berthelot a pourtant quelquefois écrit le gaz des marais*[36] *CH^2 au lieu de C^2H^4.*
> *(Wurtz, 1877, p. 1256)*

Regnault (1850, p. 524) indique que les combinaisons du soufre sont : SO, SO^2, $SO^{5/2}$, SO^3 mais qu'on les écrit « *ordinairement* » : S^2O^2, SO^2, S^2O^5, et SO^3. S'il fait le choix de S^2O^5, c'est parce que la formule indique le poids qui va se combiner avec 1 équivalent de potasse. Mais on peut tout aussi bien choisir des réactions autres qu'acido-basiques. La formule redevient alors $SO^{5/2}$. Dans le cas de l'hydrogène et de l'oxygène, la seconde formule est alors soit $OH^{1/2}$ soit O^2H. Pour Laurent (1854, p. 2-4), il n'est pas si facile de définir la formule la plus simple. Faut-il prendre pour le peroxyde de fer $Fe^{2/3}O$ ou Fe^2O^3, pour l'acide phosphorique $P^{1/3}O^{5/3}$ ou PO^5, pour le perchlorure de carbone C^2Cl^3 ou C^4Cl^6, etc. ? 442 parties de chlore peuvent se combiner avec 200 et 66,6 parties de soufre, ce qui donne alors ClS et Cl^3S ou $ClS^{1/3}$ et ainsi de suite. Les nombres proportionnels sont en plus obtenus par différentes voies d'affinités : les oxydes, les sels, les chlorures, les composés soufrés pour la chimie minérale, et cela est encore plus complexe en chimie organique où la confusion règne totalement dans les classifications. Les chimistes vont obtenir différents équivalents et par voie de conséquence différentes formules pour un même composé, ce que nous avons déjà signalé dans le premier chapitre en chimie organique. En ne voulant utiliser que les faits, les équivalentistes se retrouvent en face de plusieurs formules possibles. Pour essayer de gérer les incohérences, ils proposent plusieurs types de nombres proportionnels. Regnault (1850) explique qu'il existe deux notations possibles : les équivalents, expression directe des faits et les nombres proportionnels thermiques, qui satisfont à la fois aux relations numériques établies par l'analyse et aux lois de l'isomorphisme et des chaleurs spécifiques. La formule HO associée pour l'eau en équivalent devient H^2O en nombre proportionnel thermique. Plusieurs formules sont alors possibles pour le même composé : HCl et H^2S en équivalent ou H^2Cl^2 et HS en nombre proportionnel « thermique ». Il écrit à ce propos que rien ne s'oppose à ce qu'ils

[36] Wurtz indique p. 1352 qu'il s'est trompé et qu'il s'agit en fait du gaz oléfiant et non du gaz des marais.

adoptent ces nouveaux nombres à la place de ceux choisis initialement car « *ils satisfont à toutes les lois des combinaisons* » (Regnault, 1850, p. 545).

1.1.4 Le refus de la théorie atomique

Les atomes de Dalton représentent les proportions pondérales suivant lesquelles les corps se combinent. En choisissant une référence, il est possible d'exprimer aussi bien les poids des atomes ou les nombres proportionnels des équivalentistes. En effet les formules de Dalton s'établissent à partir du principe de simplicité, comme celles des équivalentistes. Wollaston transforme la théorie atomique en théorie des équivalents chimiques, ce qui, pour Comte (1869, p. 124) offre un énoncé bien plus positif que celui de Dalton. Les termes atome, équivalent et nombre proportionnel deviennent alors synonymes pendant toute la première moitié du XIXe siècle.

> *A cette époque on pouvait donc regarder comme synonymes les expressions : poids atomique, nombre proportionnel, équivalents. Ce dernier mot est de Wollaston. H. Davy employait de préférence l'expression « nombres proportionnels ». (Wurtz, 1886, p. 24)*

Mais les équivalentistes comme Gmelin, Berthelot, Regnault, Dumas finissent dans un deuxième temps par rejeter complètement la théorie atomique.

> *Ce qui nous reste, c'est la conviction que la chimie s'est égarée là, comme toujours, quand, abandonnant l'expérience, elle a voulu marcher sans guide au travers des ténèbres. L'expérience à la main vous trouvez les équivalents de Wenzel, de Mitscherlich, mais vous cherchez vainement les atomes tels que votre imagination a pu les rêver en accordant à ce mot consacré malheureusement dans la langue des chimistes une confiance qu'il ne mérite pas. […] Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience. Et jamais en chimie, nous ne devons aller plus loin que l'expérience. (Dumas, 1836, p. 289-290)*

Philosophiquement, ils veulent se raccrocher aux faits. Ils reprochent aux atomistes leurs hypothèses alors que les sciences ne devraient consister qu'en une « *série d'énoncés vérifiables expérimentalement, par des observations autorisées* » (Haéri & Roche, 1999, p. 90). Leur point de vue est philosophique. Ils sont dans une démarche exclusivement positiviste. Raisonner en atome n'apporte rien aux raisonnements de la chimie et est donc totalement inutile.

> *Pour expliquer les lois de la chimie quantitative, est-il indispensable au surplus de recourir à la supposition des atomes ? […] A cette question je répondrai ici sans hésiter : non, cela n'est pas nécessaire. (Dumas, 1836, p. 233)*

Cela correspond même à une perte de temps. Les chimistes, plutôt que de proposer des hypothèses stériles car invérifiables, feraient mieux de passer du temps en laboratoire. Seules les mesures expérimentales peuvent faire progresser la chimie.

> *[…] et si maintenant j'ajoute qu'au lieu de creuser plus à fond ces hypothèses il vaudrait bien mieux chercher des bases certaines pour appuyer des théories plus solides, vous serez très-probablement de mon avis. Vous penserez comme moi, sans nul doute, qu'il sera plus rationnel et plus utile de s'attacher à déterminer les densités des vapeurs qui nous sont inconnues par les méthodes que nous possédons, quand elles peuvent s'y appliquer, ou bien d'imaginer de nouvelles méthodes pour les cas où celles-ci sont inapplicables, sans dédaigner la recherche des densités des corps composés. (Dumas, 1836, p. 270-271)*

Regnault veut rester au niveau des équivalents parce qu'il est persuadé de l'exactitude de cette approche. La théorie atomique ne présente aucun avantage face aux équivalents et permet juste aux chimistes qui l'utilisent de répondre à un besoin de support matériel pour les équivalents. Seule différence, les atomistes associent les poids pondéraux aux poids des atomes.

> *La théorie des équivalents sera toujours exacte, quelle que soit l'idée que l'on adopte sur la constitution moléculaire des corps, parce qu'elle est l'expression immédiate des faits constatés par l'expérience. (Regnault, 1850, p. 546)*

Les échanges peuvent parfois être rudes, notamment entre Berthelot et Wurtz à l'Académie des Sciences.

> *Qui a jamais vu, je le répète, une molécule gazeuse ou un atome ? La notion de la molécule est indéterminée, au point de vue de nos connaissances positives ; tandis que l'autre notion, celle de l'atome, est purement hypothétique. (Berthelot, 1877, p. 1193)*

La posture des équivalentistes, où seuls les résultats expérimentaux comptent et aucune hypothèse ne doit guider la science, se situe davantage dans le discours que dans les faits. Pour pouvoir conserver les notations en équivalent, des ajustements sont nécessaires. Berthelot (1877, p. 1273) doit admettre la notion d'équivalent multiple et des notations différentes des formules en équivalents en chimie organique et en chimie minérale, ce que Wurtz (1877, p. 1351) ne se prive pas de lui faire remarquer au cours des séances de

l'Académie des Sciences. Mais la raison première amenant au rejet de la théorie atomique semble être la non stabilité de celle-ci. Il y a déjà des problèmes de définition. Les chimistes ont successivement employé les atomes et les nombres proportionnels ou les équivalents pour représenter la composition des corps. Laurent semble penser que la notation atomique est soumise à trop d'incertitudes et de variations pour pouvoir être acceptée aisément par les équivalentistes, ce qui a entraîné son abandon. À l'inverse, la notation par équivalent représente « *simplement les résultats de l'expérience et ne paraît pas être sujette à des changements qui dépendent des opinions individuelles et des progrès de la science* » (Laurent, 1854, p. 1).

> *La définition de l'équivalent est une notion claire, susceptible, en général, d'être réalisée par des expériences précises. Il n'en est pas de même de la définition de l'atome, qui repose tantôt sur la notion d'équivalence déguisée ; tantôt sur la notion de molécule gazeuse, ce qui est une pétition de principe ; tantôt sur la notion de chaleur spécifique des éléments solides, quantité variable et qui ne peut servir de base à une définition rigoureuse. (Berthelot, 1877, p. 1193)*

Entre atomistes, les tableaux de poids et les formules ne sont pas tous identiques. C'est une des raisons qui amène Dumas à rejeter les atomes. Il se retrouve dans une impasse avec la détermination de certains poids atomiques dont le mercure. Le poids atomique obtenu à partir de la loi des chaleurs spécifiques et le poids atomique calculé à partir de la densité de vapeur sont différents. Pour dépasser cette difficulté, il faut sacrifier un des deux principes. Dumas choisit de rejeter la théorie atomique dans son ensemble et revient aux faits et donc aux nombres proportionnels. Toute la difficulté pour les atomistes pendant cette première moitié de XIXe siècle réside en fait dans la détermination de la formule des corps simples. Nous développons ce point un peu plus loin. Enfin, pour Berthelot, le langage des formules est dangereux car, par sa simplicité et sa facilité algébrique, il peut séduire et amener ainsi ceux qui l'utilisent à confondre les formules avec la réalité. Les théories élaborées en chimie organique sont issues de ces mécanismes algébriques que rendent possibles les formules. Le langage devient la théorie alors qui ne devrait porter que les faits.

> *En effet, presque tous les systèmes construits en chimie organique depuis vingt-cinq ans présentent ce caractère commun et singulier d'être fondés à peu près exclusivement sur la combinaison des signes et des formules. Ce sont des théories de langage et non des théories de faits. Aussi est-il arrivé bien souvent aux chimistes de prendre les propriétés des nombres*

> *cachées dans leurs formules pour les propriétés mystérieuses des êtres véritables : illusion analogue à celle des pythagoriciens, mais peut être moins justifiée par la nature des sciences expérimentales. (Berthelot, 1860, p. CXXIV)*

1.2 Les atomistes

> *Il y a donc dans les sciences deux parties bien distinctes : une, toute positive, qui est dominée par l'observation directe des faits, et une, toute spéculative, qui est le fruit de l'imagination de l'homme. citant (Baudrimont cité par Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 141)*

L'atome de Dalton est, au final, assez peu différent des équivalents. Mais l'hypothèse atomique, rejetée dans un premier temps, va revenir sur le devant de la scène avec le développement de la chimie organique.

1.2.1 Pourquoi l'hypothèse atomique devient-elle à nouveau nécessaire ?

Laurent considère que les tableaux des équivalents sont un mixte entre les nombres proportionnels, les équivalents et les idées atomistiques. Pour les dresser, les chimistes se servent de l'équivalence des fonctions, de conventions, de l'isomorphisme, de la densité des vapeurs, de spéculations sur l'arrangement des atomes, etc. Mais le développement de la chimie organique amène de nouveaux faits que les équivalents ne peuvent plus expliquer.

> *[…] les bases du système des équivalents chimiques et de la notation qui en dérive, telles que Dalton, Wollaston, Davy, Gay-Lussac, Gmelin les avait posées sont trop étroites pour soutenir l'édifice agrandi de la chimie. Notre système actuel de poids atomiques et notre notation reposent sur des fondements plus larges. Pour les asseoir solidement, il a fallu des efforts multiples qui ont été soutenus avec persévérance, pendant 30 ans. (Wurtz, 1886, p. 58)*

1.2.1.1 L'hypothèse atomique permet d'interpréter l'ensemble des lois

La théorie atomique n'a rien d'arbitraire. Cette hypothèse est fondée à la fois par les données chimiques, obtenues dans les analyses, et les données physiques (Dulong et Petit, loi des densités des gaz, loi de l'isomorphisme). Enfin c'est très certainement l'hypothèse la plus simple pour expliquer les combinaisons des corps en proportions pondérales fixes et simples. Grimaux dans sa thèse *Equivalents, Atomes, Molécules* (1866, p. 81), résume ainsi ce qui doit permettre de choisir entre la théorie des atomes et des équivalents :

Nous n'avons donc qu'à résumer le débat et à comparer en quelques lignes la théorie des équivalents et la théorie atomique.

I. Les équivalents n'indiquent que des rapports pondéraux ; ils sont basés sur une convention.

II. Quand ils sont calculés logiquement, d'après la convention établie, ils masquent toutes les analogies des corps.

III. Si en les établissant on veut respecter ces analogies, on a un système bâtard, où se confondent les nombres obtenus d'après la convention et les nombres obtenus d'après les analogies.

IV. Le nom d'équivalent rappelle une idée fausse ; l'acide azotique n'est pas l'équivalent de l'oxyde de potassium ; les prétendus équivalents sont des nombres proportionnels.

V. Les poids atomiques indiquent les rapports pondéraux aussi bien que les équivalents.

VI. Ils sont rapportés à un même volume gazeux.

VII. Ils s'accordent avec la loi des chaleurs spécifiques.

VIII. Ils respectent les analogies chimiques et s'accordent avec la loi de l'isomorphisme.

1.2.1.2 Des anomalies dans les équivalents

À la différence des équivalentistes, les atomistes vont surtout partir des lois volumétriques de Gay-Lussac interprétées par Avogadro et Ampère.

> *La notation actuelle est fondée sur des faits. Elle résume et concilie en quelque sorte les découvertes les plus importantes relatives aux combinaisons chimiques, celles de Richter, de Dalton et de Gay-Lussac. Elle repose en particulier sur une application rigoureuse de la loi des volumes découverte par ce dernier et interprétée par Avogadro et Ampère. Et quand la loi des volumes nous fait débat, en raison de la fixité des éléments ou de leurs combinaisons, nous invoquons pour la détermination des poids atomiques et pour la construction des formules, la loi des chaleurs spécifiques ou la loi de l'isomorphisme. (Wurtz, 1886, p. 240)*

Les équivalentistes se refusant à toute hypothèse essaient de faire correspondre la loi de Gay-Lussac à leurs principes avec des arguments aussi peu scientifiques que « *il est clair* » ou « *il est évident* ». Les volumes obtenus expérimentalement par Gay-Lussac doivent correspondre aux équivalents.

> *2 volumes d'hydrogène se combinent avec 1 vol. d'oxygène et produisent 2 volumes de gaz aqueux. Comme nous avons admis que l'eau était formée de 1 éq. d'hydrogène et de 1 éq.*

> *d'oxygène, il est clair que l'on peut dire que l'équivalent d'oxygène est représenté par 1 vol. de gaz oxygène et que l'équivalent d'hydrogène est représenté par 2vol. de ce gaz. Quant à l'équivalent du gaz aqueux, il est évidemment représenté par 2 volumes (Regnault, 1850, p. 540)*

Regnault (1850, p. 542) est prêt à renoncer aux lois volumétriques, se rendant bien compte que celles-ci entraînent de nombreuses « *anomalies* » dans les équivalents. Les atomistes utilisent au contraire les relations volumétriques pour appuyer leur raisonnement.

1.2.1.3 Les équivalences ne tiennent plus

Les atomes de Dalton diffèrent uniquement par leur poids. Ils sont équivalents pour les combinaisons chimiques qui doivent se faire au plus simple. Mais avec le développement de la chimie organique, les chimistes constatent des différences de combinaisons entre l'hydrogène et les atomes, ou équivalents, de chlore, d'oxygène, d'azote et de carbone. Il y a alors cohérence avec la loi des volumes de Gay-Lussac et cela rompt l'équivalence des atomes.

> *Le principe de l'équivalence invoqué par Dalton, Wollaston, Gay Lussac, Gmelin, pour la fixation des équivalents (que Dalton et Gmelin appelaient poids atomiques) serait excellent si on pouvait l'appliquer rigoureusement soit aux éléments soit aux combinaisons. Mais nous savons aujourd'hui que tous les atomes ne s'équivalent pas et qu'il en est de même pour les molécules et pour les réactions qu'elles engendrent. (Wurtz, 1886, p. 56)*

La découverte des acides pouvant se combiner avec plusieurs équivalents de la même base embarrasse également les équivalentistes. Il devient impossible de considérer l'acide nitrique comme équivalent de l'acide phosphorique. Tous les acides et toutes les bases ne sont donc plus équivalents. Cela met en péril l'édifice dont les fondations reposent sur les travaux de Wenzel et Richter à propos des équivalents acido-basiques pour former les sels.

> *Au reste, Gmelin a bien senti qu'il avait là une difficulté, car il mentionne les acides polybasiques comme formant une exception à la règle de l'équivalence. (Wurtz, 1886, p. 57)*

Les organiciens découvrent également que certains alcools comme l'éthanol[37], le glycol, la glycérine ne réagissent pas avec la même quantité d'acide acétique pour former un éther saturé. Là encore, tous les alcools ne s'équivalent pas.

> *[…] après avoir signalé une différence entre les atomes et les équivalents, les progrès de la science ont conduit à séparer la notion de la molécule de celle de l'équivalent d'un corps*

[37] L'éthanol se nomme alcool avant la réforme de la nomenclature de la chimie organique.

> *composé. Les molécules, en effet, ne sont pas toujours équivalentes entre elles. (Wurtz, 1864, p. 31)*

Mais c'est au moment où les atomistes vont émettre l'hypothèse de corps simples pouvant être constitués de plusieurs atomes et donc énoncer la différence entre atome et molécule qu'ils vont irrémédiablement se séparer de la vision équivalentiste.

1.2.2 L'atome : hypothèse ou réalité ?

L'hypothèse atomique lancée par Dalton et reprise par Berzelius va surtout se développer avec les organiciens. Penser la molécule en termes d'arrangement des atomes est une hypothèse indispensable pour la chimie organique. Mais pour certains, l'atome est perçu comme une réalité.

1.2.2.1 Les instrumentalistes : l'atome est une hypothèse

Les atomes sont des entités inobservables et renvoient à des constructions purement intellectuelles et non à des entités réelles. Les théories scientifiques sont de « simples instruments permettant la prédiction de phénomènes » (Barberousse, Kistler & Ludwig, 2000, p. 283). Pour Laurent, l'atome est une hypothèse et les formules « *synoptiques* » des molécules un outil nécessaire pour progresser en chimie organique. Il ne recherche pas la cause des phénomènes mais un modèle qui lui permet de les interpréter.

> *Comme le fait remarquer Clara de Milt, Laurent ne dit pas que les composés « contiennent » tel ou tel groupement ou radical mais « peuvent être représentés par » ; il y a ici toute la différence entre la réalité et le modèle qui est censé représenter cette réalité. Le chimiste ne peut prétendre atteindre l'objet mais seulement une représentation de l'objet. (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 152)*

Il est un des premiers à proposer une interprétation en termes d'arrangement des atomes mais cela ne peut correspondre à une réalité qui reste inaccessible. Par contre, les propriétés chimiques des corps peuvent être reliées à l'hypothèse de cet arrangement. La formule « *synoptique* » est un outil qui lui permet de comparer un corps à un autre et indiquer ainsi les similarités entre deux composés. Laurent représente l'arrangement des atomes en relation étroite avec les réactions chimiques et recherche les similitudes dans les propriétés chimiques (Scheidecker-Chevallier, 2000, p135).

> *[…] Laurent va se servir de l'arrangement des atomes comme d'un concept théorique, principe organisateur au sein d'une méthode. (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 135)*

D'autres chimistes, comme Kekulé, adoptent la même posture que Laurent.

> *[...] pour Kekulé, fidèle disciple de Gerhardt, les symboles des éléments ne représentent pas des atomes, mais seulement la grandeur de leur valence. Ses formules rationnelles expriment des réactions et non des constitutions réelles des molécules. Kekulé exploite le concept d'atomicité sans croire à l'existence réelle des atomes. (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 194)*

Mais est-ce par conviction ou pour éviter un affrontement trop direct avec les équivalentistes ?

1.2.2.2 Les réalistes : l'atome existe

Les réalistes, à l'inverse des instrumentalistes, considèrent que « les termes renvoyant à des entités inobservables sont susceptibles de renvoyer à des entités réelles » (Barberousse et al., 2000, p. 283). Nous avons déjà indiqué dans la première partie que Dalton a une vision réaliste de l'atome. Berzelius, Gaudin et Wurtz recherchent tous les trois des causes aux phénomènes chimiques et croient tous les trois à l'existence de l'atome. Mais leur vision de l'atome va prendre des formes différentes.

1.2.2.2.1 Berzelius

Berzelius considère l'hypothèse de Dalton comme l'« *un des plus grands pas que la chimie ait jamais fait vers son perfectionnement* » (Berzelius, 1819, p. 12). Il est totalement convaincu de la pertinence de la théorie atomique,

> *Je choisirai de préférence la dénomination d'atome, parce que, mieux qu'aucun autre, elle exprime notre idée. (Berzelius, 1819, p. 23)*

et, semble-t-il, de l'existence de ces atomes.

> *Nous supposons donc que lorsqu'un corps a été divisé jusqu'à un certain point, on obtient des particules dont la continuité ne peut être détruite par aucune force mécanique, c'est-à-dire dont la continuité dépend d'une force supérieure à toutes celles qui peuvent produire une division mécanique. Ces particules, nous les appelons atomes. (Berzelius, 1835, p. 21)*

Dans sa vision dualistique, c'est l'atome qui possède une polarité électrique dont « *l'inégale intensité est la cause de la différence de force avec laquelle s'exercent leurs affinités* »

(Berzelius, 1835, p. 55). Il se refuse par contre à envisager les arrangements des atomes car il considère que cela ne sera jamais accessible et que ce ne sont que conjectures inutiles.

1.2.2.2.2 Gaudin

Comme pour Berzelius, l'atome existe pour Gaudin.

> *[…] dans le moindre grain de poussière, qui nous paraît inerte, il existe des assemblages d'atomes vibrants, d'une ordonnance magnifique, alignés entre eux avec une précision fabuleuse, et en si grand nombre que l'imagination la plus vive en est confondue. (Gaudin, 1873, p. 10)*

Comme Berzelius, Gaudin recherche une cause aux combinaisons chimiques. Mais à la différence de Berzelius qui la recherche dans les phénomènes électriques, elle est pour Gaudin dans l'arrangement architectural des atomes pour former les molécules (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 141).

> *Gaudin a cherché le « vrai » arrangement qu'il appelle architecture moléculaire. (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 160)*

Gaudin est un des rares chimistes à utiliser les notations de Dalton car, comme Dalton, il recherche une « symétrie optimale dans l'édifice moléculaire » (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 144). Lorsqu'il pense connaître sans ambiguïté la formule empirique d'une molécule, il recherche de façon réaliste la façon dont les atomes de la formule doivent se positionner. Pour Gaudin, qui voit à la fois les atomes comme une réalité et qui pense l'arrangement des atomes comme un cristallographe, il n'y a qu'une seule formule possible pour la molécule. Ce n'est pas forcément le cas des atomistes qui envisagent cette théorie comme une hypothèse et encore moins, des équivalentistes.

> *Il est vrai de dire aussi que les chimistes n'ont jamais tenu à connaître rigoureusement le nombre réel des atomes d'une molécule ; car, quand je leur faisais observer que leurs formules atomiques étaient le double de la réalité, ils me répondaient invariablement : cela revient au même; il suffit de les diviser par 2; ce qui me faisait comprendre que tout cela n'était pas sérieux, et ne pouvait que contribuer à retarder les progrès de la science.(Gaudin, 1873, p. 30)*

Gaudin ne s'étant jamais vraiment intéressé aux réactivités chimiques des molécules, alors qu'il donne une définition de l'atome et de la molécule avant tout le monde, il sera très peu suivi par la communauté des chimistes.

1.2.2.2.3 Wurtz

Pigeard-Micault (2007) explique dans sa thèse que Wurtz a évolué de l'adoption de l'hypothèse atomique vers la certitude de leur existence. Il est l'un des plus fervents défenseurs de cette théorie en France, n'hésitant pas à contrer Berthelot à l'Académie des Sciences. Si Wurtz croit en l'existence de l'atome, c'est parce que des faits expérimentaux l'ont amené à y croire (Pigeard-Micault, 2007, p 25). Le but de ses recherches est avant tout de trouver la nature des phénomènes et leurs causes. Il développe sa vision de l'atome dans son ouvrage la *Théorie atomique* et celle-ci est assez proche de l'atome actuel.

> *Les atomes ne sont pas des points matériels ils ont une étendue sensible et sans doute une forme déterminée ; ils diffèrent par leurs poids relatifs et par les mouvements dont ils sont animés. Ils sont indestructibles, indivisibles par les forces physiques et chimiques auxquelles ils servent, en quelque sorte, de points d'application. La diversité de la matière résulte de différences primordiales, éternelles dans l'essence même de ces atomes et dans les qualités qui en sont la manifestation.*
>
> *Les atomes s'attirent les uns les autres et cette attraction atomique est l'affinité C'est sans doute une forme de l'attraction universelle, mais elle en diffère par la raison que, si elle obéit à l'influence de la masse, elle dépend aussi de la qualité des atomes. L'affinité est élective, comme on dit depuis cent ans. Elle engendre des agrégations d'atomes, des molécules, des combinaisons chimiques. Dans celles-ci les atomes ne sont plus libres de leurs mouvements, ils les exécutent d'une façon coordonnée en quelque sorte et constituent un système où tout est solidaire et où ils sont assujettis. C'est la molécule. Celle-ci a une masse déterminée, un centre de gravité et des mouvements propres. (Wurtz, 1886, p. 224)*

2. Des controverses

Pendant toute la première moitié du XIXe siècle, les chimistes utilisent les mêmes outils pour représenter les formules mais avec des interprétations différentes. De plus, les formules ne sont pas stabilisées. Certaines substances peuvent en avoir plusieurs ou pour d'autres, elles ne font pas stabilisées. C'est le cas de l'eau et des corps simples pour lesquels les avis divergent. Ces deux derniers nous intéressent particulièrement car ils correspondent aux premières formules proposées aux élèves de cycle 4.

2.1 La confusion règne dans les formules

2.1.1 Un problème de langage

Les chimistes ne sont pas d'accord pour les formules et les termes comme atome, molécules, équivalents ne sont toujours pas clairement définis. De nombreux désaccords persistent dans les poids atomiques et ils sont souvent le double des équivalents. La confusion règne.

> *[…] ainsi, Berzélius, en choisissant le mot atome, regarde comme ayant la même valeur les mots particules, atomes, molécules, équivalents chimiques : au mot atome lui-même il attache des significations diverses, et admet des atomes simples et des atomes composés du premier ordre, du second ordre, etc. M. Dumas distingue des atomes sécables, des atomes insécables. M. Berthelot parle d'atomes chimiques et d'atomes physiques. (Grimaux, 1866, p. 7)*

Le problème de langage devient central.

> *Les chimistes doivent faire usage d'une seule et même langue, d'une seule notation sous peine de ne plus progresser. (Pigeard-Micault, 2007, p. 23)*

2.1.2 Plusieurs formules pour la même substance

Nous avons vu dans le paragraphe sur les équivalentistes qu'eux-mêmes proposent plusieurs formules pour représenter les substances minérales en utilisant les équivalents ou les nombres proportionnels thermiques. La formule de l'eau est soit HO en équivalent soit H^2O en nombre proportionnel thermique. Or c'est à partir de la formule de l'eau que le poids de l'atome d'hydrogène est déterminé à partir de la référence oxygène, ou inversement que le poids de l'atome d'oxygène est déterminé si la référence choisie est l'hydrogène. Pratiquement tous les poids des autres corps simples se déduisent de l'oxygène et de l'hydrogène. La plupart des formules sont obtenues, dans un premier temps, à partir des rapports pondéraux et donc des déterminations des poids des corps simples. La comparaison des tableaux, en fonction des principes utilisés par les uns ou les autres, n'est pas aisée car parfois deux erreurs peuvent se compenser. Certaines valeurs peuvent être doublées et d'autres identiques, ce qui conduit à une incohérence totale entre les différents tableaux de poids ou d'équivalents et donc sur les formules. Sans une interprétation théorique unique, il ne peut y avoir d'unité. Ce n'est pas mieux en chimie organique où dix-neuf formules pour l'acide éthanoïque sont recensées avant le congrès de Karlsruhe. La détermination de celle de

l'acide benzoïque par un équivalentiste (Annexe 19.3) donne 14 équivalents de carbone, 5 équivalents d'hydrogène et 3 équivalents d'oxygène (Louyet, 1841, p. 93). Dans son cours de chimie organique fondée sur la synthèse, Berthelot propose encore en 1860 les formules ci-dessous (Figure 56) pour les composés organiques.

celle des carbures d'hydrogène,

Gaz oléfiant	$C^4 H^4$
Amylène	$C^{10} H^{10}$
Éthalène	$C^{32} H^{32}$

et celle des acides correspondants,

Formique	$C^2 H^2 O^4$
Acétique	$C^4 H^4 O^4$
Valérianique	$C^{10} H^{10} O^4$
Palmitique	$C^{32} H^{32} O^4$

Figure 56 Formules organiques proposées par Berthelot (1860, p. CXV)

Elles sont doublées par rapport aux formules actuelles. Il écrit un peu plus loin :

> *L'alcool ordinaire, $C^4H^6O^2$, répond à toute une série d'alcools représentés par la formule $C^{2n}H^{2n+2}O^2$, tous doués de propriétés physiques et chimiques, les unes semblables, les autres modifiées graduellement avec l'équivalent et conformément à une progression régulière. (Berthelot, 1860, p. CXVII)*

2.1.3 Un congrès pour essayer de mettre de l'ordre

Le 3 septembre 1860 à Karlsruhe, cent quarante chimistes du monde entier se réunissent pour tâcher de mettre de l'ordre dans cette confusion. Le congrès est organisé à l'initiative de Kekulé. Il a pour objectif la définition des termes équivalent, atome et molécule, et la question des formules chimiques avec l'espoir au moins de l'obtention d'une convention unique d'écriture. Wurtz est chargé de rédiger les comptes rendus. Cannizzaro va plaider en faveur des poids atomiques fondés sur la loi d'Avogadro mais il n'y a pas d'accord à l'issue des trois jours de congrès. Malgré tout, la majorité des organiciens à l'exception de Berthelot et de ses disciples vont passer aux formules structurales (Bensaude-Vincent & Kounelis, 1991, p. 143-145). L'unité de représentation est enfin initiée.

2.2 La formule de l'eau a changé plusieurs fois

La détermination de la formule de l'eau, HO ou H^2O, tient un rôle capital dans la confusion qui règne dans les formules.

2.2.1 De Dalton à Berzelius ou de HO à H^2O

Dalton et Gay-Lussac rejettent leurs travaux respectifs. Pourtant les résultats obtenus par Gay-Lussac sont une confirmation de la loi des proportions définies et des combinaisons multiples. Mais pour Dalton, lorsque deux corps ne forment qu'une seule combinaison, celle-ci s'effectue nécessairement atome par atome. La loi des volumes renverse son hypothèse « de simplicité ». Gay-Lussac ne défend pas les théories atomiques de Dalton. Il est un élève de Berthollet et ce dernier est un farouche opposant à la loi des proportions définies. À sa disparition, Gay-Lussac changera de position en devenant un atomiste convaincu. Mais au moment où il publie ses résultats, il ne fait rien pour se rapprocher de Dalton (Camel, 2012, p. 84). Pour Berzelius, les travaux de Gay-Lussac sont au contraire une preuve du fondement de la théorie atomique. Il reproche à Dalton d'utiliser, pour déterminer les formules chimiques, un principe « *arbitraire* » : le principe de simplicité.

> *Dalton fut le premier qui essaya de déterminer le nombre des atomes simples qui entrent dans les atomes composés de plusieurs corps : il admit que les corps se combinent de préférence dans le rapport d'un atome d'un élément à un atome de l'autre, et toutes les fois qu'on ne connaissait à un corps qu'un seul degré de combinaison, il considéra celui-ci comme composé d'un atome de chaque élément. […] Cependant lorsqu'on connaît une seule combinaison, il y a quelque chose d'arbitraire d'admettre, sans égard aux autres rapports de cette combinaison, qu'elle se compose d'un atome de chaque élément ; aussi connaît-on aujourd'hui un grand nombre d'exemples du contraire. (Berzelius, 1835, p. 69‑70)*

Pour Berzelius (1835, p. 27), les substances se combinent d'une « *manière analogue* » relativement à leur poids et relativement à leur volume. Cela l'amène à considérer que raisonner en termes d'atome, dont la caractéristique est le poids, ou en termes de volume pour un gaz revient strictement au même pour les combinaisons chimiques. De cette hypothèse, Berzelius propose de nouvelles formules chimiques, notamment pour l'eau, s'opposant en cela à Dalton. Partant des résultats de Gay-Lussac où deux volumes d'hydrogène réagissent avec un volume d'oxygène, il n'y a aucun doute pour Berzelius. La formule de l'eau est nécessairement H^2O et non HO comme le propose Dalton. Il écrit à ce sujet :

> *On a, par exemple, admis que l'eau est composée d'un atome d'oxigène et d'un atome d'hydrogène mais comme elle contient deux volumes de ce dernier gaz sur un volume du premier, on en a conclu que, dans l'hydrogène et les substances combustibles en général, le*

> *volume n'a que la moitié du poids de l'atome ; tandis que, dans l'oxigène, le volume et l'atome ont le même poids. Ceci n'étant qu'une supposition gratuite, dont la justesse n'est pas même susceptible d'examen, il me paraît plus simple et plus conforme à la vraisemblance, d'admettre le même rapport de poids entre le volume et l'atome dans les corps combustibles que dans l'oxigène, puisque rien ne fait soupçonner qu'il y ait entre eux une différence. En considérant l'eau comme composée de deux atomes de radical et d'un atome d'oxigène, la théorie corpusculaire et celle des volumes s'identifient. (Berzelius, 1835, p. 28)*

À partir de sa formule de l'eau, et en choisissant le poids de l'oxygène comme référence, Berzelius en déduit le poids de l'hydrogène. Celui-ci doit peser 6,2175 par rapport à l'oxygène pris à 100. L'oxygène étant en chimie minérale l'élément le plus courant dans les combinaisons, le prendre comme référence s'impose comme une évidence pour Berzelius (1819, p. 116).

2.2.2 Retour à HO pour les équivalentistes

Après Dalton, Wollaston revient aux poids atomiques tirés de la seule considération des quantités équivalentes qui entrent en combinaison. Gmelin adopte les mêmes idées, dans les diverses éditions de son ouvrage. Ils reprennent HO comme formule pour l'eau et le poids de l'hydrogène est de 12,5 toujours par rapport à la référence de l'oxygène. Cette partie hydrogène est la même avec le soufre et dans les acides halogénés avec des formules équivalentes à HO, à HS et à HCl. En ramenant l'hydrogène à l'unité de poids, on obtient alors : O = 8 ; S = 16 ; Cl = 35,5. Parfois les erreurs se compensent. Les atomistes déterminent le poids de l'azote à partir du gaz ammoniac et de la formule NH^3. Les équivalentistes font de leur côté le calcul à partir du protoxyde d'azote mais en prenant comme formule[38] NO. Cette dernière erreur se compensant avec celle de l'eau, les équivalentistes et les atomistes obtiennent la même valeur pondérale pour l'azote.

2.2.3 De l'ordre remis dans la formule de l'eau par Gerhardt

Pour Gerhardt, anti-atomiste convaincu, la confusion règne.

> *[...] notre système scientifique présente à cet égard une confusion extrême. Qu'on se rappelle, en effet, les anomalies nombreuses touchant la signification des mots atome,*

[38] La formule correcte du protoxyde d'azote est N^2O.

> *équivalent et volume : tantôt atome et équivalent sont synonymes, tantôt 2 atomes (l'atome double de M. Berzelius) font un seul équivalent, tantôt enfin un volume correspond à un atome tandis que dans d'autres cas il faut plusieurs volumes pour constituer l'atome d'un corps simple. (Gerhardt, 1844, p. 47-48)*

Il est important de remettre de l'ordre dans les formules de la chimie organique. Cela passe par la formule de l'eau. Celle communément admise dans les années 1840 est HO et son équivalent pondéral est 9. Mais Gerhardt observe que, dans les réactions où il y a formation d'eau, la quantité pondérale obtenue correspond systématiquement à un multiple de deux équivalents d'eau, soit une quantité pondérale multiple de 18. Pour quelles raisons les composés organiques ne pourraient-ils pas renfermer un nombre impair d'équivalents et donner une quantité pondérale multiple de 9 ? Les chimistes sont alors amenés à choisir en chimie organique un poids équivalent double pour « *l'oxygène organique* » par rapport à « *l'oxygène minéral* » (Gerhardt, 1844, p. 48). Les équivalents étant déduits de proche en proche à partir de l'oxygène, les formules équivalentes sont alors toutes doublées (Figure 57).

Acide acétique	$C^4H^8O^4$
Acétate d'argent	$C^4(H^6Ag^2)O^4$
Acide chloracétique	$C^4(H^2Cl^6)O^4$
Chloracétate d'argent	$C^4(Ag^2Cl^6)O^4$

Figure 57 Exemples de formules admises en chimie organique (Gerhardt, 1844, p. 50)

Gerhardt trouve cela bien compliqué et sans raison. Il lui semble alors nécessaire de revenir sur la formule de l'eau admise à cette époque (Gerhardt, 1844, p. 47-48). Gerhardt, faute de mieux, reprend la démarche de Berzelius dans le but de parvenir à un accord sur l'ensemble des formules utilisées par la communauté des chimistes et repart des lois de Gay-Lussac. Il admet comme Berzelius que volume, atome et équivalent sont synonymes pour les corps simples. Il représente à nouveau l'eau par la formule H^2O qui a ainsi « *l'avantage de rappeler la composition en volumes* » (Gerhardt, 1854, p. 582). Le poids de l'hydrogène étant pris alors à 1, celui de l'oxygène passe à 16 au lieu de 8 avec la formule HO. La valeur pondérale de l'eau est ainsi de 18. Il résout ainsi le problème de l'équivalent pondéral libéré dans les réactions organiques. La notation H^2O présente deux avantages sur la notation HO. Elle est en accord avec la théorie des types donnant à chaque radical monoatomique deux oxydes (Figure 58).

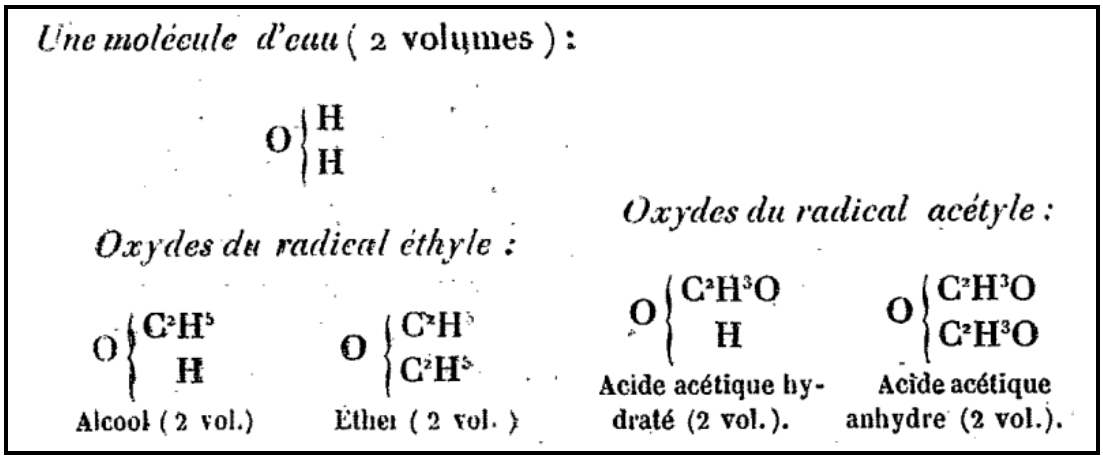


Figure 58 Oxydes du radical éthyle et acétyl (Gerhardt, 1854, p. 582 - 583)

Le deuxième avantage de la formule H^2O est de pouvoir réduire de moitié les formules de la chimie organique (Figure 57).

> *Dans mon opinion, la molécule de l'alcool est donc C^2H^60, et non $C^4H^{12}0^2$; celle de l'acide acétique est $C^2H^4O^2$, et non $C^4H^8O^4$ etc. ; si l'on écrit la molécule de l'eau OH^2 ou $O\cancel{H}$, il faut, selon moi, dédoubler les formules d'un grand nombre de substances pour qu'elles soient correctes. Plusieurs chimistes, à qui ce point semble aujourd'hui parfaitement avéré, préfèrent maintenir les formules des corps que je dédouble, pour doubler au contraire la formule de l'eau, en écrivant O^2H^4 ou $O^2\cancel{H}^2$: cela revient sans doute au même ; mais ces chimistes, pour rester conséquents, devront aussi doubler les formules de tous les oxydes, sulfures, sulfates, carbonates, oxalates, etc., et je ne vois pas quel avantage peuvent offrir ces formules doubles. (Gerhardt, 1854a, p. 583)*

En Angleterre, Williamson, Odling, Frankland, Hofmann et d'autres se rallient successivement à cette notation. En Allemagne, Kekulé l'adopte immédiatement. Le principe de l'atomicité va très vite confirmer la formule proposée par Gerhardt qui n'évoluera plus.

2.3 La formule des corps simples

La formule du corps simple et la différenciation atome/molécule vont, comme pour la formule de l'eau, être au cœur des débats de toute la première moitié du XIXe siècle.

2.3.1 Formule des corps simples pour Dalton et les équivalentistes

Pour Dalton et les équivalentistes, le corps simple correspond à un atome ou à un équivalent. Pour Dalton, il s'agit d'un argument de simplicité. Pour les équivalentistes, tous les corps simples doivent être équivalents entre eux. Les formules des corps simples peuvent tout aussi bien être écrites avec un équivalent qu'avec n équivalents. Les deux théories sont alors assez

proches. Mais dès que les atomistes vont admettre que les formules des corps simples peuvent ne pas être toutes semblables (X^2 ou X^3, …) et dissocier ainsi les termes atome et molécule, les chimistes ne vont plus pouvoir fusionner la théorie atomique et celle des équivalents. Les termes équivalents et atomes vont être définitivement dissemblables. L'hypothèse de corps simples constitués de plusieurs atomes est émise la première fois par Avogadro et Ampère en 1811. Cette hypothèse passe dans l'oubli et n'est reprise que vingt ans plus tard par Dumas et Laurent. Il fallait pour cela dépasser la vision dualistique de Berzelius et d'une affinité chimique exclusivement électrochimique.

2.3.2 Formule des corps simples pour les atomistes dualistiques

Comme nous l'avons déjà indiqué, Berzelius, à la différence de Dalton, part des lois volumiques de Gay-Lussac. Il reprend à son compte une partie de l'hypothèse d'Avogadro et Ampère. Un volume de gaz à température et pression constantes renferme le même nombre d'atomes, les poids atomiques étant ainsi proportionnels à la densité des gaz. Mais il ne relève pas la différence entre atomes et molécules. Berzelius admet pour formule de l'eau H^2O en lien avec les lois volumiques de Gay-Lussac mais il fait une différence dans le cadre des volumes pour les *simples* et pour les combinaisons. Comme Dalton et les équivalentistes, mais pas pour les mêmes raisons, le corps simple ne peut être composé que d'un seul atome. Toute la chimie de Berzelius repose sur la théorie électrochimique. Chaque atome possède une polarité.

> *En admettant que les corps sont composés d'atomes, nous pouvons nous représenter que chacun de ces atomes possède, une polarité électrique d'où dépendent les phénomènes électro-chimiques dans leur réunion, et dont l'inégale intensité est la cause de la différence de force avec laquelle s'exercent leurs affinités.(Berzelius, 1819, p. 85)*

Berzelius (1819, p. 77‑79) classe ainsi l'ensemble des atomes en fonction de leur polarité respective. Toutes les combinaisons chimiques s'interprètent grâce aux phénomènes électriques.

> *Si le point de vue électro-chimique est juste, il s'ensuit que toute combinaison chimique dépend uniquement de deux forces opposées, l'électricité positive et la négative, et qu'ainsi chaque combinaison doit être composée de deux parties constituantes réunies par l'effet de leur réaction électro-chimique, attendu qu'il n'existe pas une troisième force. De là découle que tout corps composé, quel que soit d'ailleurs le nombre de ses principes constituants,*

> *peut être divisé en deux parties, dont l'une est positivement et l'autre négativement électrique. (Berzelius, 1819, p.97-98)*

Tout composé est donc nécessairement constitué de deux parties de polarité opposée. C'est sur cette vision dualistique électrochimique que repose toute la chimie de Berzelius. Donc deux atomes identiques ne peuvent pas s'associer. Les corps simples sont nécessairement constitués d'un atome.

2.3.3 L'abandon de la vision dualistique par les organiciens

Gaudin est le premier à reprendre les hypothèses d'Avogadro et Ampère et à distinguer atome et molécule.

> *[…] puisque les particules sont toujours censées être à la même distance, pour une même pression et une même température, nous dirons 1, 2, 3 particules, au lieu de 1, 2, 3 volumes, et substituerons même le mot molécule à celui de particule, puisque celle-ci est réputée maintenant contenir plusieurs atomes. Une molécule de gaz hydrogène, en se combinant avec une molécule de chlore, donne 2 molécules de gaz hydrochlorique ; pour que la combinaison se fasse et que les molécules composées observent la même distance que, celles des gaz composants (fig. I), il faut et il suffit que chaque molécule composante se divise en deux jusqu'à ce qu'on prouve que ces moitiés de molécule se divisent ultérieurement, nous les tiendrons pour atomes ; donc les gaz hydrogène, chlore et hydrochlorique sont biatomiques. (Gaudin, 1833, p. 121)*

Il est le premier à proposer des équations sous forme de formules à partir des notations de Dalton (Figure 59). Mais son travail va passer inaperçu.

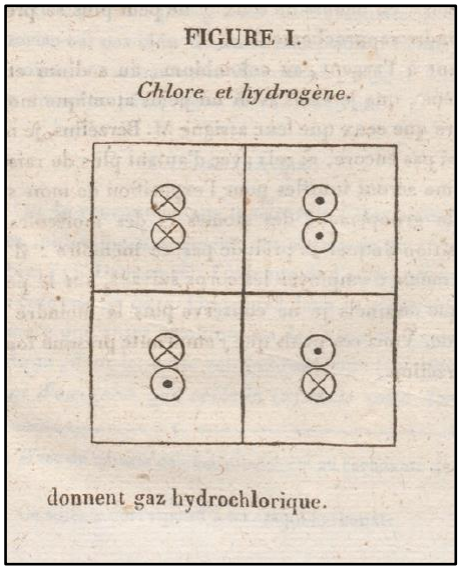


Figure 59 La réaction du chlore et de l'hydrogène par Gaudin (1833, p. 121)

Il faut attendre les travaux de Dumas, Laurent et Gerhardt et la possibilité de substitution d'un hydrogène par un chlore dans les composés organiques pour déstabiliser la vision dualistique électrochimique de Berzelius. Les chimistes admettent alors qu'un corps simple puisse être constitué de plusieurs atomes identiques. Pour Gerhardt, la contrainte est empirique.

> *Cette interprétation est d'autant plus rationnelle que, dans l'action du chlore sur les matières organiques, on voit toujours intervenir un nombre pair d'atomes[39] de chlore. (Gerhardt, 1854, p. 573)*

Dumas, encore atomiste à ce moment, énonce que dans la combinaison du chlore avec l'hydrogène, les atomes de ces corps simples doivent se couper en deux.

> *[…] 1 volume de chlore et 1 volume d'hydrogène en font 2 d'acide chlorhydrique ; 1 volume d'azote et 1 volume d'oxygène en font 2 de bi-oxide d'azote. Par conséquent, il faut que l'atome du chlore et celui de l'hydrogène puissent se couper en deux, pour donner naissance aux deux atomes de gaz chlorhydrique. Il faut de même que l'atome d'azote et l'atome d'oxigène se coupent en deux, pour former les deux atomes de bi-oxide d'azote. (Dumas, 1836, p. 253)*

Gerhardt et Laurent proposent une interprétation en double composition :

> *Si, comme nous l'admettons, la molécule du chlore libre renferme ClCl, et celle de l'hydrogène libre HH on est naturellement conduit à considérer la formation de l'acide comme le résultat d'une double composition : ClCl + HH = ClH + ClH*

[39] Gerhardt nomme atomes les équivalents.

Suite à ses travaux, Dumas (1836, p. 265) propose de distinguer deux types d'atomes : les atomes chimiques, synonymes de nos molécules actuelles, et les atomes physiques, synonymes de nos atomes actuels. Les deux sont insécables aux forces physiques mais les atomes chimiques peuvent être coupés au cours des réactions chimiques. Pour Laurent, différencier atome et molécule est une évidence. Les atomes ne peuvent pas être à la fois considérés comme indivisibles et être susceptibles de division dans certains cas. Laurent (1854, p. 573) suggère qu'il y a une limite à la divisibilité de la matière mais que ce ne sont pas les « *atomes des chimistes*[40] ». Les « *atomes chimiques* » pourraient être eux-mêmes des « *groupes moléculaires* » constitués de combinaison de « *petits atomes* ».

> *Berzelius, à qui la théorie atomique doit tant de perfectionnement, s'est fortement élevé contre l'idée de la divisibilité des atomes. Cependant, il admet que les corps gazeux renferment le même nombre d'atomes sous le même volume, et, par conséquent, que si Cl et H représentent 1 atome d'hydrogène et de chlore, $Cl^{1/2}H^{1/2}$ = 1 vol. représente aussi 1 atome d'acide chlorhydrique. L'atome de chlore et d'hydrogène sont donc dans cette hypothèse au moins divisibles en deux. (Laurent, 1854, p. 84)*

Laurent développe toute une série d'exemples (Figure 60) montrant des réactions dans lesquelles certains corps simples sont des « *dyades* » constituées de deux « *petits* » atomes (Laurent, 1854, p. 84).

$Cl^2 + OK^2 = O + 2ClK$	$Cl^2 + C^2H^4 = C^2H^3Cl + HCl$
$3Cl^2 + H^3N = Cl^3N + 3ClH$	$3Cl^2 + C^2H^4O = C^2HCl^3O + 3HCl$
$O + K^2 = OK^2$	$4Cl^2 + C^2H^4O = C^2Cl^4O + 4HCl$
$O + CO = CO^2$	$O + C^2H^4O = C^2H^4O + H^2O$
$3O + H^2S = H^2O + SO^2$	$3H^2 + CHCl^3 = CH^4 + 3HCl$

Figure 60 Exemples de réactions proposées par Laurent avec des « dyades » (Laurent, 1854, p. 84)

Il propose alors les formules suivantes :

> *1° Pour les monades, un volume renferme 1 atome ou 1 molécule O, S, C, etc.*
>
> *2° Pour les dyades, deux volumes renferment deux atomes ou 1 molécule H^2, Cl^2, N^2, etc. ; (Laurent, 1854, p. 84).*

[40] Terme correspondant à nos molécules actuelles.

On remarque l'erreur sur la formule du dioxygène. De plus, que ce soit Dumas, Gerhardt ou Laurent, ils ne vont pas au-delà de deux atomes dans les formules des molécules proposées, ce qui va poser des difficultés dans le cas de l'arsenic et du phosphore.

2.3.4 Les atomes ne sont plus équivalents ou l'atomicité

Toute la difficulté est dans la formule atomique du corps simple. Est-ce un atome comme le postulent tous les partisans de la vision dualistique ou deux atomes comme le suggèrent les organiciens atomistes ? Wurtz (1864) reprenant le développement des théories chimiques explique que l'origine de la notion de molécule proviendrait d'une vision des transformations chimiques en tant que substitution d'un atome par un autre. Dans les réactions chimiques, ce sont les molécules qui interagissent et qui échangent leurs atomes en donnant naissance à de nouvelles molécules. Dans cette interprétation, les corps simples se rapprochent des corps composés. Ils peuvent donc se prêter aux doubles décompositions, comme les corps composés eux-mêmes. Seule différence avec un corps composé, leurs atomes élémentaires sont tous identiques.

> *Ainsi lorsque l'hydrogène se combine avec l'oxygène, il attaque une molécule d'oxygène qui se défait et se convertit en deux molécules d'eau : OO + 2 HH = H^2O + H^2O (Wurtz, 1864, p. 39)*

Wurtz définit alors les termes molécules et atomes.

> *L'atome est la plus petite quantité d'un élément qui puisse exister dans un corps composé, comme masse indivisible par les forces chimiques.*
>
> *La molécule est un groupe d'atomes formant la plus petite quantité d'un corps simple ou composé, qui puisse : exister à l'état libre, entrer dans une réaction ou en sortir. (Wurtz, 1864, p. 39)*

La notion d'atomicité va permettre de franchir le dernier cap. Il faut admettre que la formule des corps simples peut varier selon l'élément chimique et la rechercher en essayant d'accorder les mesures de poids par les différentes lois, ce que propose Wurtz dans *La théorie atomique.* Il effectue le calcul des poids moléculaires en utilisant les mesures de densités par la loi des volumes pour les corps composés mais également pour tous les corps simples. À partir de là, il peut tout aussi bien définir la formule des composés que des corps simples (Figure 61).

Noms des corps.	Densités.	Doubles densités rapportées à l'hydrogène.	Poids moléculaires.	Formules.
Hydrogène	0,0693	2,	2	H^2
Chlore	2,44	70,5	71	Cl^2
Brome	5,54	159,0	160	Br^2
Iode	8,716	251,7	254	I^2
Oxygène	1,1056	31,9	32	O^2
Soufre	2,22	63,5	64	S^2
Eau	0,6235	18,0	18	H^2O
Hydrogène sulfuré	1,1912	34,4	34	H^2S
Acide sulfureux	2,234	64,5	64	SO^2
Acide sulfurique	2,763	79,8	80	SO^3
Azote	0,9714	28,0	28	Az^2
Protoxyde d'azote	1,527	44,1	44	Az^2O
Bioxyde d'azote	1,038	29,98	30	AzO

Figure 61 Poids moléculaires et formules (Wurtz, 1864, p. 59)

Il peut appliquer cela pour le mercure, le phosphore, l'arsenic et le soufre dont la formule du corps simple posait problème (Figure 62) et avait amené Dumas à rejeter la théorie atomique.

	Densités rapportées à l'hydrogène.	Poids atomiques.	Quotients des densités par les poids atomiques. Nombre d'atomes dans l'unité de volume.	Nombre d'atomes dans 2 volumes.
Mercure	100	200	0.5	1
Hydrogène	1	1	1	2
Oxygène	16	16	1	2
Azote	14	14	1	2
Chlore	35 5	35.5	1	2
Brome	80	80	1	2
Iode	127	127	1	2
Phosphore	62.8	31	2	4
Arsenic	150	75	2	4
Soufre à 500°	96	32	3	6

Figure 62 Nombre d'atomes dans la formule des corps simples (Wurtz, 1886, p. 52)

Cela permet également de distinguer l'ozone de l'oxygène, qui était assimilé à un isomère de l'oxygène.

> *Vers l'année 1810, M. Schoenbein reconnut que l'oxygène qui se dégage au pôle positif d'une pile dont on se sert pour décomposer l'eau possède une odeur particulière […]. Les propriétés de ce gaz odorant ont été étudiées avec le plus grand soin par M. Schoenbein, qui lui donna le nom d'ozone […]. Plus tard, MM. Marignac et de La Rive établirent que l'ozone*

> *est de l'oxygène modifié par l'électricité […]. Nous proposons donc de remplacer le nom d'ozone par celui d'oxygène électrisé.(Pelouze & Fremy, 1854, p. 170)*

L'ozone peut devenir un corps simple triatomique.

> *On sait que l'ozone est de l'oxygène condensé ; cela résulte des expériences d'Andrews et Tait et surtout des recherches ingénieuses et exactes de M. Soret : mais l'ozone est un corps simple, et puisque trois volumes d'oxygène sont condensés en 2 volumes d'ozone qui représentent une molécule 0^3, on peut dire que celle-ci est triatomique. (Wurtz, 1886, p. 86)*

3. Une formule macroscopique ou microscopique ?

Au moment où les chimistes élaborent leurs outils, symboles, formules empiriques, formules rationnelles, à quelle échelle se situent-t-ils : Macroscopique ou / et microscopique ? Tous les chimistes semblent s'accorder sur une limite dans la divisibilité de la matière. Celle-ci n'est pas indéfinie. La matière est formée de particules indivisibles par des moyens physiques.

3.1 Pour un équivalentiste

L'équivalent correspond à une proportion et n'est pas rattaché à un modèle microscopique Les équivalentistes admettent la non-divisibilité indéfinie de la matière, mais cela ne reste qu'une hypothèse. Pelouze et Fremy (1854) dans leurs cours *Traité de chimie générale* utilisent bien le conditionnel quant aux corps formés de particules ultimes.

> *Un grand nombre d'observations prouvent que l'on peut amener les corps à un état de division extrême. On a depuis longtemps agité cette question : la matière est-elle ou n'est-elle pas divisible à l'infini ? Il paraît résulter de l'ensemble des théories chimiques que les corps sont formés de particules extrêmement petites, et indivisibles par tous les moyens mécaniques. On a donné à ces dernières particules le nom de molécules ou d'atomes. (Pelouze & Fremy, 1854, p. 4)*

Donc, même s'ils admettent la possibilité de ces particules, les équivalentistes ne semblent pas croire en une explication microscopique hypothétique pour réguler les phénomènes observés et observables et donc macroscopiques. Ils nomment indifféremment atomes ou molécules les particules ultimes mais ces termes désignent également les équivalents. Ils peuvent ainsi utiliser si nécessaire des demi-atomes.

> *Quand un corps hydrogéné est soumis à l'action déshydrogénante du chlore, du brome, de l'iode, de l'oxygène, etc., par chaque atome d'hydrogène qu'il perd, il gagne un atome de chlore, de brome ou d'iode, ou un demi-atome d'oxygène (Berthelot, 1860, p. LXXV)*

Les corps simples sont constitués d'un seul et même élément et les corps composés sont les combinaisons des corps simples.

3.2 Pour un atomiste

3.2.1 Pour Gaudin

Gaudin a une approche de la chimie identique à celle d'un cristallographe.

> *Voilà un cristal. Sous le microscope, sa masse apparaît compacte et homogène. Entre les faces ou les plans de clivage, nulle solution de continuité. Et pourtant la matière n'y est pas continue, et, s'il s'agit d'un corps composé, elle n'y est pas homogène. Les plus petits rudiments des cristaux sont formés par des agrégations sans nombre de molécules semblables et semblablement disposées. (Gaudin, 1833, p. 226)*

Il est l'un des rares chimistes à son époque à évoquer la taille des particules :

> *Les données acquises sur les diamètres des molécules ont permis de calculer approximativement leurs sections et leurs volumes. Pour l'air, ces deux grandeurs ne sont que de petites fractions, la première d'un carré, la seconde d'un cube dont le côté serait la millionième partie d'un millimètre. (Gaudin, 1833, p. 234)*

et leur nombre :

> *On peut faire un pas de plus les volumes moléculaires étant connus, on peut calculer le nombre des molécules dans l'unité de volume des gaz et aussi leurs distances respectives et leurs poids absolus. Ici nous arrivons à des résultats numériques qui confondent l'imagination et dont on a quelque peine à saisir la signification réelle. Un centimètre cube d'air renfermerait 21 trillions de molécules, nombre qui représente 21 fois un million élevé à la troisième puissance. (Gaudin, 1833, p. 234)*

Nous n'avons trouvé rien de tel, notamment dans les ouvrages de Berzelius et Laurent que nous avons consultés. Gaudin a une vision réaliste de l'atome et des molécules. S'il utilise les notations de Dalton, c'est bien qu'il se situe à un niveau microscopique. Dans ses écrits, il remplace le terme volume par celui de particule ou molécule.

> *Reprenons les combinaisons des gaz ; et puisque les particules sont toujours censées être à la même distance, pour une même pression et une même température, nous dirons 1, 2, 3*

> *particules, au lieu de 1, 2, 3 volumes, et substituerons même le mot molécule à celui de particule, puisque celle-ci est réputée maintenant contenir plusieurs atomes. […] Une molécule de gaz oxygène, en se combinant à deux molécules de gaz hydrogène, donne deux molécules de vapeur d'eau ; or, pour que les molécules de vapeur d'eau formées conservent entre elles la même distance que celles des gaz composants, il faut et il suffit que la molécule d'oxygène se partage en deux, et que chaque moitié vienne s'unir à une molécule biatomique d'hydrogène; donc le gaz oxygène est biatomique, et la vapeur d'eau triatomique. (Gaudin, 1833, p. 121)*

Nous pouvons également supposer que des chimistes comme Loschmidt, dont les formules rationnelles sont censées représenter la réalité atomique, présentent une vision microscopique de la formule.

3.2.2 Pour Wurtz

À partir de 1874, Wurtz est certain de l'existence des atomes (Pigeard-Micault, 2007). Mais il écrit pourtant en 1886 :

> *Mais, quel que soit le sort de l'hypothèse dont il s'agit, une chose est acquise définitivement c'est la notation qu'on appelle atomique, puisqu'il faut bien lui donner un nom, mais qui est indépendante, jusqu'à un certain point de l'hypothèse qu'elle rappelle. (Wurtz, 1886, p. 240‑241)*

La notation est là pour indiquer les proportions dans les combinaisons chimiques en s'appuyant sur les lois empiriques et donc sur des faits à l'échelle macroscopique (Wurtz, 1886, p. 240-241). La formule a bien cette fonction de pont entre les niveaux macroscopique et microscopique. Trouver la combinaison atomique dans la formule ne peut provenir que des faits empiriques en faisant l'hypothèse atomique.

3.3 Discussion

Pour les premiers atomistes et les équivalentistes, les chimistes semblent interpréter ce qui se passe au niveau microscopique comme la subdivision de ce qui se passe au niveau macroscopique. Les formules sont associées aux faits empiriques et donc aux rapports de poids ou de volume.

> *La matière est composée de particules infiniment petites, indivisibles : nous avons appelé ces particules indivisibles par tous les agents physiques, des molécules. On ne peut chercher à connaître le poids absolu, le volume absolu de ces molécules ; mais on saisit entre elles des*

> *rapports de poids et de volume ; ce sont ces rapports qui, une fois établis, constituent les poids et les volumes moléculaires. (Grimaux, 1866, p. 31)*

L'atome et la molécule sont inaccessibles à l'expérience. En cette période de l'histoire de la chimie où le positivisme ambiant est encore pesant, le saut des observations du laboratoire, à l'échelle macroscopique, aux entités moléculaires microscopiques est sans doute encore trop gigantesque et « *semble d'une audace démesurée* » (Laszlo, 2017). Même pour la plupart des atomistes, l'atome reste une hypothèse qui permet d'établir les formules. Celles-ci sont alors utilisées pour penser les réactions chimiques, les interpréter et les prédire. La formule semble donc établie à partir d'une hypothèse microscopique mais utilisée à une échelle macroscopique. Il n'y a pas de méta-langage au moment de la toute première élaboration des formules. Ce n'est qu'avec l'apparition des formules rationnelles et l'hypothèse de l'arrangement des atomes au sein de la molécule que la représentation prend un caractère réaliste pour des chimistes comme Gaudin ou Wurtz. La formule rationnelle microscopique peut permettre d'interpréter les propriétés chimiques des nouvelles espèces chimiques.

Conclusion de l'enquête historique

Le langage de la chimie débute en même temps que la chimie en tant que science. Le XIXe siècle voit exploser la connaissance des nouvelles substances chimiques, les nouvelles techniques d'analyse et de synthèse et les nouvelles théories. Le chimiste a besoin de nommer, d'écrire et de décrire. Il développe pour cela le nom, la formule brute ou le résumé écrit, et la formule développée ou la description. Le « *mot* » et la « *figure* » sont essentiels pour décrire toute la complexité de la chimie et les millions de substances qui vont apparaître (Dagognet, 2002). Pour nommer, Lavoisier établit une première nomenclature en chimie minérale basée sur l'analyse en allant du corps simple vers le mixte.

> *a specialised, theoretical language is born: elements will have a simple name; compounds, a composite name that reveals their nature. (Izquierdo-Aymerich, 2012)*

La première nomenclature en chimie organique aboutit au moment où l'ensemble de la communauté scientifique admet la théorie atomique et la structure chimique des molécules en termes d'arrangement des atomes. La théorie atomique amène un nouveau symbolisme, les formules. Berzelius développe la formule empirique ou brute en lien avec la théorie atomique de Dalton et en s'appuyant sur les techniques d'analyse permettant de déterminer

le poids atomique ou l'équivalent. Puis, quand les chimistes abandonnent la vision dualistique et admettent l'hypothèse d'un arrangement des atomes dans la molécule, c'est la formule rationnelle. Le langage se développe avec les théories mais les fait également progresser.

> *Au cours de ce siècle, le langage devient une construction intellectuelle et une hypothèse confrontées aux données expérimentales. (Laszlo, 2010, p. 16)*

Avec cette étude historique, nous constatons pour le langage symbolique :

- que sans théorie, il est arbitraire comme à l'époque des alchimistes ou aux balbutiements de la chimie organique avec pour seule théorie la vision dualistique de Berzelius ;
- qu'il est un outil de propagande véhiculant les nouvelles idées : la théorie du *simple* pour Lavoisier, la théorie des combinaisons multiples pour Dalton, la vision dualistique de Berzelius, l'atomicité portée en France par Wurtz ;
- qu'il est un outil pour comprendre en rationalisant (la nomenclature de Lavoisier et les formules de Berzelius), en classant (la nomenclature, les formules rationnelles) et en permettant de visualiser (les formules développées de la chimie organique) ;
- qu'il est un outil pour apprendre en facilitant l'apprentissage de la chimie et en la rendant accessible au plus grand nombre ;
- qu'il est un outil de laboratoire ou « *outil de papier* » en permettant de lancer des programmes de recherche pour découvrir les corps simples, pour prévoir et rechercher de nouvelles substances organiques ou de nouveaux isomères.

Plusieurs courants de pensée et controverses traversent cette première moitié du XIXe siècle mais la formule empirique va faire l'unanimité pour l'ensemble de la communauté des chimistes. Elle est adoptée à la fois par ceux qui rejettent la vision atomique, ceux qui y voient une représentation de la réalité et ceux qui voient dans l'atome une théorie utilitariste. À partir de la loi des combinaisons multiples, Dalton relance l'hypothèse atomique. Il applique un critère de simplicité, rendant ainsi tous les atomes équivalents dans leurs combinaisons. L'atome de Dalton et l'équivalent chimique se confondent. Les équivalentistes utilisent des tableaux pour rassembler l'ensemble de leurs équivalents. Mais, même en refusant d'aller plus loin que l'expérience, ils doivent passer à la formule. Il est en effet impossible d'interpréter et de prévoir les combinaisons chimiques à partir de tableaux d'équivalents. La formule est un outil beaucoup plus puissant pour penser la chimie. Equivalentistes et

atomistes sont tous d'accord au départ sur un même point : la formule des corps simples. Ce n'est pas le cas des formules des corps composés qui ne sont pas stabilisées, notamment celle de l'eau. Pour les atomistes qui exploitent la loi des volumes de Gay-Lussac avec l'hypothèse d'Ampère et Avogadro, la formule de l'eau est nécessairement H_2O. Pour les autres, le critère de simplicité de Dalton l'emporte et la formule est HO. Tout cela va se stabiliser avec le développement de la chimie organique et l'évolution de la théorie atomique :

- d'abord avec Gerhardt, équivalentiste mais qui va chercher à mettre de l'ordre dans cet imbroglio de formules empiriques en s'appuyant sur l'étude des réactions en chimie organique. Il redonne à l'eau la formule H^2O des atomistes ;
- puis avec Laurent, fervent partisan de l'hypothèse atomique et de l'importance de l'arrangement des atomes dans la molécule. Il est convaincu de la différence entre l'atome et la molécule et combat la théorie dualistique. Il propose des corps simples aux molécules constituées de plusieurs atomes. Lui aussi s'appuie sur les faits et recherche dans les formules la possibilité de rendre compte de ces faits.

> *La représentation s'enrichit de trois manières : par complexification (prise en compte de propriétés et de relations de plus en plus nombreuses), par exigence de cohérence (coordination de champs séparés par exemple) ainsi que par différenciation. (Weil-Barais, 1994, p. 458)*

Mais ce qui va définitivement rendre incompatible la théorie atomique avec celle des équivalents est l'identification de deux particules distinctes : l'atome et la molécule, en lien avec la formule des corps simples. Le concept d'atome va s'étoffer. L'atome de Dalton n'est caractérisé que par son poids. L'atome de Wurtz et des organiciens « atomistes » acquiert une caractéristique supplémentaire : l'atomicité. Les formules des corps simples se complexifient. Dans la vision particulaire de la matière, l'hypothèse de l'arrangement des atomes au sein de la molécule devient incontournable pour interpréter l'explosion des faits expérimentaux de la chimie organique. L'atome ne peut plus être confondu avec l'équivalent. Les formules des corps se stabilisent. La chimie devient cohérente.

Partie 4 Reconstruction didactique

INTRODUCTION **296**
CHAPITRE 1 APPORT DE L'ENQUÊTE HISTORIQUE POUR L'ÉLABORATION DES RESSOURCES **296**
1. REGARDS CROISÉS ENQUÊTES HISTORIQUES ET ENQUÊTES DIDACTIQUES 296
1.1 Histoire des sciences et contexte institutionnel 296
1.2 Histoire des sciences et difficultés des élèves dans le langage symbolique 299
2. HISTOIRE DES SCIENCES POUR LE MEDIA : LES RAISONS DE L'ÉLABORATION DES FORMULES CHIMIQUES 302
2.1 Utilisation des espaces de contraintes pour identifier les raisons qui ont permis l'élaboration des formules chimiques 302
2.2 Corps simples et corps composés 304
2.3 Formule de l'eau 305
2.4 Formule des corps simples 315
2.5 Conclusion : ce que nous apprennent les espaces des contraintes 321
CHAPITRE 2 : ÉLABORATION DES RESSOURCES **322**
1 CHOIX DES RESSOURCES 323
1.1 Pour l'élaboration des symboles 323
1.2 Pour l'élaboration des formules 324
1.3 Quelques remarques à propos du concept d'atome 326
2. LES SCÉNARIOS 327
2.1 Objectifs pour les élèves 328
2.2 Objectifs pour les enseignants 329
2.3 La forme des scénarios : la raison des dialogues 330
2.4 Les propositions de scénarios 331
CHAPITRE 3 : PREMIÈRES UTILISATIONS DES RESSOURCES **340**
1. COMPARAISON INTRA-PERSONNELLE AVEC OU SANS LES RESSOURCES 341
1.1 Textes et scénario choisis par Mathieu 341
1.2 Analyse comparée de l'activité de l'enseignant 342
1.3 Discussion et analyse des besoins pour une formation 355
2 UTILISATION DES DIALOGUES PAR UN ENSEIGNANT 356
2.1 Les documents élaborés par Benjamin 357
2.2 L'organisation du travail pendant la première séance 359
2.3 Registres de la chimie et niveau de langage 360
2.4 Réactions et réponses des élèves 362
2.5 Bilan 366
CONCLUSION PARTIE 4 ..... **367**

Introduction

Dans cette quatrième partie, nous recherchons dans le premier chapitre les ressources historiques qui nous semblent les plus intéressantes pour la reconstruction didactique. Pour cela, nous croisons l'enquête historique avec l'enquête didactique (institutionnelle et élèves). Puis à partir des espaces de contraintes et nécessités, nous proposons une synthèse des principales raisons qui ont amené les chimistes à choisir entre HO ou H_2O pour la formule de l'eau puis entre un ou plusieurs atomes pour les corps simples. Nous souhaitons rechercher celles qui pourraient être transposables pour un élève de cycle 4 et qui apporteraient les conditions permettant l'installation d'un débat contradictoire dans la classe (de Hosson, 2011, p. 32). Dans le deuxième chapitre, nous proposons deux scénarios possibles pour la classe à partir des ressources historiques. Enfin, nous présentons les premières utilisations de ces ressources par deux enseignants dans leur classe.

Chapitre 1 Apport de l'enquête historique pour l'élaboration des ressources

1. Regards croisés enquêtes historiques et enquêtes didactiques

1.1 Histoire des sciences et contexte institutionnel

1.1.1 Concepts microscopiques au XIXe siècle et dans les programmes

L'atome de la première moitié du XIXe siècle est encore une hypothèse, même si certains chimistes sont déjà persuadés de sa réalité, au même titre que celle déjà avancée par les Grecs dans l'Antiquité. Elle est proposée par Dalton pour interpréter l'ensemble des lois observées dans les transformations chimiques. Au début du XIXe siècle, l'atome est ce qui entre en combinaison pour constituer les espèces chimiques. Il est caractérisé uniquement par son poids relatif. Cinquante ans plus tard, l'atome a une nouvelle caractéristique : son atomicité. Il peut alors se combiner pour former les molécules, et même avec lui-même dans le cas des corps simples. La molécule se caractérise par le nombre et l'arrangement des atomes qui la constituent. L'atome reste une particule insécable et l'échelle atomique n'est toujours pas

définie. Pour cela, il faut attendre la deuxième partie du XIXe siècle avec Boltzmann et le développement de la mécanique statistique permettant de résoudre les systèmes contenant une multitude d'atomes (Haéri & Roche, 1999, p. 74).

Dans les programmes de collège (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008) et maintenant du cycle 4 (Bulletin officiel spécial n°11, 2015), sont introduites les notions de molécule, d'atome et d'ion. Le modèle corpusculaire de la matière doit permettre d'interpréter les états de la matière ainsi que « *la transformation chimique*[41] *comme une redistribution d'atomes* » (Bulletin officiel spécial n° 6, 2008, p. 331). Les molécules, combinaisons d'atomes, sont les particules qui constituent les espèces chimiques. À la différence des chimistes du XIXe siècle, les élèves de collège n'ont ni le poids ni l'atomicité pour caractériser les atomes. Cependant, en fin de cycle 4, les élèves doivent savoir que l'atome est lui-même constitué d'un noyau et d'électrons. Il est alors caractérisé par un numéro atomique. Mais cette connaissance reste encore inutilisable aux élèves en fin de collège pour interpréter la composition d'une molécule et prévoir les formules chimiques.

Il n'est pas question de penser qu'un élève de quatrième peut raisonner comme un chimiste du XIXe siècle. Les uns et les autres cherchent à définir les formules chimiques. Mais si les chimistes du XIXe siècle partent essentiellement de leurs connaissances empiriques et ne considèrent l'atome que comme une hypothèse, nous estimons que la posture des élèves est inverse de nos jours. Ils ont peu de connaissances empiriques mais ne remettent plus en question l'existence de l'atome du XIXe siècle. Nous pensons notamment que la controverse atomiste/équivalentiste à propos de l'hypothèse atomique ne peut pas faire sens pour des élèves de collège et n'est pas une ressource potentielle pour la classe, ce que nous allons confirmer un peu plus loin à l'aide des espaces de contraintes et nécessités. Par contre, nous pensons qu'un élève de quatrième découvre les formules des molécules avec le même registre microscopique explicatif que les chimistes atomistes du XIXe siècle qui les ont élaborées, notamment pour l'eau et les corps simples gazeux. Au XIXe siècle, l'hypothèse de l'atome est introduite pour interpréter les combinaisons chimiques. De façon similaire, le concept d'atome est introduit dans les programmes français pour permettre d'interpréter les transformations chimiques.

[41] Il aurait été plus correct d'associer l'interprétation de la redistribution des atomes à la réaction chimique, qui correspond au modèle, plutôt qu'à la transformation chimique, qui correspond au concept empirique dans la réalité idéalisée.

1.1.2 Un langage symbolique qui s'élabore

Nous avons pu constater dans les programmes et les ouvrages scolaires que le choix des symboles des atomes et les premières formules chimiques présentées aux élèves ne sont jamais explicités. Il n'y a également aucun travail de nomenclature indiqué avant l'introduction de la chimie organique au lycée. Or nous avons pu constater dans l'enquête historique que plusieurs pistes ont été proposées par les chimistes pour représenter les espèces chimiques et les atomes à la fois dans la nomenclature et dans les représentations symboliques. Le langage symbolique de la chimie est une construction humaine pensée en dialectique avec les théories de l'époque. La présentation qui en est donnée dans les programmes pourrait laisser croire que les choix ont été arbitraires.

Nous pouvons lire dans les programmes de seconde ou de première scientifique :

> *La science a été élaborée par des hommes et des femmes vivant dans un contexte temporel, géographique et sociétal donné. (Bulletin officiel spécial n°4, 2010, p. 2)*

Travailler sur les différentes pistes de langage que les chimistes ont imaginées pourrait permettre d'illustrer ces propos. Nous choisissons de ne pas nous intéresser à l'élaboration de la nomenclature pour la reconstruction didactique et de nous restreindre à l'élaboration des formules chimiques. En effet, l'introduction de ces dernières est clairement identifiée dans les programmes scolaires de collège, ce qui n'est pas le cas de la nomenclature. Nous faisons l'hypothèse que des ressources liées au choix des symboles des atomes et des formules peuvent plus facilement trouver leur place dans la progression des enseignants.

1.1.3 Choix des symboles et des formules à exploiter

Quand nous avons commencé cette recherche, les programmes de cinquième et de quatrième étaient conçus autour de deux exemples : une espèce chimique, l'eau, et un mélange, l'air. Les seules transformations chimiques proposées étaient les combustions. Dans les nouveaux programmes, ces exemples ne semblent plus essentiels. L'eau est toujours indiquée pour travailler les états de la matière, la composition de l'air est citée et les combustions sont un des exemples possibles comme transformations chimiques à étudier parmi d'autres. Les enseignants ont plus de liberté dans les nouveaux programmes mais nous pensons qu'ils vont conserver des habitudes prises depuis au moins plus de vingt ans (Hirn, 1995). Les espèces chimiques que tous les élèves pourraient rencontrer sont l'eau, le dioxygène, le dihydrogène,

le dioxyde de carbone et le diazote. Les connaissances en chimie organique sont réduites et sont issues de l'étude des combustions des alcanes avec le méthane et le butane. Toutes ces espèces chimiques et leur formule faisaient partie de celles imposées par les anciens programmes et sont encore présentes dans tous les nouveaux ouvrages scolaires du cycle 4 de Physique-Chimie. Tous les élèves de début de cycle 4 ont donc au moins travaillé avec l'eau, le dioxygène, le diazote et le dihydrogène ainsi que le carbone, le méthane et le dioxyde de carbone. La sélection dans l'histoire des sciences des outils pertinents doit se faire sur le « déjà-là » (Fabre, 1999). Le choix des formules de l'eau et des corps simples précédemment cités semble convenir sur le plan institutionnel. Les réactions acide-base semblent prendre une plus grande importance. L'acide chlorhydrique devrait certainement être un des exemples le plus traité. Nous cherchons donc à élaborer les ressources à partir des atomes de carbone, hydrogène, oxygène, éventuellement azote et chlore et des espèces chimiques telles que l'eau, le dioxyde de carbone et le chlorure d'hydrogène pour les corps composés et le dihydrogène, le dioxygène, le diazote et le dichlore pour les corps simples. Nous sommes essentiellement dans la chimie des gaz, mais comment pourrait-il en être autrement pour l'étude des molécules ? La chimie des solides n'est pas du tout traitée dans les programmes du second degré français et nous avons déjà indiqué les problèmes que cela peut poser, notamment avec le carbone au cycle 4.

1.2 Histoire des sciences et difficultés des élèves dans le langage symbolique

Les principales difficultés des élèves constatées à partir du questionnaire peuvent se décliner en deux points : des formules chimiques qui ne sont pas stabilisées et une lecture du langage symbolique essentiellement à un niveau microscopique. Le langage symbolique n'est pas perçu comme un méta-niveau. Nous reprenons ces difficultés au regard de l'enquête historique.

1.2.1 Une formule chimique non maîtrisée

Nous avons constaté que suivant le contexte les élèves sont capables d'adapter les formules, notamment avec des formules proportionnelles. Nous pouvons faire ce même constat dans la première moitié du XIXe siècle, en premier lieu chez les équivalentistes pour qui la formule n'est qu'un outil de représentation basé sur des rapports pondéraux. Ils peuvent donc l'adapter en fonction des circonstances, en la doublant si nécessaire. Mais on trouve

également la même difficulté chez les premiers atomistes. Les formules des molécules ne se stabilisent que quand les chimistes établissent clairement la différence entre atome et molécule. Les organiciens constatent que le remplacement d'un atome d'hydrogène par un atome de chlore dans la chaîne carbonée ne change pas fondamentalement les propriétés de la molécule. Puis ils constatent également que l'arrangement des atomes est une caractéristique de la molécule aussi essentielle que le nombre d'atomes. Ces deux points ne sont jamais travaillés avant le lycée. Or l'étude historique semble indiquer que c'est ce qui a permis de différencier les concepts d'atome et de molécule et d'aboutir aux formules chimiques définitives. Cette différence semble notamment essentielle pour comprendre que la formule H_2O n'est pas l'addition de dihydrogène et d'oxygène, amenant les élèves à choisir l'équation $H_2 + O$ pour former l'eau, mais représente celle de la molécule d'eau constituée de la combinaison de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène issus des molécules de dioxygène et de dihydrogène.

Peut-on alors parler d'obstacle ? Ce qui pose problème aux élèves n'est pas nécessairement un obstacle. (Fabre, 1999) citant Brousseau résume les caractéristiques d'un obstacle

> *Un obstacle est une connaissance positive qui, dans un certain contexte, produit des réponses adaptées, mais conduit à des erreurs hors de ce contexte. Cette connaissance résiste aux contradictions et continue à se manifester, même après la prise de conscience de ses imperfections. (Fabre, 1999, p. 160)*

Nous avons pu constater que les élèves peuvent changer la formule chimique pour l'adapter à la réaction chimique qui leur est donnée. Dans la synthèse de l'eau, ils choisissent de prendre O et non O_2 alors qu'ils sont capables d'indiquer dans un autre contexte qu'O_2 et O ne correspondent pas à la même formule brute.

L'obstacle pour Bachelard doit revêtir un aspect épistémologique.

> *Chez Bachelard, l'obstacle revêt une cinquième dimension, épistémologique, dans la mesure où les errances de l'apprentissage ne s'avèrent lisibles qu'en référence aux errements de la formation du savoir tels qu'on peut les repérer dans l'histoire des sciences. (Fabre, 1999, 159)*

Les errements sur les formules en lien avec les évolutions d'une vision microscopique de la matière peuvent éclairer certaines des difficultés des élèves. On trouve également dans l'idée d'obstacle chez Bachelard de l'implicite et un caractère répétitif. L'élève n'est pas conscient

de ses difficultés et les obstacles ne sont jamais abolis (Astolfi & Peterfalvi, 1997). Les résultats du questionnaire obtenus jusqu'au niveau licence peuvent laisser supposer que c'est le cas. Faut-il alors attendre le lycée pour introduire l'importance de l'arrangement des atomes au sein de la molécule alors que les enseignants de collège présentent les modèles moléculaires en laissant dans l'implicite la position des atomes les uns par rapport aux autres ?

1.2.2 Une vision microscopique du langage symbolique

Le langage symbolique n'est pas perçu comme un méta-niveau chez les élèves. Ils ont une lecture essentiellement microscopique des noms et des formules chimiques en associant les critères de molécules ou atomes. Et pour ceux qui choisissent des critères macroscopiques, les noms ou les formules composées semblent entraîner des confusions entre les concepts de corps pur/mélange et ceux de corps simple/corps composé. Le concept d'espèce chimique ne semble pas toujours pas construit pour les élèves de fin d'études secondaires. Pour les chimistes du XIXe siècle, l'approche est avant tout macroscopique. Les premières formules chimiques indiquent essentiellement la proportion en masse des éléments constituant l'espèce chimique. Elles sont issues avant tout des connaissances empiriques et notamment de l'analyse permettant de distinguer les corps simples et les corps composés. La formule chimique ne paraît alors donner que des indications macroscopiques pour les équivalentistes. Cela semble aussi le cas pour les premiers atomistes. La lecture microscopique ne commence véritablement à se développer que chez les chimistes ayant une vision plutôt réaliste de l'atome.

Les chimistes du XIXe siècle ont des connaissances empiriques et s'interrogent à propos de l'existence de l'atome. Les élèves actuels ont peu de connaissances empiriques mais l'existence de l'atome ne fait aucun doute, même si le concept n'est pas nécessairement maîtrisé. Pour que la formule puisse simultanément être lue aux niveaux macroscopique et microscopique, le concept de substance avec les connaissances empiriques et le concept d'atome avec une vision particulaire de la matière semblent nécessaires. Ainsi formulé, cela semble une évidence mais qui n'est pourtant pas explicite dans les programmes. D'ailleurs cette démarche ne semble pas mise en place par les enseignants. Solomonidou et Stavridou écrivaient déjà en 1994 :

> *En fait le concept scientifique de substance possède deux représentations scientifiques, l'une qui est issue de données du niveau manipulatoire et qui se résume à la "carte d'identité"*

> *d'une substance, et l'autre qui est élaborée au niveau atomique, suivant laquelle à chaque substance correspond une molécule. La chimie actuelle essaie de faire correspondre les deux représentations d'une substance, de sorte que les données du niveau atomique décrivent et expliquent celles du niveau manipulatoire. On s'attend à ce qu'une représentation adéquate de substance repose sur le développement parallèle des deux types de représentation et sur leur mise en interrelation. Pourtant l'enseignement de la chimie, tel qu'il se pratique actuellement dans plusieurs pays, fait prévaloir les représentations du niveau atomique et les modèles de la structure de la matière. (Solomonidou & Stavridou, 1994, p. 86)*

Il nous semble que cela n'a pas beaucoup évolué. Nous avons constaté dans la partie 2 que la formule chimique est essentiellement introduite en lien avec le niveau microscopique et que le niveau macroscopique reste trop implicite. Solomonidou et Stavridou conseillent un travail autour de cartes d'identité. Celui-ci pourrait se faire dès l'introduction du corps pur au cycle 4 à partir des premières espèces chimiques identifiées. Cela pourrait être l'occasion d'un travail autour de la nomenclature en faisant distinguer aux élèves le caractère élaboré de certains noms, ceux-ci étant alors nécessairement associés à une espèce chimique. Cela permettrait de donner aux élèves un outil leur permettant d'identifier un corps pur ou un mélange dans de nombreuses situations.

2. Histoire des sciences pour le *media* : les raisons de l'élaboration des formules chimiques

Nous avons constaté au cours de l'enquête auprès des enseignants qu'ils semblaient démunis pour justifier les formules chimiques à leurs élèves. Les contraintes des programmes ne leur permettent pas d'utiliser la seule justification qui semble à leur disposition : la structure électronique de l'atome. Les chimistes du début du XIXe n'ont pas cette connaissance et pourtant aboutissent aux formules chimiques. Nous nous intéressons aux raisons qu'ils ont mobilisées. Celles-ci doivent ensuite pouvoir guider nos choix pour l'élaboration du *media*.

2.1 Utilisation des espaces de contraintes pour identifier les raisons qui ont permis l'élaboration des formules chimiques

L'étude historique de la partie 3, nous a permis de mettre en évidence différentes controverses au cours de la première moitié du XIXe siècle pour l'élaboration des formules.

L'utilisation de l'espace des contraintes et nécessités, proposé initialement par Orange (2000) repris par Lhoste et Peterfalvi (2009) et que nous avons adapté à l'étude de l'élaboration des formules chimiques (Figure 63), doit nous permettre de cibler les éléments historiques pertinents pour la reconstruction didactique en réalisant une synthèse épistémologique de l'élaboration des formules chimiques au XIXe siècle par une « cartographie du champ des possibles » (Orange, 2005a).

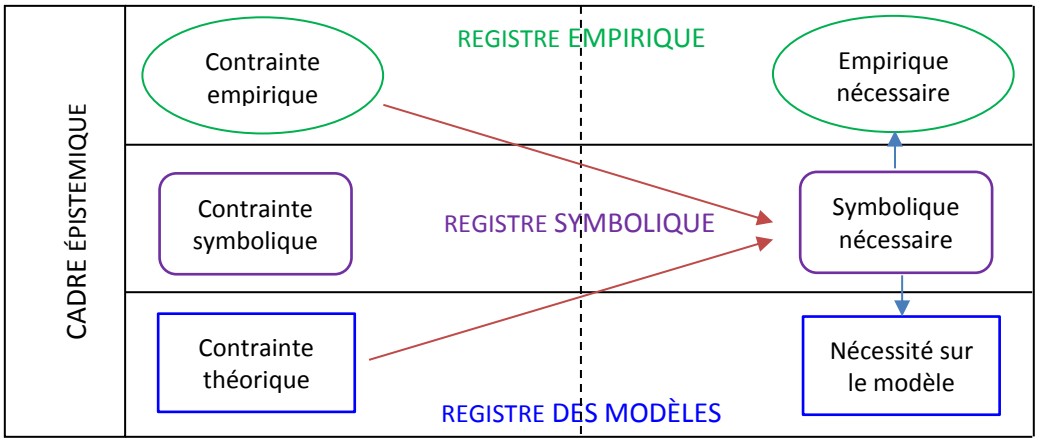


Figure 63 Espace des contraintes et des nécessités pour l'étude historique

Dans l'espace utilisé (Figure 63), les flèches de la même couleur symbolisent une mise en tension du registre symbolique entre le registre empirique et le registre des modèles. Pour aider la lecture des contraintes et nécessités, nous introduisons une lecture chronologique des mises en tension à partir d'un code couleur pour les flèches. Le choix des critères empiriques et des éléments retenus des modèles correspond aux contraintes et aux nécessités en fonction du registre symbolique étudié dans l'espace. Nous indiquons de même dans le cadre épistémique les registres explicatifs qui ont été utilisés par les chimistes pour élaborer les différentes formules. Certains de ces registres ne permettent pas le développement de modèles scientifiques tels que nous les avons définis dans la première partie mais sont nécessaires pour l'élaboration de la formule chimique. Dans ce cas, nous ajoutons une flèche partant directement du registre explicatif vers le registre symbolique.

Dans un premier temps, nous reprenons les différentes propositions qui ont été faites pour la formule de l'eau à la fois par les équivalentistes et les atomistes. Puis nous étudions celles des corps simples gazeux. Nous cherchons pour chaque proposition, ce qui, du registre empirique et du registre des modèles, a créé les contraintes et les nécessités dans l'élaboration de ces formules. Nous utilisons les définitions de Lhoste et Peterfalvi (2009) pour

> *considérer comme nécessité un construit nouveau sur la base d'un raisonnement actuel, alors qu'une contrainte serait un déjà-là convoqué dans un tel raisonnement. (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 48-49)*

Pour notre étude historique, la nécessité n'est bien évidemment pas le construit nouveau « *actuel* » mais le construit nouveau dans le contexte de l'époque. Nous débutons ce travail avec un petit détour par Lavoisier et la notion de corps simple ou de corps composé. Nous avons pu en effet constater dans le questionnaire élève que celle-ci n'est pas maîtrisée.

2.2 Corps simples et corps composés

La Figure 64 illustre pour l'eau la nécessité d'être représentée par deux symboles, ce qui correspond au passage du statut d'élément, ce que l'eau était depuis la chimie d'Aristote, à celui de corps décomposable. Un des registres explicatifs utilisé par Lavoisier dans son cadre épistémique, ce dernier étant construit en opposition à la chimie du phlogistique, est la décomposition et recomposition des espèces chimiques. Il y a pour lui deux catégories pour les substances chimiques : les corps simples et les corps composés. L'hydrogène et l'oxygène sont des corps simples et donc représentés par un symbole, ce qui constitue une contrainte symbolique. Expérimentalement, les chimistes décomposent en cette fin de XVIIIe siècle l'eau en deux corps, l'oxygène et l'hydrogène[42]. La somme des masses de ces deux gaz est égale à celle de l'eau décomposée. C'est la contrainte empirique. En se basant sur la conservation de la masse au cours des compositions et décompositions, modèle théorique qui est un déjà-là pour Lavoisier, l'eau ne peut être composée que d'hydrogène et d'oxygène. La représentation symbolique de l'eau est donc nécessairement constituée des deux symboles : celui de l'hydrogène et celui de l'oxygène.

[42] Nous reprenons ici la nomenclature de Lavoisier pour ces deux gaz.

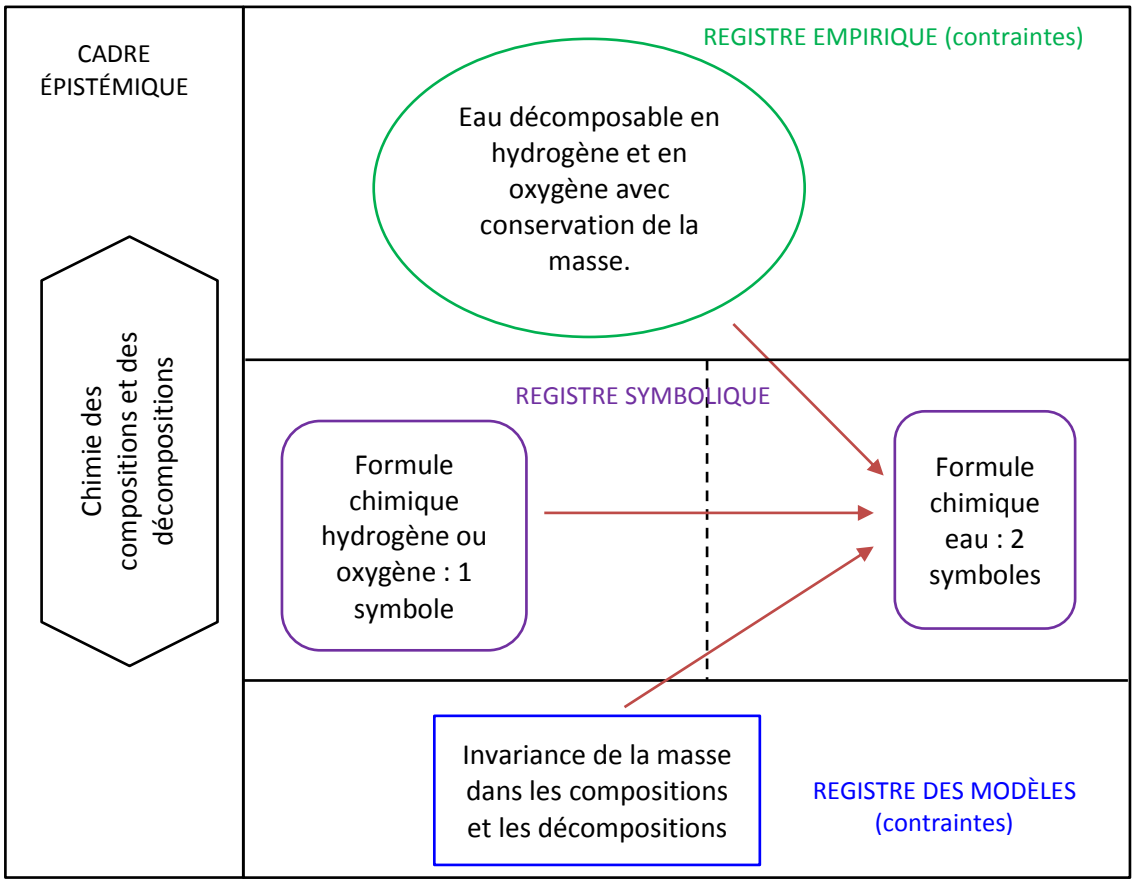


Figure 64 Contraintes et nécessités pour la composition de l'eau et des gaz hydrogène et oxygène

Les chimistes du début du XIXe siècle admettent pour l'eau son statut de corps composé. La présence des deux symboles dans l'eau passe du statut de nécessité pour Lavoisier à un statut de contrainte pour les équivalentistes ou les atomistes. Dans toute la suite des espaces, nous utilisons la représentation actuelle pour les symboles et les formules qui correspondent, pour l'essentiel, à celle de Berzelius utilisée par la plupart des chimistes du XIXe siècle.

2.3 Formule de l'eau

2.3.1 Formule de l'eau pour les équivalentistes

La formule de l'eau pour les équivalentistes est nécessairement HO (Figure 65) ou une combinaison proportionnelle. Comme nous l'avons déjà indiqué dans la partie 3, pour les équivalentistes, seuls les faits comptent, ce que Robardet et Guillaud (1997, p. 23) qualifient de position positiviste. Nous décidons de qualifier ainsi leur registre explicatif. Nous avons bien conscience de réduire la signification du terme « positivisme ». Nous l'utilisons ici au sens donné par Serres et Farouki (1997) :

> *D'une manière générale, on qualifie de positiviste toute personne qui, dans le cadre de la recherche scientifique, souhaite éliminer du discours scientifique tout ce qui ne relève pas directement de l'observation et de l'expérience. (Serres & Farouki, 1997, p. 745)*

Pour la recherche des formules, ils basent tout leur raisonnement à partir des lois des proportions chimiques qui permettent de différencier au début du XIXe siècle les mélanges et les transformations chimiques. Nous avons aussi placé ces lois dans leur cadre épistémique (Figure 65). Elles sont pour les équivalentistes issues uniquement du domaine empirique à partir de l'ensemble des mesures réalisées dans les transformations chimiques.

La formule chimique est un outil de représentation permettant d'illustrer observations et mesures expérimentales. La première contrainte est empirique. Depuis la fin du XVIIIe, l'eau n'est plus un corps simple. Les chimistes connaissent deux combinaisons possibles contenant uniquement les éléments[43] hydrogène et oxygène. Ceux-ci diffèrent par les rapports pondéraux d'oxygène et d'hydrogène. Les équivalentistes ont une contrainte symbolique. Ils prennent l'oxygène comme référence qu'ils représentent par O (Figure 65). Les équivalentistes posent comme règle que le premier équivalent, ou nombre proportionnel 1 ou encore celui à qui on associe le symbole, est celui qui se combine dans le composé le moins oxygéné. Dans le cas des combinaisons oxygène-hydrogène, l'équivalent hydrogène, symbole H, est donc nécessairement celui qui se combine avec l'équivalent oxygène dans l'eau et sa valeur pondérale est 12,5 ou 100/8. Ainsi HO est la formule de l'eau, et HO^2 ou $H^{½}O$ celles de l'eau oxygénée. Ces dernières correspondent à un rapport de 1/16 (Figure 65).

[43] Le mot élément est pris ici au sens de Lavoisier.

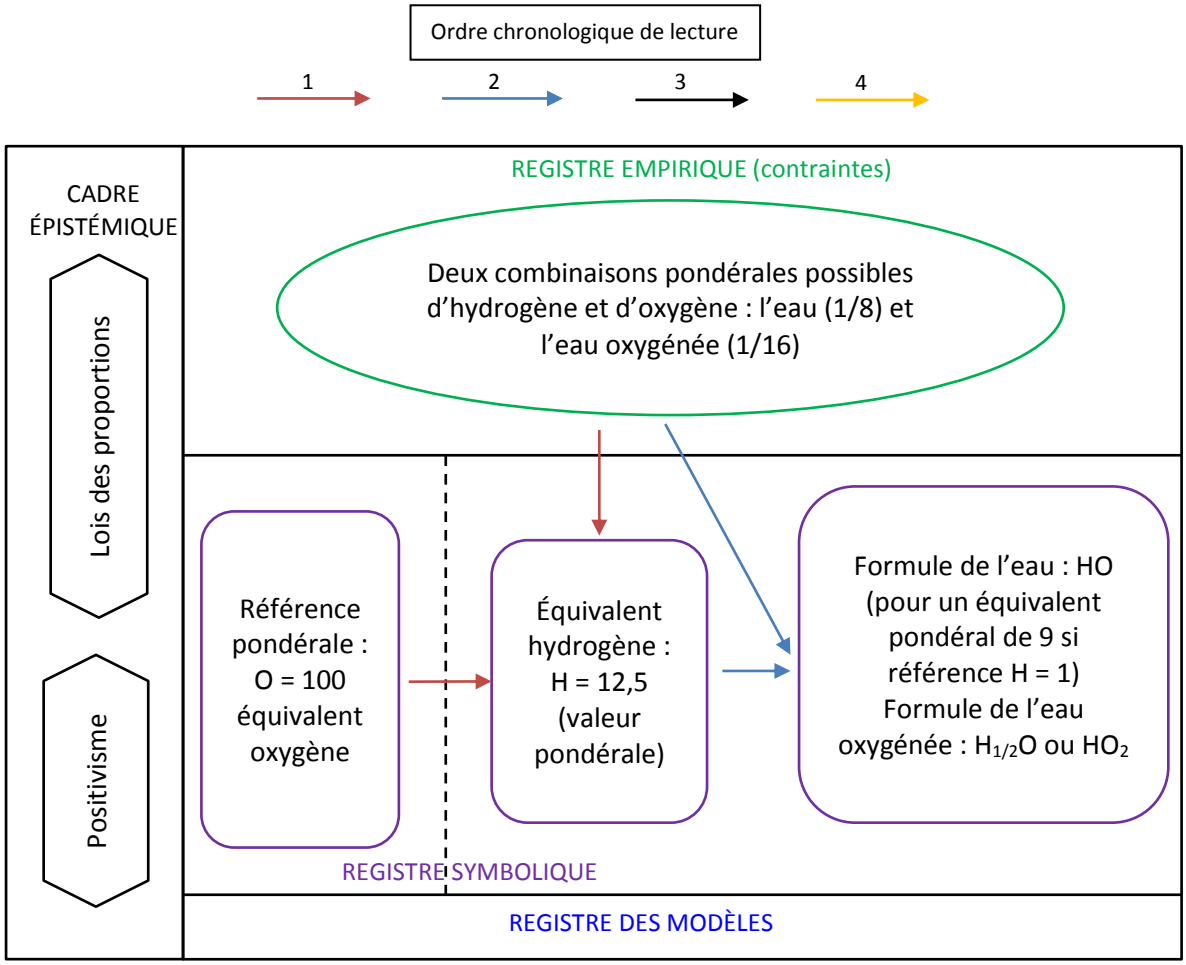


Figure 65 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour les équivalentistes

Nous ne plaçons pas de contrainte dans le registre des modèles pour justifier la formule. La formule des équivalentistes est arbitraire et peut changer en fonction du choix qui est fait pour la définition du nombre proportionnel (premier degré d'oxygénation). Il suffit en effet de changer la règle pour le choix du premier équivalent, et donc du symbole, pour changer la formule. Si nous décidons de définir l'équivalent d'hydrogène comme celui correspondant à l'espèce chimique avec la proportion pondérale d'oxygène la plus importante, la formule de l'eau oxygénée devient HO et celle de l'eau H^2O. Avec le registre explicatif utilisé par les équivalentistes, la formule de l'eau est tout aussi bien HO que H^2O^2. Les chimistes faisaient à l'époque le choix de de la combinaison minimale comme nous pouvons le faire actuellement avec les solides ioniques ou métalliques.

La référence pondérale a plusieurs fois varié. Les équivalentistes, notamment les organiciens, ont choisi dans un souci de simplification de prendre l'hydrogène comme référence pondérale à 1 à la place de l'oxygène pris à 100. Dans ce cas, l'équivalent de l'oxygène a une valeur pondérale de 8 et l'eau passe à 9 (Figure 65). Nous avons indiqué dans la partie 3 que Gerhardt

observe alors un résultat plutôt surprenant. Dans toutes les transformations chimiques libérant de l'eau, ce que les organiciens réalisent couramment à cette époque, on obtient systématiquement un multiple de deux de l'équivalent pondéral de l'eau correspondant à la formule HO avec H = 1 et O = 8. C'est le registre des symboles, choisi de façon arbitraire à partir de la définition de l'équivalent, qui entraîne une contrainte dans le registre empirique (flèche rouge - Figure 66). Gerhardt fait alors le choix de la formule H_2O qui lui semble nécessaire pour faire disparaître ce qui lui semble absurde. Cette dernière correspond en effet à un équivalent pondéral de 18 (H = 1 et O = 16). Ainsi la quantité pondérale d'eau produite dans les transformations chimiques correspond, avec cette nouvelle formule, à un multiple quelconque d'équivalents d'eau. L'évolution proposée par Gerhardt est liée uniquement à une contrainte du registre empirique qui l'amène à changer la règle pour l'équivalent de l'hydrogène et ainsi de la formule de l'eau (Figure 66).

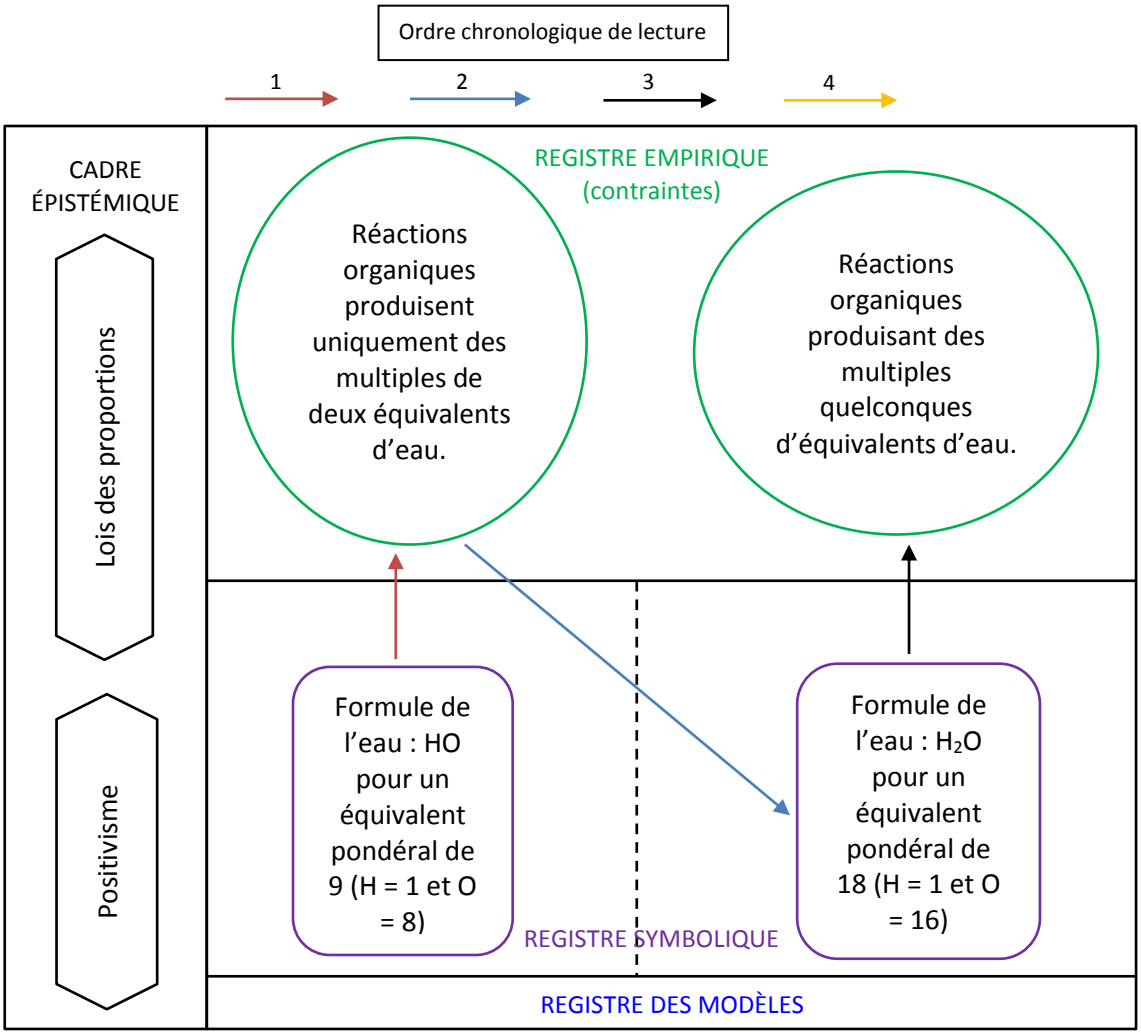


Figure 66 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Gerhardt (équivalentiste - organicien)

Les formules pour les équivalentistes sont choisies arbitrairement à partir d'une règle fixée dans le registre symbolique et à partir de contraintes empiriques pour les proportions dans les combinaisons multiples. Les formules ont ainsi évolué au gré des définitions choisies pour les équivalents.

2.3.2 Formule de l'eau pour les atomistes

Parmi les atomistes, trois cas sont à considérer : les formules proposées par Dalton (Figure 67), celles de Berzelius (Figure 68) et enfin celles des atomistes organiciens du milieu du XIXe siècle (Figure 69). Dans les trois cas, les chimistes utilisent comme registre explicatif une interprétation particulaire de la matière qui permet d'interpréter les transformations chimiques et les différentes lois obtenues au début du siècle dont celles utilisées par les équivalentistes. Pour l'établissement des formules, ils partent tous les trois de la même contrainte dans le registre des modèles : des espèces chimiques constituées de particules qui sont des combinaisons d'atomes différents dans des proportions pondérales fixes (Figure 67, Figure 68 et Figure 69). Comme les équivalentistes, ils ont au départ la même contrainte empirique : deux combinaisons d'hydrogène et d'oxygène dont l'eau dans les proportions pondérales de 1/8 (Figure 65, Figure 66, Figure 67, Figure 68 et Figure 69). La formule de l'eau est donc nécessairement constituée d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, ce que nous traduisons par la nécessité de deux symboles, H et O, dans la formule (Figure 67, Figure 68 et Figure 69). Nous avons indiqué cette nécessité dans le registre symbolique pour marquer la différence avec les équivalentistes pour qui les symboles correspondent à des règles arbitraires, donc des contraintes, sans lien avec le modèle particulaire.

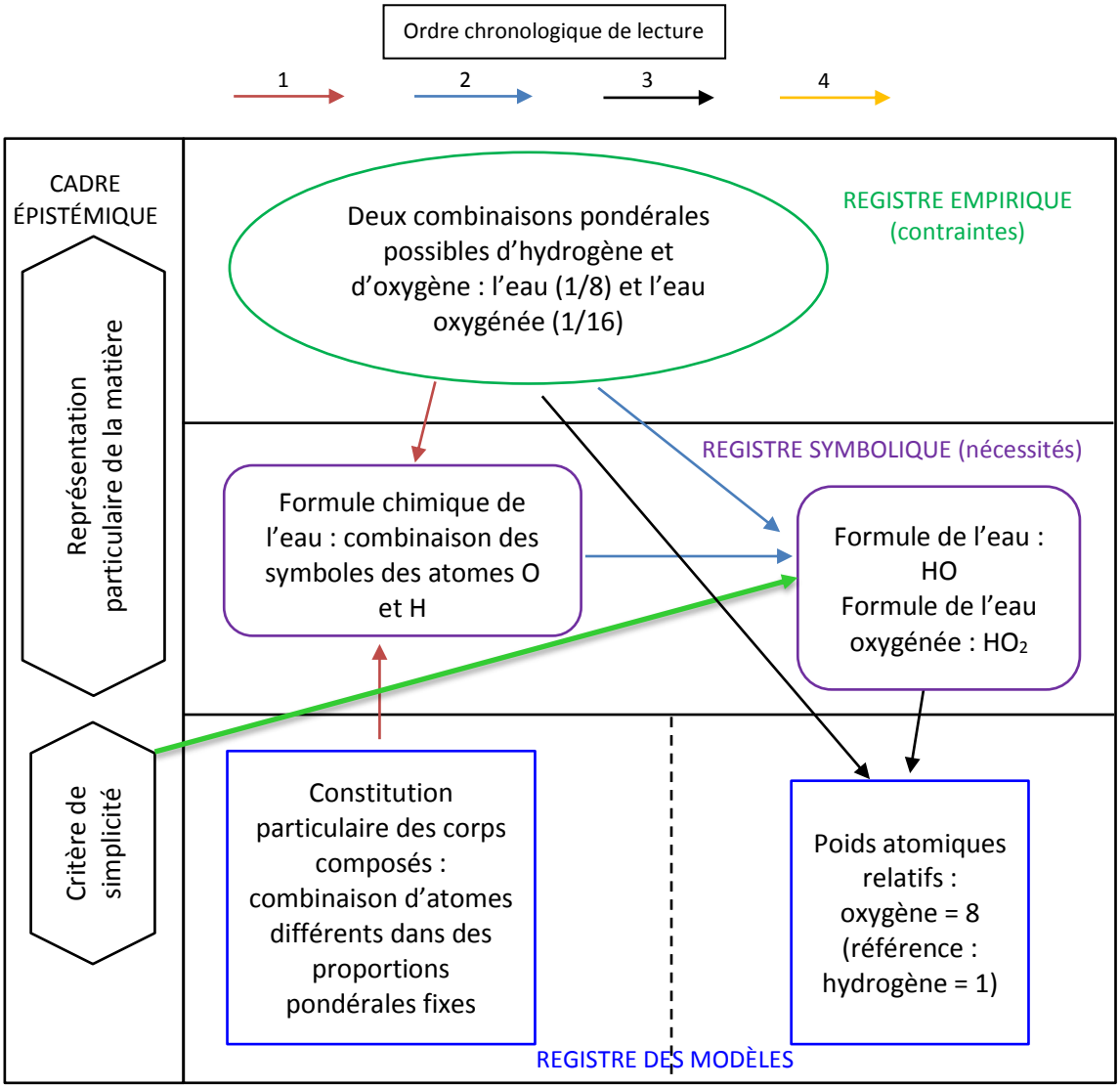


Figure 67 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Dalton

Dans le cas de Dalton, un critère arbitraire est nécessaire pour déterminer les formules chimiques : le critère de simplicité. En lien avec aucune théorie scientifique, nous ne pouvons le considérer comme un modèle scientifique et décidons de le placer dans son cadre épistémique (Figure 67). Dalton applique ce critère pour déterminer la formule de l'eau à partir des observations pondérales réalisées sur les composés contenant uniquement de l'hydrogène et de l'oxygène. La proportion pondérale hydrogène – oxygène étant 1/8 et celle de l'eau oxygénée 1/16, la formule de l'eau correspond alors nécessairement à HO. Enfin, à partir de la formule de l'eau et de la combinaison pondérale connue, Dalton peut déterminer le poids de l'atome d'oxygène en fixant comme référence celui de l'atome d'hydrogène à 1. Même si nous savons maintenant que cette valeur n'est pas correcte, nous l'ajoutons dans le registre des modèles comme une nécessité issue du registre symbolique (Figure 67).

Berzelius et les organiciens utilisent les lois volumétriques de Gay-Lussac dans la détermination de la formule de l'eau. Nous l'ajoutons donc dans les contraintes empiriques (Figure 68 et Figure 69) en plus de la contrainte pondérale. Cela va les conduire à la même formule empirique pour l'eau : H_2O (Figure 68 et Figure 69) mais pas tout à fait par les mêmes chemins. Berzelius ne fait pas la distinction entre atome et molécule. Dans sa représentation des gaz, c'est l'atome qui est équivalent au volume. Nous plaçons donc cette interprétation dans son cadre épistémique. Et c'est cette explication en lien avec les résultats de Gay-Lussac pour la synthèse de l'eau qui lui permet d'aboutir à la nécessité d'une formule pour l'eau en H_2O (Figure 68). Comme pour Dalton, cela lui permet de déterminer le poids relatif de l'atome d'oxygène.

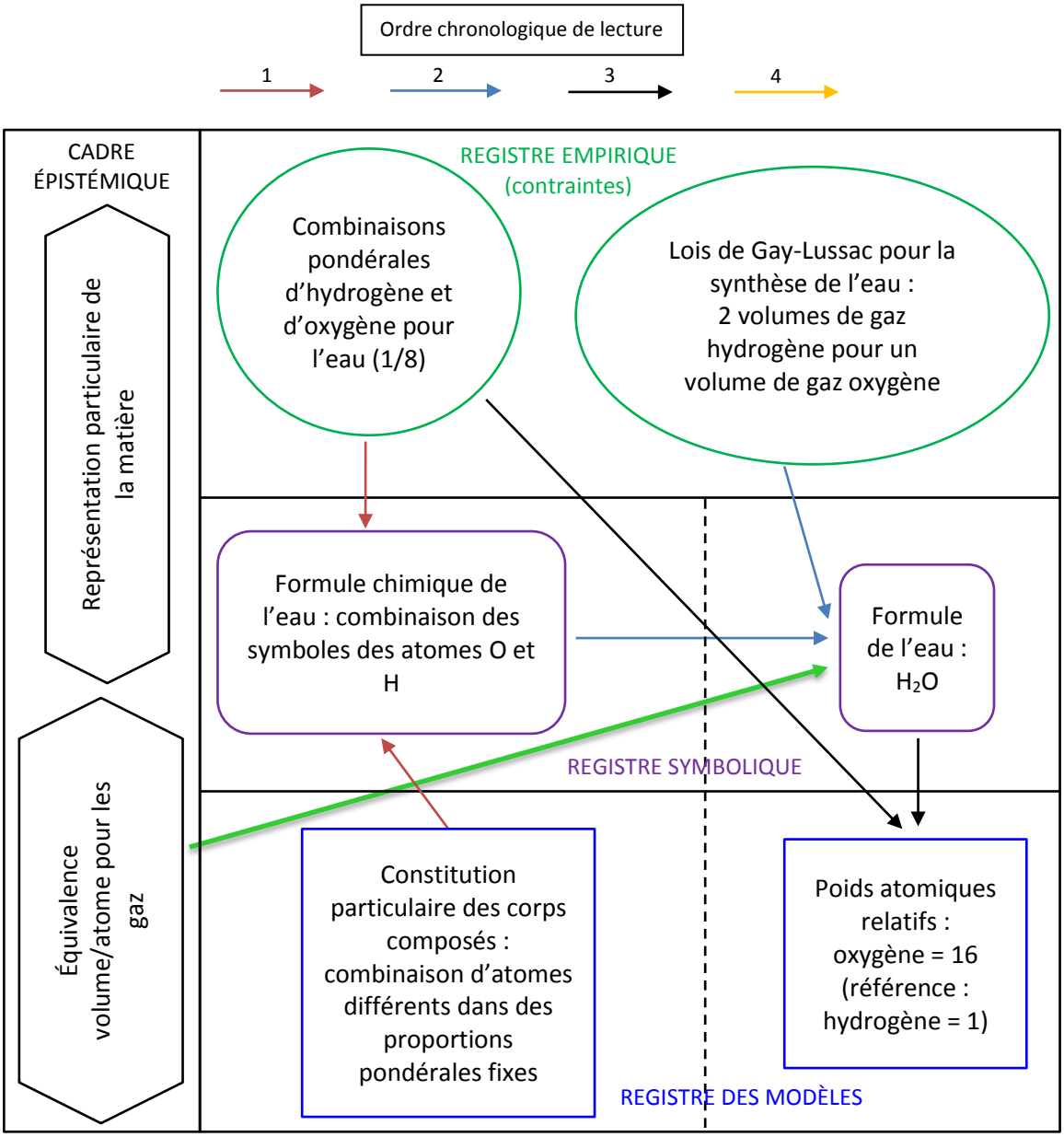


Figure 68 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Berzelius

2.3.3 Formule de l'eau pour les atomistes - organiciens

La représentation particulaire des organiciens évolue par rapport à celles de Dalton et de Berzelius. Ils font la distinction atome/molécule en admettant le rôle joué par l'arrangement des atomes au sein de la molécule. Nous l'ajoutons alors dans leur cadre épistémique (Figure 69). Nous aurions pu regrouper ces deux explications en une seule : le modèle particulaire de la matière au sens où nous l'entendons aujourd'hui entre atomes et molécules. Dans ce registre explicatif, les atomistes-organiciens utilisent comme contrainte théorique pour déterminer les formules, le modèle des gaz d'Avogadro-Ampère (Figure 69). Ils font évoluer le modèle de l'atome en lui ajoutant une nouvelle propriété : l'atomicité que nous ajoutons aux

contraintes théoriques (Figure 69). Celle-ci est déterminée pour chaque atome en croisant les nombreux résultats expérimentaux obtenus dans les synthèses organiques, notamment les réactions de substitutions, et l'observation des isomères. Nous ajoutons ces contraintes aux registres symboliques (Figure 69). Cela permet de déterminer l'atomicité de l'hydrogène à 1 et de l'oxygène 2. Nous avons donc une nouvelle contrainte symbolique : l'atome d'hydrogène peut faire une liaison[44] et celui d'oxygène deux liaisons (Figure 69). La molécule est donc caractérisée par le type et le nombre d'atomes qui la constituent, ce qui donne la formule empirique, mais également par l'arrangement des atomes entre eux, ce qui ajoute la formule rationnelle. La formule de l'eau est alors nécessairement H_2O pour la formule empirique ou HOH pour la formule rationnelle. Les valeurs pondérales, quant à elles, se déduisent toujours de la formule empirique en prenant pour référence l'hydrogène à 1 (Figure 69). La formule de l'eau n'évoluera plus après le congrès de Karlsruhe.

[44] Les chimistes utilisaient aussi les termes capacité de combinaison ou valence.

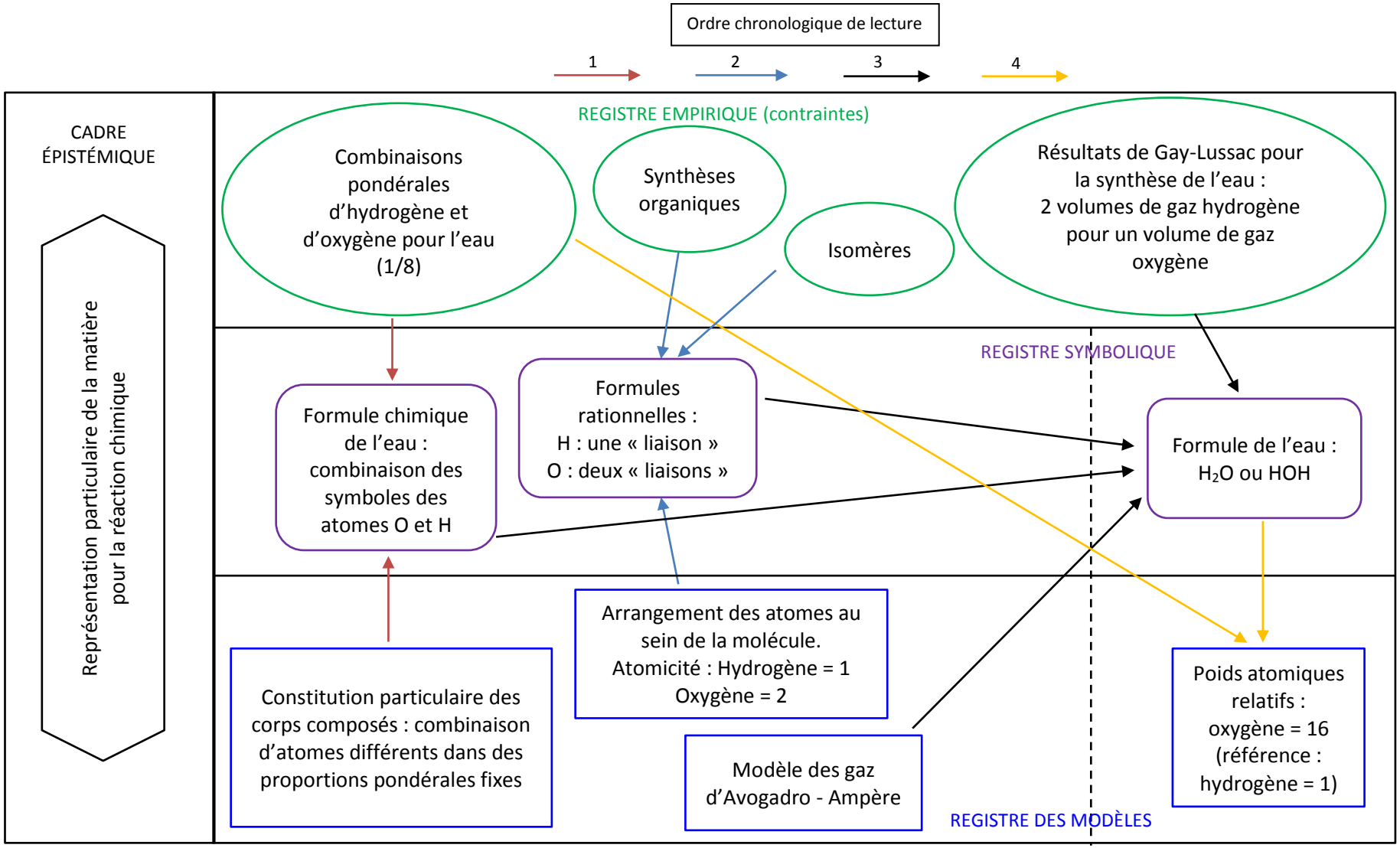


Figure 69 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour les atomistes après le congrès de Karlsruhe

2.3.4 Formule de l'eau : discussion

Que nous indiquent ces différents espaces ?

- Sans registre des modèles (les équivalentistes), la formule de l'eau est arbitraire et se décline sous plusieurs formes en fonction de la référence choisie.
- Si le registre des modèles est insuffisant et qu'il est nécessaire d'ajouter un registre explicatif dans le cadre épistémique (Dalton et Berzelius), la formule n'est pas stabilisée.
- Ce n'est qu'uniquement quand le registre symbolique est exclusivement obtenu par la mise en tension du registre empirique et du registre des modèles, que le registre symbolique se stabilise.

Pour élaborer la formule chimique de l'eau, plusieurs contraintes empiriques et théoriques sont nécessaires pour un seul registre explicatif, celui de la représentation particulaire de la matière qui se perfectionne avec les organiciens-atomistes (Figure 69). Nous observons que ceux qui aboutissent à la formule H_2O, soit utilisent les lois de Gay-Lussac (Berzelius et les atomistes après le congrès de Karlsruhe) soit ont un registre empirique en chimie organique particulièrement développé (Gerhardt).

Nous continuons cette étude pour l'élaboration des formules des corps simples.

2.4 Formule des corps simples

La formule des corps simples est ce qui divise encore les chimistes au congrès de Karlsruhe. Pour les équivalentistes, la question ne se pose pas. Nous ne présentons donc pas d'espace pour ces chimistes. Dans le cas de l'eau, une fois l'équivalent de l'hydrogène défini à partir de l'équivalent d'oxygène, on associe les symboles aux équivalents qui sont de fait les symboles des corps simples. Pour les atomistes, la question est liée à l'identification des deux concepts : atome et molécule et au développement de la chimie organique. Nous n'indiquerons pas dans le registre des modèles les nécessités pour les valeurs pondérales des corps simples sauf pour le dernier espace. Celles-ci sont en effet obtenues de proche en proche à partir des corps composés avec au départ le choix d'une référence (soit O= 100 soit H = 1), sauf pour les organiciens-atomistes qui, une fois établie la formule du corps simple, peuvent à partir des densités déterminer les poids atomiques relatifs.

2.4.1 Formule des corps simples pour les atomistes

Le registre explicatif de Dalton est applicable aussi bien pour les corps composés que pour les corps simples. La Figure 67 est intégralement transposable dans le cas des corps simples. Au niveau empirique, il s'agit des espèces chimiques non décomposables. Au niveau particulaire dans le registre des modèles, ils ne sont donc constitués que d'un seul type d'atome. Et en appliquant le critère de simplicité, la formule est nécessairement H pour le gaz hydrogène et O pour le gaz oxygène (Figure 67).

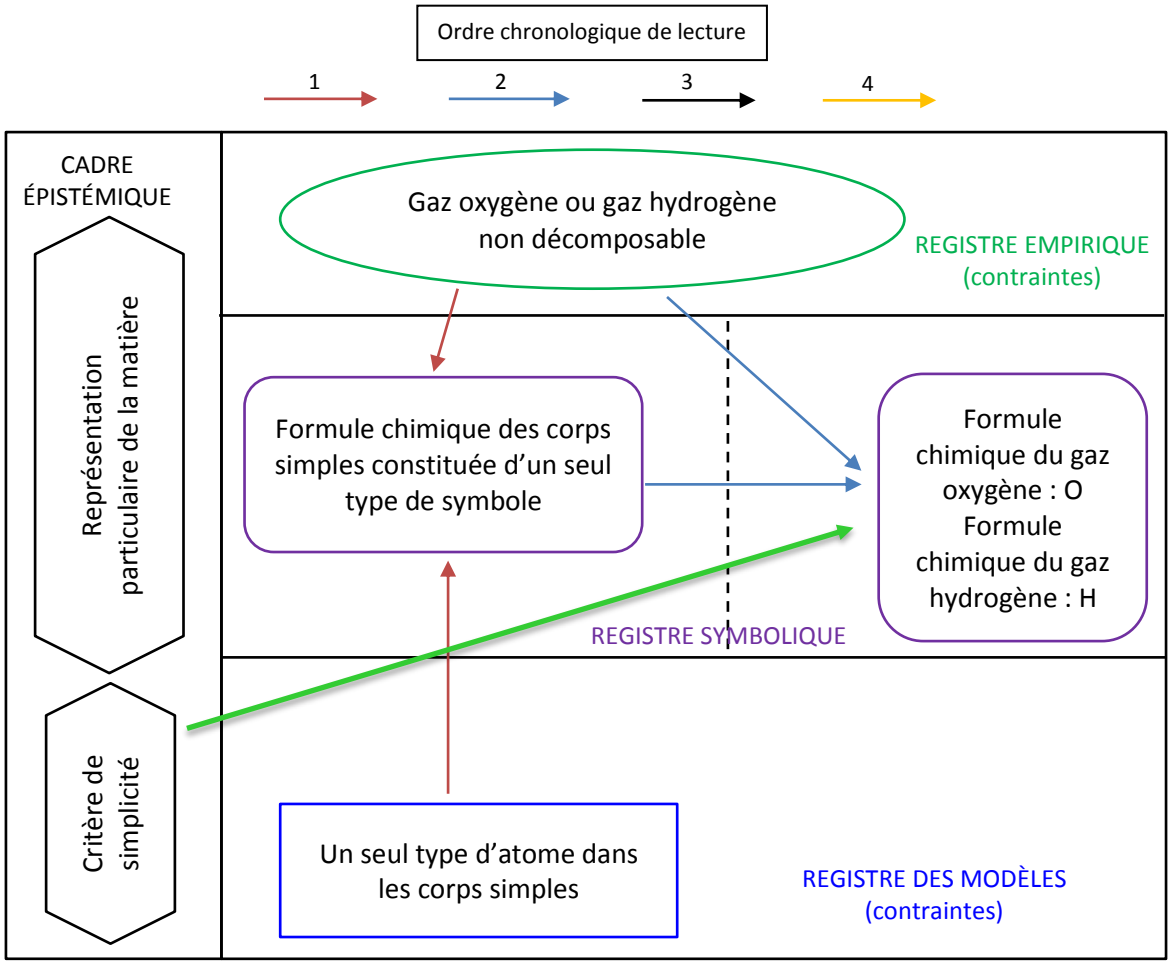


Figure 70 Espace des contraintes et nécessités : formule des corps simples pour Dalton

Entre Dalton et Berzelius, seul le cadre épistémique change pour les corps simples. Pour Berzelius, les phénomènes électrochimiques sont à l'origine de la cohésion des combinaisons des atomes en fonction de leurs polarités différentes. Une molécule est nécessairement constituée d'un groupe d'atomes de polarité positive et d'un groupe d'atomes de polarité négative. Nous ajoutons donc dans son cadre épistémique sa vision dualistique liée aux

phénomènes électrochimiques (Figure 71). La combinaison de deux atomes identiques est donc impossible.

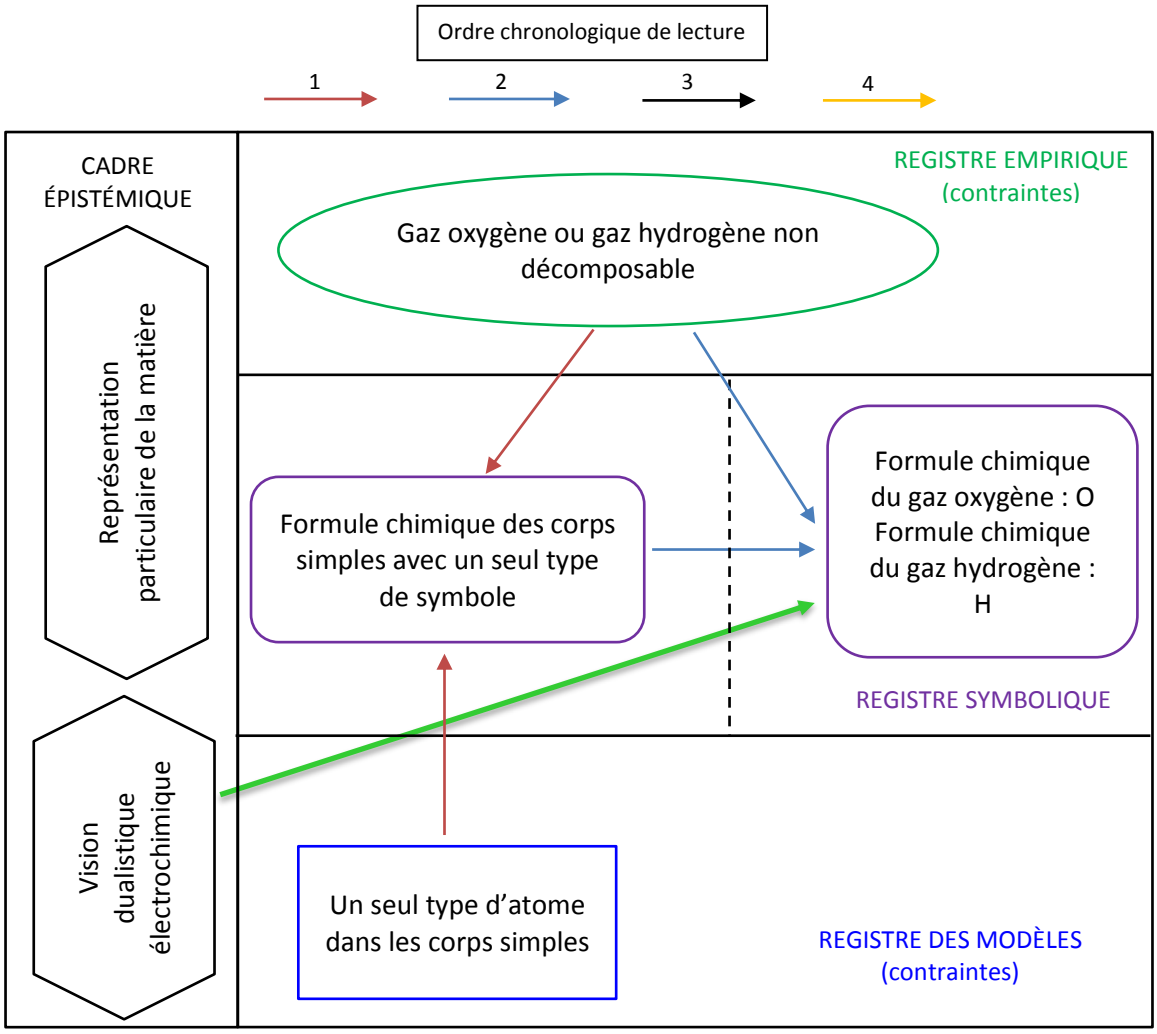


Figure 71 Espace des contraintes et nécessités : formules des corps simples pour Berzelius

2.4.2 Formule des corps simples pour les organiciens

L'étude des réactions de substitution amène les organiciens-atomistes à changer de point de vue par rapport à Berzelius. On intègre alors une nouvelle contrainte empirique : un chlore électronégatif peut se substituer à un hydrogène électropositif dans une molécule organique (Figure 72). Les organiciens retirent de leur registre explicatif la vision dualistique et y ajoutent la distinction atome-molécule ce qui permet d'imaginer dans le registre symbolique des corps simples composés de deux atomes du même type (Figure 72). Les formules des gaz hydrogène et chlore sont biatomiques en cohérence avec les lois de Gay-Lussac et le modèle d'Avogadro-Ampère.

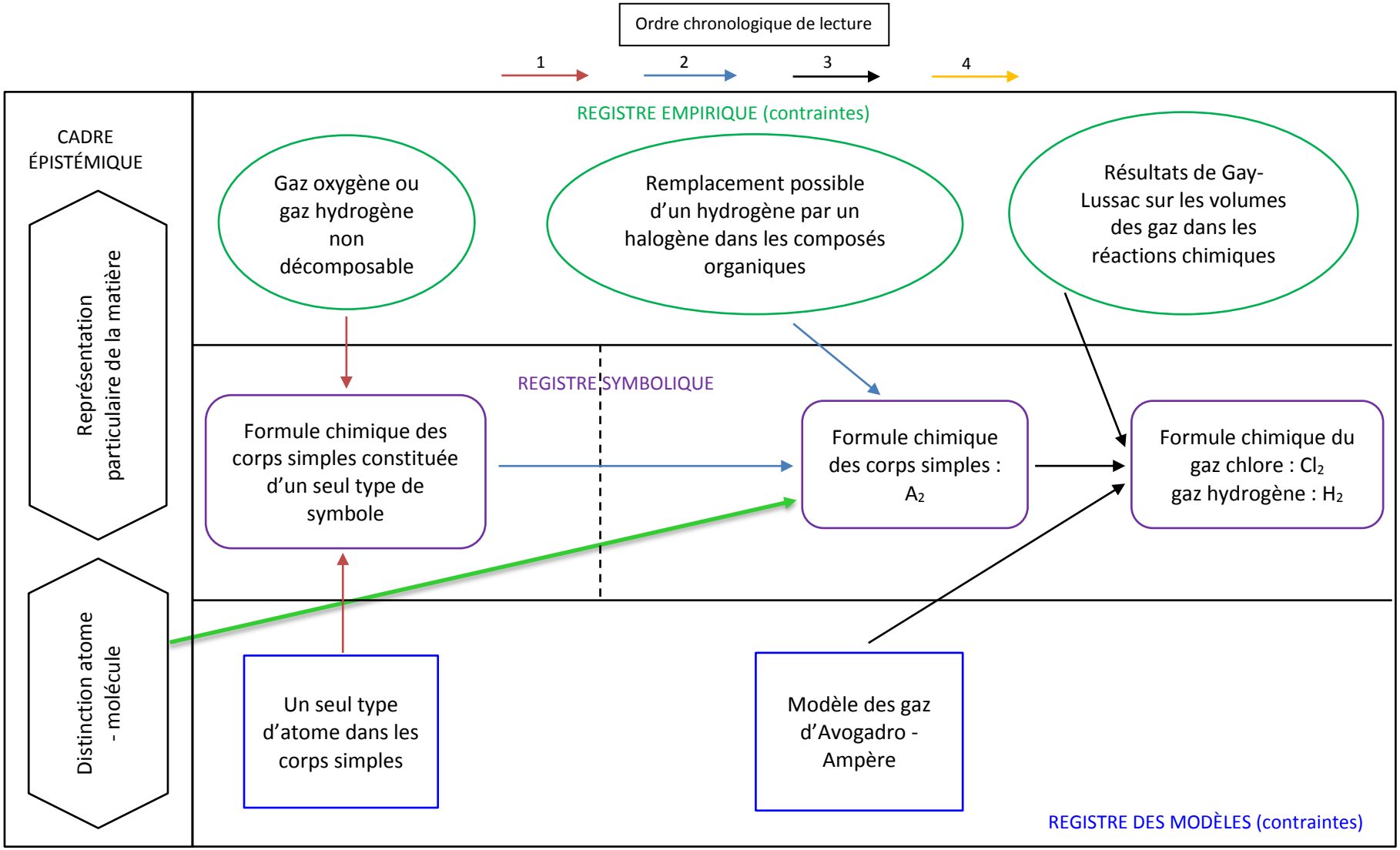


Figure 72 Espace des contraintes et nécessités : formules des corps simples pour les organiciens (Dumas - Gerhardt - Laurent)

2.4.3 Formule des corps simples pour les organiciens-atomistes

Enfin, comme nous l'avons déjà signalé avec la formule de l'eau, les organiciens, atomistes convaincus, attribuent à l'atome une nouvelle caractéristique : son atomicité. Elle permet d'établir la capacité de combinaisons de chaque atome soit avec lui-même soit avec d'autres atomes et elle est obtenue à partir des nombreuses observations en chimie organique. Les formules des corps simples sont alors composées d'un ou plusieurs atomes, le nombre n'étant pas limité à deux (Figure 73). En croisant ensuite avec les lois de Gay-Lussac et le modèle d'Avogadro-Ampère pour les gaz, les molécules de chlore, d'oxygène et d'hydrogène correspondent à des formules diatomiques (Figure 73). En repartant des densités de chaque gaz et avec la connaissance de la formule du corps simple, les chimistes peuvent déterminer ainsi les poids atomiques relatifs (Figure 73) dans le registre des modèles. Les chimistes peuvent même envisager d'avoir plusieurs corps simples à partir du même élément, ce qui leur permet de proposer une formule chimique pour l'ozone et de ne plus considérer cette espèce chimique dans le registre empirique comme un isomère du gaz oxygène mais comme une espèce à part entière (Figure 73).

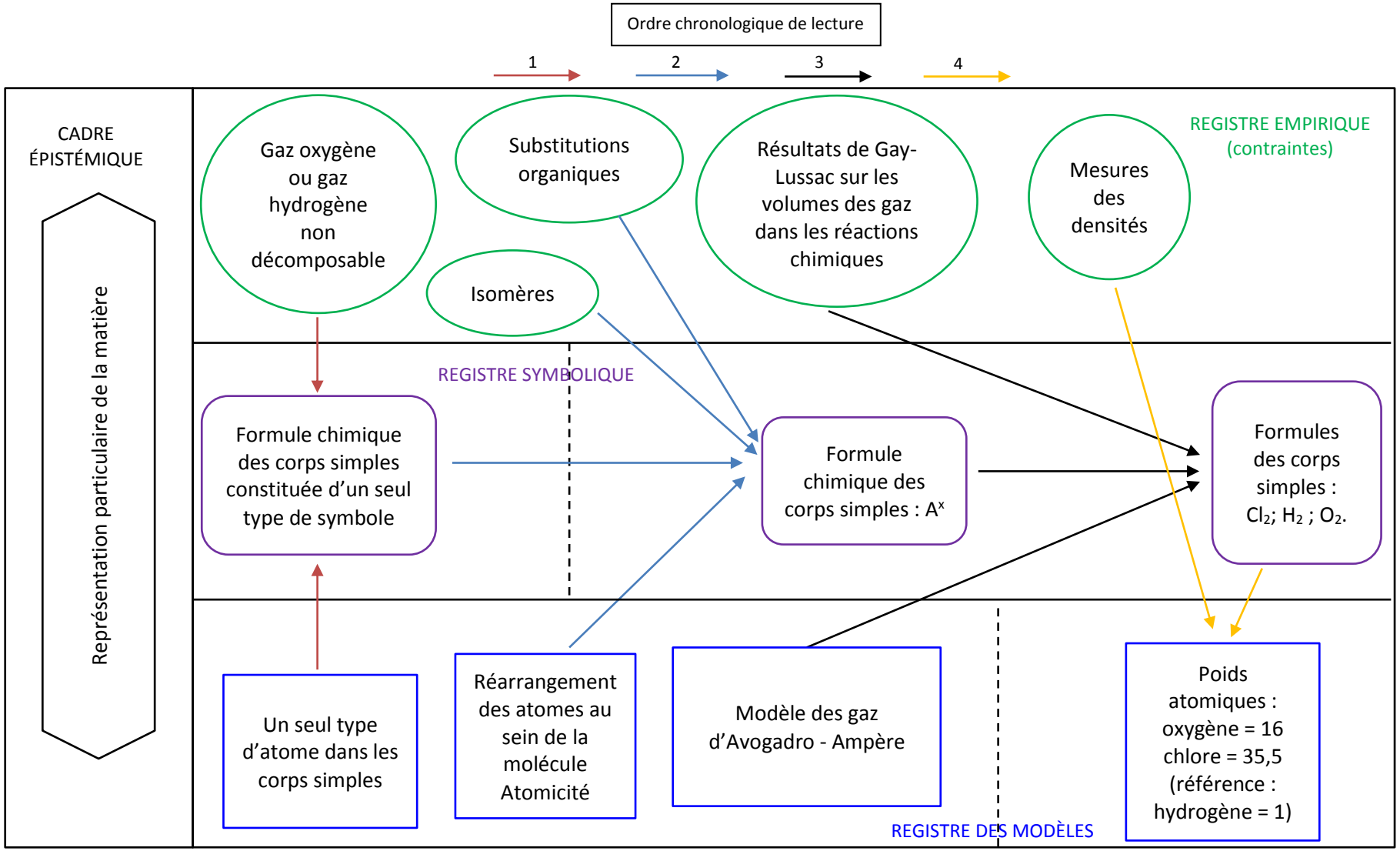


Figure 73 Espace des contraintes et nécessités : formules des corps simples pour les atomistes après le congrès de Karlsruhe

2.4.4 Formule des corps simples : discussion

Nous aboutissons à la même constatation qu'avec les espaces pour la formule de l'eau. Ce n'est que quand le registre symbolique est obtenu par la mise en tension du registre empirique et du registre des modèles, sans registre explicatif tiers (la flèche verte des Figure 67, Figure 68, Figure 70, Figure 71 et Figure 72), que le registre symbolique se stabilise. Comme pour la formule de l'eau, le dernier espace des contraintes (Figure 73) qui aboutit aux formules définitives des corps simples est bien le plus complexe. Mais la formule des corps simples a beaucoup plus divisé la communauté scientifique alors qu'atomistes et équivalentistes pouvaient parfois être d'accord pour les corps composés. Les premières propositions de corps simples constitués de plusieurs entités particulaires ont été faites par Avogadro et Ampère en 1811. Il faut pourtant attendre cinquante ans plus tard le congrès de Karlsruhe et Cannizzaro pour que leurs propositions soient reprises. Pour cela, il était sans doute nécessaire de développer le modèle de l'atome et n'avoir plus qu'un seul registre explicatif. Mais l'accord définitif de toute la communauté scientifique ne sera vraiment obtenu que quand l'atome sortira de son statut d'hypothèse pour devenir une réalité probable.

2.5 Conclusion : ce que nous apprennent les espaces des contraintes

D'un point de vue épistémologique, pour pouvoir élaborer les formules chimiques de l'eau et des corps simples, telles que nous les connaissons aujourd'hui, un registre des modèles a été nécessaire. Mais le premier modèle proposé de l'atome, particule élémentaire caractérisée par sa masse, a nécessité deux registres explicatifs dans le cadre épistémique :

- le premier permettant d'expliquer la constitution de la matière comme combinaison des atomes ;
- le deuxième permettant d'expliquer le comment de ces combinaisons. Il y a eu alors successivement le critère de simplicité de Dalton et la vision dualistique de Berzelius.

Les formules chimiques se stabilisent définitivement quand les atomistes proposent un modèle de l'atome suffisamment développé ne nécessitant plus qu'un seul registre interprétatif dans le cadre épistémique : le modèle particulaire de la matière. L'atome est alors caractérisé par sa masse et son atomicité. Au niveau empirique, la chimie organique, à travers notamment des réactions de substitution et les réactions dans les gaz, semble avoir

joué un rôle essentiel dans la détermination des formules à la fois de l'eau et des corps simples. Nous retrouvons systématiquement dans les espaces des atomistes la tension entre les lois volumétriques de Gay-Lussac et les lois d'Avogadro-Ampère. Enfin l'élaboration finale des formules des corps simples correspond à l'espace où contraintes et nécessités sont les plus nombreuses alors que paradoxalement ces formules sont les premières présentées aux élèves. L'apparente simplicité symbolique des formules des corps simples ne doit pas faire oublier la complexité des raisons nécessaires à leur élaboration.

Nous souhaitons proposer aux enseignants des ressources leur permettant d'introduire les premières formules chimiques. Nous avons indiqué dans la partie 1 le choix de travailler le registre symbolique en lien avec le registre empirique et celui des modèles, permettant de présenter ainsi le langage symbolique comme représentatif à la fois du niveau microscopique et du niveau macroscopique. Nous pensons que les controverses autour des formules de l'eau et des formules des corps simples associées au modèle de l'atome et aux lois volumétriques des gaz de Gay-Lussac peuvent permettre cela. Nous présentons dans le chapitre suivant les choix des ressources historiques et les scénarios élaborés à partir du choix des textes historiques.

Chapitre 2 : Élaboration des ressources

Nous avons constaté dans la partie 2 que :

- les élèves ont une lecture essentiellement microscopique de la formule chimique qui, de plus, n'est pas stabilisée. Ils peuvent en effet changer de formule en fonction des équations chimiques ;
- le programme et les enseignants observés introduisent les formules chimiques en lien explicite uniquement avec les concepts microscopiques. Le cortège électronique de l'atome, seul modèle semblant disponible aux enseignants pour justifier une formule, est hors programme en cycle 4. Le nombre d'atomes et leur disposition dans la molécule ne sont donc jamais justifiés en collège, rendant ainsi la formule totalement arbitraire.

Les enseignants n'ont pas la connaissance d'outils opératoires dans le registre empirique pour justifier les formules, ce qui ne permet pas d'associer les formules aussi bien au niveau

macroscopique que microscopique pour en faire un méta-niveau. Nous pensons que l'introduction arbitraire des formules n'aide pas les élèves à leur donner du sens et donc à les stabiliser. Les ressources proposées aux enseignants doivent donc permettre de fournir des raisons quant au choix des symboles et des formules chimiques, nombre et agencement des atomes dans la formule chimique. Les raisons doivent être issues des modèles microscopiques et des résultats expérimentaux macroscopiques.

1 Choix des ressources

1.1 Pour l'élaboration des symboles

Nous avons constaté dans les programmes, dans les ouvrages scolaires, dans les réponses des enseignants et des élèves aux questionnaires, que les symboles de Berzelius sont les seuls présentés aux élèves. Il nous semble intéressant de montrer aux élèves que les chimistes ont proposé différents symboles avant la proposition de Berzelius et de comprendre ce qui a orienté définitivement le choix vers les lettres. Cette séquence se situerait alors dans l'axe 2 proposé par de Hosson et Schneeberger (2011, p. 10) à propos de l'utilisation de l'histoire des sciences : « étude de l'apport de l'histoire des sciences pour approcher la nature de la science ». Ce travail autour des différents symboles et de la construction « « syntaxique » de la formule devrait permettre d'illustrer l'élaboration de la science comme « une aventure humaine » (Martinand, 1993, p. 96).

Maurines et Mayrargue (2007) ont élaboré deux dossiers dans le domaine de l'optique en lien avec l'histoire des sciences. Ceux-ci doivent permettre de proposer une « *histoire où les connaissances scientifiques sont considérées comme le résultat d'activités réalisées par des hommes dans un contexte socioculturel d'une époque donnée* » (Maurines & Beaufils, 2011, p. 278). Maurines et Beaufils (2011) constatent que montrer l'évolution de la science est un objectif intéressant pour les enseignants mais moins important qu'un travail permettant l'apprentissage des connaissances notionnelles du programme. Nous pensons qu'une proposition historique de la présentation des symboles aux élèves pourrait obtenir l'adhésion des enseignants si cela peut s'intégrer à leur progression sans leur donner le sentiment de perdre du temps pour l'introduction des notions du programme. Les deux enseignants que nous avons observés utilisent des supports pris dans la société actuelle pour introduire les symboles des atomes et les premières formules. Ces supports semblent n'avoir été choisis que

dans le but d'illustrer la séance. Nous pensons qu'un outil historique pourrait aisément les remplacer en permettant de continuer à illustrer la présentation de symboles tout en permettant de montrer aux élèves la construction humaine. Nous avons donc choisi de proposer aux enseignants de faire comparer aux élèves les représentations d'Hassenfratz et Adet, de Dalton et de Berzelius. Dans ces trois représentations, on observe déjà le principe de composition, soit dans l'espèce chimique pour les deux premiers, soit dans la molécule pour les deux derniers. Nous avons éliminé les symboles utilisés par les chimistes avant Lavoisier. Ces symboles nous semblent en effet trop éloignés des objectifs du programme en ne permettant pas d'introduire la notion de composition et pourraient dont paraître comme intéressants mais superflus pour un enseignant de collège. L'évolution des représentations des alchimistes à nos jours pourrait par contre présenter un intérêt dans le cadre de la formation des enseignants. Elle pourrait notamment permettre de préciser une des idées révolutionnaires[45] de Lavoisier : la composition ou décomposition des espèces chimiques à travers les noms et symboles des simples et des composés.

1.2 Pour l'élaboration des formules

Pour permettre la construction des raisons qui ont permis l'élaboration des formules, nous partons des controverses historiques pour la reconstruction didactique. Prenant appui sur la synthèse épistémologique réalisée à partir des espaces de contrainte, nous arrivons à quatre controverses possibles : atomistes contre équivalentistes, Berzelius contre Dalton, atomistes organiciens contre Dalton ou contre Berzelius. Le raisonnement des équivalentistes s'appuie sur un registre empirique particulièrement développé et nous pensons que celui-ci est beaucoup trop éloigné des connaissances des élèves. De plus, les équivalentistes refusaient le modèle atomique, rejetant toute hypothèse ne provenant pas directement des faits. Ils rejetaient donc l'atome dont l'existence était à l'époque purement hypothétique. Nous pensons par contre que celle-ci ne fait plus aucun doute aujourd'hui pour les élèves, ce qui ne signifie pas pour autant qu'ils en maîtrisent le concept. Les résultats du questionnaire de la partie 2 semblent aller dans ce sens. Cela remet-il en cause l'utilisation de l'atome au sein des registres du modèle ? Pour Kermen (2016, p. 45), on ne peut pas disposer de « *faits empiriques atomico-moléculaires en milieu scolaire* » ce qui permet de conserver l'atome dans le registre

[45] Le mot révolutionnaire est pris au sens de Kuhn.

des modèles. Pour Morge (2007, p. 26), on est passé « *du statut d'objet hypothétique modélisé au statut d'objet existant modélisé* » pour les atomes au cours de l'histoire des sciences et la question autour du modèle ne porte plus sur leur existence mais sur la recherche de leurs propriétés. Il ne nous semble dans ce cas pas judicieux de proposer aux élèves une controverse en lien avec les équivalentistes. Par contre, celle-ci pourrait être utilisée dans le cadre de la formation des enseignants. Elle nous semble trop éloignée des questions des élèves et des programmes, donc des enseignants. La controverse avec Berzelius doit faire référence à sa vision dualistique électrochimique. Cela suppose des élèves la connaissance des phénomènes électrochimiques. La connaissance des structures ioniques a toujours été placée dans les programmes après l'introduction des molécules et des premières formules chimiques. Même si les programmes de cycle 4 permettent maintenant aux enseignants de traiter les différents points dans l'ordre qu'ils souhaitent, nous pensons que leur demander de traiter les structures ioniques avant les molécules modifierait trop les habitudes prises (Hirn, 1995). De plus cette controverse ne permet pas de traiter la formule de l'eau. Nous choisissons alors une reconstruction didactique basée sur la controverse entre Dalton et les atomistes organiciens. Celle-ci est fictive, les atomistes organiciens ayant plutôt combattu les thèses des équivalentistes et de Berzelius. Mais le critère de simplicité avancé par Dalton semble constituer un argument permettant de justifier les formules atomiques des corps simples et corps composés accessible aux élèves. Il nous paraît intéressant d'un point de vue épistémologique de montrer que ce critère ne repose sur aucune théorie scientifique ni aucun fait expérimental et qu'il est donc totalement arbitraire. Côté empirique, les réactions de substitution nous semblent trop complexes pour les élèves de collège car elles font appel à des espèces chimiques qui leur sont encore inconnues et ont surtout été utilisées pour s'opposer à la vision de Berzelius. Malgré les nombreux travaux qui ont montré les difficultés des élèves dans l'utilisation des gaz (Fillon, 1997 ; Méheut, 1989 ; Stavridou & Solomonidou, 1989), nous faisons l'hypothèse que les réactions entre les différents gaz étudiées par Gay-Lussac pour établir les lois volumétriques pourraient être exploitées dès le cycle 4 et illustrer les controverses historiques pour l'établissement des formules chimiques. Ces réactions concernent en effet des espèces chimiques connues des élèves et des molécules simples. De plus nous ne proposons pas de travailler sur le bilan de matière ni de réaliser les expériences ce qui semble poser le plus de difficulté quand on travaille avec les gaz. Nous venons de trouver dans les nouveaux ouvrages de cycle 4 un exemple de l'utilisation des lois

volumétriques illustrée par une expérience (Annexe 20). Nous pensons donc que les réactions dans les gaz et les lois volumétriques de Gay-Lussac peuvent apporter le registre empirique permettant de réfuter le critère de simplicité de Dalton et d'élaborer, en lien avec le modèle de l'atome et de la molécule, la formule de l'eau dans un premier temps puis celles des corps simples diatomiques dans un deuxième temps. Il nous semble en effet plus judicieux de commencer par l'élaboration de la formule d'un corps composé puis de passer ensuite aux formules des corps simples. Malgré l'apparente simplicité du résultat final, l'histoire nous montre que leur élaboration a nécessité un plus long cheminement et n'a été permise qu'avec la différenciation des concepts d'atome et de molécule. Débuter avec la formule de l'eau doit alors permettre d'introduire les concepts d'atome et molécule. Continuer avec les corps simples doit permettre de progresser dans leur conceptualisation en les opposant l'un à l'autre. Nous faisons donc le choix de rechercher des textes historiques originaux permettant de s'opposer aux formules proposées par Dalton.

1.3 Quelques remarques à propos du concept d'atome

Nous avons déjà soulevé la particularité du concept d'atome. Doit-il être présenté comme un modèle hypothétique ou comme une particule existante ? Morge (2007) montre que l'existence de l'atome n'est pas incompatible avec celle de modèle. Il propose deux scénarios possibles pour son introduction.

> *Le premier scénario considère, dans un premier temps, que les particules sont des objets hypothétiques modélisés puis, dans un second temps, que les particules sont des objets existants modélisés. […].*
>
> *Le deuxième scénario consiste à faire coexister l'activité de modélisation des particules et l'existence des particules. Dans ce deuxième scénario, l'enseignant considère dès le début que les particules existent. Il est possible de reconnaître l'existence des particules tout en attribuant un caractère construit et évolutif à la représentation de cet objet. […] Pour les élèves, la question n'est pas de savoir si les particules existent, mais de rechercher leurs propriétés. (Morge, 2007, p. 28)*

Le premier scénario suit plutôt le déroulement historique, mais le modèle de l'atome est vraiment devenu efficient au XIXe siècle quand les chimistes ont commencé à s'intéresser à l'arrangement des atomes au sein de la molécule et à commencer à croire à l'existence de l'atome. Les ouvrages actuels et les enseignants que nous avons observés semblent considérer

dès le départ que l'atome existe et choisir plutôt le scénario 2. Il nous semble également plus accessible pour des élèves pour qui la question de l'existence de l'atome ne se pose pas et qui doit alors faciliter l'appropriation des différentes propriétés, objectif de la recherche dans le scénario 2. Mais quelles sont les propriétés que les élèves doivent connaître de l'atome au moment de son introduction ? Pour les programmes, il s'agit de leur conservation au cours des réactions chimiques. Mais cette propriété caractérise l'ensemble des atomes et ne permet pas de les différencier. Nous avons constaté dans la partie 2 dans les ouvrages scolaires et chez les enseignants que seul le symbole permet de caractériser les atomes. L'atome de carbone est différent de l'atome d'oxygène car ils ne portent pas le même nom et ils n'ont pas les mêmes symboles. Nous faisons l'hypothèse, qui serait à vérifier, qu'à la fois les élèves et les enseignants se contentent de l'étiquette du concept (Barth, 2001) car ils font la distinction en associant implicitement les atomes aux corps simples. Nous aurions alors un amalgame des niveaux microscopique et macroscopique. L'histoire des sciences nous indique que la première propriété attribuée aux atomes est leur poids relatif. Les enseignants pourraient la reprendre pour les caractériser, même si cette caractéristique ne présente pas d'intérêt en soi dans l'interprétation des phénomènes chimiques au niveau du collège. La deuxième propriété associée aux atomes, et qui pour Wurtz (1886) est la véritable fondation du modèle atomique, est l'atomicité. Tous les enseignants de collège utilisent les modèles moléculaires proposant ainsi aux élèves l'arrangement des atomes. Ils introduisent implicitement leur valence alors que celle-ci n'est pas au programme. Nous pensons pourtant que cette caractéristique devrait être donnée aux élèves au moment de l'introduction des formules chimiques. À partir des formules des corps composés, telles que HCl, H_2O, NH_3 et CH_4, il nous semble possible de définir l'atomicité ou le nombre de combinaisons possibles des atomes d'hydrogène, oxygène, azote, carbone et chlore. À présent que la classification périodique est officiellement dans les programmes, les enseignants peuvent faire remarquer aux élèves que ces atomes sont répartis dans différentes colonnes.

2. Les scénarios

Nous envisageons deux pistes possibles de séquences à réaliser avec les élèves dans le programme de quatrième pour la présentation des symboles et des premières formules chimiques :

- l'élaboration des symboles des atomes en repartant des symboles proposés par Hassenfratz et Adet, des symboles de Dalton et des symboles de Berzelius ;

- les controverses autour des formules des corps simples et de la formule de l'eau.

Beaufils, Maurines et Chapuis (2010) constatent que les enseignants attendent majoritairement une mise à disposition de documents préparés et si possible des séquences pédagogiques complètes. Nous avons élaboré un scenario à partir d'une sélection d'extraits de textes originaux en lien avec l'élaboration des symboles et des formules brutes. Suite aux retours de deux enseignants nous indiquant leurs difficultés pour entrer dans les textes à propos des controverses, nous avons décidé d'élaborer un deuxième scénario sous forme de dialogues tels que proposés par de Hosson (2011) pour la partie controverse. Nous indiquons dans ce paragraphe ce qui a motivé nos choix dans les scénarios : pour les élèves et pour les enseignants et ce qui nous a amené vers une proposition de « dialogues. Puis nous présentons les deux scénarios.

2.1 Objectifs pour les élèves

Nous souhaitons proposer dans les scénarios des faits en lien avec les concepts et qui puissent déclencher le questionnement des élèves et la recherche des raisons plus que la recherche de la « bonne formule ». Dewey et Bachelard se sont opposés à la tradition empiriste qui fait passer les faits comme « *fondements de la connaissance* » (Fabre, 2005, p. 58) mais pour l'un et l'autre, les faits doivent permettre le questionnement. Or ce que nous trouvons dans les ouvrages scolaires et ce que nous avons observé en classe, semblent indiquer que les faits et le questionnement sont absents au moment de l'introduction des formules chimiques. La controverse historique doit donc apporter la situation qui va poser problème, en proposant des éléments d'explications qui mis en relation peuvent paraître contradictoires ou paradoxaux (Lhoste & Peterfalvi, 2009). L'objectif de la séquence est d'amener les élèves à s'interroger sur les raisons qui conduisent à proposer une formule plutôt qu'une autre et s'il est nécessaire à ce que cela soit celle-ci. Les élèves ne peuvent pas avoir tous les outils leur permettant de déterminer ou de justifier toutes les formules chimiques en fin de cycle 4. L'introduction de la notion d'atomicité doit leur permette de raisonner et de développer de nouvelles formules mais à ce stade rien ne permet de comprendre l'atomicité des atomes et de pouvoir le prédire. La question doit rester ouverte.

> *Pourquoi certaines questions disciplinaires ne resteraient-elles pas ouvertes le temps qu'il faut ? C'est peut-être cette volonté de répondre trop vite "quelque chose" qui ferme le débat de façon non satisfaisante et démobilise bon nombre d'élèves. (Astolfi cité par Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 103)*

2.2 Objectifs pour les enseignants

Les objectifs que nous fixons devraient privilégier le débat dans la classe.

> *Car, s'il est théoriquement envisageable qu'une problématisation scientifique puisse être « monogérée », en pratique, même chez les chercheurs experts, les échanges argumentés sont une aide précieuse. (Orange, 2005a, p. 82)*

Nous faisons pourtant le choix pour l'élaboration de ces scénarios de ne pas imposer aux enseignants d'organisation du travail pour leur séance. Les enseignants n'ont pour l'instant aucune véritable ressource au cycle 4 permettant de justifier les formules chimiques présentées aux élèves. Quelle que soit l'organisation du travail choisie par l'enseignant, ces ressources peuvent permettre de sortir la formule chimique d'une présentation arbitraire. Imposer une démarche de problématisation qui implique un débat entre élèves demanderait pour certains enseignants de s'écarter d'une gestion de type transmissif, sans doute plus simple pour eux car plus habituelle. Des chercheurs en didactique des mathématiques montrent que les ressources développées par la recherche sont peu reprises par les enseignants (Gueudet & Trouche, 2008 ; Margolinas, 2002 ; Robert, 2003, 2010 ; Robert & Vivier, 2013 ; Roditi, 2003). L'utilisation de ces ressources leur demande un investissement important et n'a souvent que peu d'effets immédiats sur les élèves, ce qui peut en décourager un grand nombre. Robert (2003, p. 101) considère que « *ces obstacles tiennent en partie à la réalité même du travail de l'enseignant* ». Le premier rejet des enseignants est souvent le temps trop long que demande la réalisation de ces séances, notamment celles proposant les travaux en petits groupes suivis de débat. La pression des programmes est alors trop forte et entraîne le rejet des scénarios proposés (Robert, 2003). La pression « sociale » dans l'établissement peut aussi amener l'enseignant à ne pas travailler différemment de ses collègues (Robert, 2003). Et il est sans doute plus difficile de demander à un enseignant de changer ses habitudes de gestion de classe et d'organisation du travail avec les élèves que les contenus proposés (Robert, 2007).

> *La stabilité de la composante médiative des pratiques peut ainsi être à l'origine de difficultés pour les enseignants à adopter des exercices différents de ceux dont ils ont l'habitude : ce n'est pas changer d'énoncé qui est difficile, c'est changer de gestion, et s'adapter à des modes de déroulement inhabituels, pourtant éventuellement nécessaires. (Robert, 2007, p. 303)*

Le recours au travail en petits groupes et aux débats n'est peut-être pas encore suffisamment généralisé parmi les enseignants de physique-chimie dans le second degré. Imposer cette organisation du travail serait prendre le risque d'un rejet de ces ressources par les enseignants. Il nous semble plus intéressant dans un premier temps de développer les connaissances épistémologique et didactique des enseignants en les amenant à utiliser les documents sans nécessairement changer leurs habitudes de travail. Nous pensons en effet que si les enseignants utilisent les textes avec leurs élèves au cours d'une ou plusieurs séances, ils pourront commencer à développer de façon empirique des « *connaissances professionnelles locales* » leur permettant d'affiner le déroulement de leur séance, notamment en anticipant les réactions des élèves face aux différents documents. (Morge, 2003, p. 104-105). La démarche de problématisation, avec débat en classe, pourrait venir ensuite.

Dans l'élaboration des scénarios nous avons tenu compte du temps passé actuellement par les enseignants sur cette partie de programme. Le nombre de séances nécessaires pour les utiliser correspond au nombre de séances indiquées dans les programmes pour traiter les mêmes notions.

2.3 La forme des scénarios : la raison des dialogues

Les deux premiers enseignants à qui nous avons proposé le scénario à partir des textes historiques n'ont eu aucune difficulté pour comprendre la démarche de la première étape, l'évolution des symboles, mais ont semblé réticents quant à l'utilisation avec les élèves des controverses, eux-mêmes éprouvant des difficultés pour comprendre les textes et les objectifs. Nous avons alors fait le choix de proposer des dialogues construits à partir d'extraits historiques reprenant les trois personnages du dialogue de Galilée utilisés par Cécile de Hosson :

- Simplicio qui joue le rôle du détenteur des théories anciennes et le contradicteur ;

- Salviati qui représente le détenteur des nouvelles théories scientifiques ;
- et Sagredo qui représente le médiateur.

Les théories de Dalton, reprises et transformées par les équivalentistes, vont s'affronter aux théories des atomistes organiciens à travers les personnages de Salviati et de Simplicio. En utilisant les trois rôles discursifs décrits par Orange, Lhoste et Orange-Ravachol (2008) : « *le proposant, l'opposant et le tiers* », nous souhaitons créer une situation d'argumentation pour les élèves.

> *Le proposant porte une proposition (une thèse) en faveur de laquelle il argumente ; l'opposant tente de réfuter les arguments du proposant et peut contre-argumenter en faveur d'une autre thèse. Quant au tiers, c'est celui qui prend en charge la Question, c'est-à-dire la modalité discursive qui n'est ni du côté du proposant ni du côté de l'opposant, mais exprime le doute et le problématique. (Orange et al., 2008, p. 78)*

Ces auteurs observent d'ailleurs dans les débats que les élèves prennent souvent les rôles de proposant ou d'opposant mais rarement celui de tiers (Orange *et al*., 2008).

Nous pensons que les dialogues peuvent aider les élèves à lancer par eux-mêmes un débat argumenté à propos du langage symbolique. De plus, pour des élèves de cycle 4, la forme dialoguée nous semble plus accessible qu'un récit historique.

2.4 Les propositions de scénarios

2.4.1 Les prérequis

Nous avons indiqué aux enseignants dans les scénarios les prérequis qui nous semblent nécessaires pour ces séances.

- Les transformations chimiques sont définies comme une modification de la nature des espèces chimiques présentes au début, et à la fin, avant et après le changement. Nous avons conseillé aux enseignants de n'écrire, à ce stade, aucune équation pour représenter les transformations chimiques. Nous leur déconseillons notamment l'écriture, que nous trouvons dans l'ensemble des ouvrages scolaires, des équations avec les noms des espèces chimiques pour représenter la transformation chimique. Pour représenter la transformation chimique, nous leur proposons d'indiquer les espèces chimiques présentes dans l'état initial et les espèces chimiques présentes dans l'état final tel que cela a été demandé dans les programmes

de seconde en 2000 et repris par Kermen (2016). Cela donnerait dans le cas de la synthèse de l'eau pour les volumes indiqués par Gay-Lussac :

Etat initial ou début de la transformation
oxygène et hydrogène

Etat final ou fin de la transformation
eau

La conservation de la masse peut éventuellement avoir été traitée mais ce prérequis n'est pas nécessaire pour les séances à venir.

- Le concept d'espèce chimique, ou corps pur, est caractérisé par un certain nombre de propriétés (température changement d'état, masse volumique, …). Nous avons suggéré aux enseignants qu'ils pourraient faire élaborer à leurs élèves des cartes d'identité des différentes espèces chimiques qu'ils ont été amenés à étudier dès le début du cycle 4. Dans celles-ci, on associe à une espèce chimique un nom scientifique. Ces cartes pourraient être complétées au fil des années au collège.

- Le modèle particulaire déjà présenté aux élèves doit indiquer qu'une espèce chimique est constituée de particules infiniment petites et toutes identiques entre elles et mobiles. Dans le cas des gaz, les enseignants peuvent déjà donner aux particules le nom de molécules.

- Pour les dialogues, les atomes doivent déjà avoir été introduits comme particules constituant les molécules. Les atomes et molécules n'ont pas besoin d'être définis plus que cela avant les séances.

2.4.2 Scénario à partir des textes originaux

Ce premier scénario propose aux enseignants une sélection de textes historiques avec des exemples de questions pour leur exploitation et des objectifs possibles pour l'utilisation de chaque texte. La séquence proposée reste très ouverte. Aucune organisation de travail n'est imposée. Les textes proposés ont été légèrement modifiés par rapport aux originaux pour être plus accessibles dès la première lecture.

2.4.2.1 Première étape (Annexe 21.1)

La première étape correspond à l'introduction de l'atome et au choix des symboles. Nous proposons les extraits suivants :

- un texte de Dalton sur les formules chimiques du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone ;
- deux textes de Berzelius, l'un reprenant la théorie atomique de Dalton et l'autre justifiant le choix des lettres pour représenter les atomes ;
- un texte de Lavoisier sur la synthèse de l'eau.

Nous proposons les symboles d'Hassenfratz et Adet, de Dalton et de Berzelius pour représenter la composition du dioxyde de carbone. Le mot composition peut ici être aussi bien compris au niveau macroscopique que microscopique. En effet, Hassenfratz et Adet ont proposé leur symbole pour représenter les corps simples et les corps composés. Mais nous ne souhaitons pas développer ici ce point avec les élèves. Il pourrait être repris ultérieurement dans un travail autour du langage symbolique représentant à la fois les espèces chimiques et les particules.

Aux deux enseignants à qui nous avons présenté les textes, nous avons indiqué les connaissances qui peuvent être introduites au cours de cette séance à partir de ces extraits.

- À partir du premier texte de Berzelius sur la théorie de Dalton, nous proposons aux enseignants de signifier aux élèves que les particules ou molécules constituant les espèces chimiques sont elles-mêmes constituées de particules élémentaires : les atomes. Les molécules associées à une même espèce chimique ont la même composition atomique qui est invariable.

- Pour la représentation des atomes et des molécules, les élèves doivent choisir entre différents symboles qui ont été proposés par les chimistes. Dans ce passage, les élèves peuvent proposer tout type de représentation pour le dioxyde de carbone et placer notamment les lettres de Berzelius dans l'ordre qu'il souhaite. Cela peut alors être l'occasion de leur indiquer que les chimistes utilisent préférentiellement une représentation mais que d'autres sont également correctes.

- Le dernier texte de Lavoisier permet de représenter une première réaction chimique et doit permettre d'amorcer les débats pour la prochaine séance. Nous supposons en effet que les élèves n'auront pas tous la même équation. De plus, les résultats du questionnaire de la partie 2 nous amènent à penser que l'équation qui devrait être majoritairement proposée est : $H_2 + O = H_2O$.

2.4.2.2 Deuxième étape (Annexe 21.2)

La deuxième étape doit permettre de proposer une formule chimique de l'eau à partir de contraintes empiriques. Nous proposons les extraits suivants :

- deux textes de Dalton, l'un donnant une interprétation de la réaction chimique à partir des atomes et l'autre indiquant le choix du critère de simplicité pour les formules chimiques ;
- trois textes de Gaudin reprenant les lois de Gay-Lussac pour la synthèse de l'eau et permettant de lancer la controverse avec l'hypothèse de simplicité de Dalton.

Cette deuxième séance doit permettre d'introduire des propriétés caractéristiques des atomes et de présenter le modèle de la réaction chimique.

- Le travail à partir de la synthèse de l'eau doit permettre de caractériser l'atome comme une particule qui ne peut être ni créée ni détruite au cours d'une réaction chimique. Cette première règle permet d'écrire l'équation de l'eau avec les proportions entre les espèces chimiques rendant compte des proportions obtenues expérimentalement par les chimistes au cours de la synthèse de l'eau. Il nous semble important d'associer les atomes à la réaction chimique dès leur introduction, raison pour laquelle Dalton a proposé sa théorie. Nous suggérons aux enseignants qu'ils peuvent aussi introduire dans cette séance la masse comme caractéristique des atomes en précisant aux élèves que deux atomes de même masse sont identiques et que deux atomes de masses différentes sont nécessairement différents. Le lien pourrait alors être fait avec la conservation de la masse au cours des transformations chimiques.

- À partir des propriétés de l'atome, nous proposons aux enseignants de définir tout de suite la réaction chimique comme le modèle rendant compte de la transformation chimique au cours de laquelle il y a formation de nouvelles espèces chimiques et disparition de certaines autres par redistribution des atomes entre les molécules des espèces réactives pour former de nouvelles molécules, celles des produits. C'est à partir de cette définition que le langage symbolique peut être présenté comme un méta-niveau. La même formule représente à la fois l'espèce chimique et la molécule. L'équation de la réaction chimique peut se lire aux deux niveaux. Si cela peut aider les élèves, nous suggérons l'utilisation de la formule avec un indice pour l'état de la matière pour représenter l'espèce chimique.

2.4.3 Scénario à partir des dialogues reconstruits

Dans ce deuxième scénario, nous proposons deux dialogues inspirés de propos que ces différents chimistes ont tenus dans leurs écrits : Avogadro, Berthelot, Berzelius, Dalton, Gaudin, Lavoisier, Regnault, Wurtz. Nous avons laissé dans les dialogues (Annexe 22.2) la référence des différents extraits que nous avons utilisés. Ceux-ci peuvent être retirées pour les élèves. En dehors de Berthelot et Wurtz qui ont eu quelques échanges vifs par l'intermédiaire de la revue de l'académie des sciences, la plupart n'ont jamais partagé leurs différents points de vue. Ces dialogues sont totalement fictifs. Leur objectif est donc de permettre aux élèves de s'interroger et éventuellement prendre position à partir des différents arguments proposés par les chimistes pour les formules chimiques des corps composés (dialogue 1) ou des corps simples (dialogue 2). Comme nous ne développons ici que les controverses, nous ne proposons pas comme dans le premier scénario le choix entre les différents symboles. Les deux scénarios peuvent donc se compléter. Pour utiliser les dialogues, il est donc nécessaire que les élèves connaissent déjà les symboles des atomes. Et comme pour le premier scénario, nous proposons aux enseignants des questions possibles en précisant chaque fois nos attentes en termes d'objectifs.

2.4.3.1 Dialogue 1 (Annexe 22.1)

Le premier dialogue porte sur la controverse Dalton contre atomiste pour la formule de l'eau, soit HO ou H_2O, ou critère de simplicité contre contrainte empirique. L'objectif est de montrer aux élèves qu'à deux espèces chimiques différentes on associe à chacune une molécule différente. Elles sont constituées soit d'atomes différents soit d'atomes identiques. Et à chaque molécule, on associe une formule chimique. Nous proposons un déroulé de la séance en trois étapes en décomposant le dialogue en trois extraits séparés par une ligne pointillée (Annexe 22.1). Le texte risquerait d'être sinon beaucoup trop long en un seul bloc pour un élève de cycle 4.

- Dans la première étape, nous proposons de faire échanger les élèves à partir de la phrase dite par Salviati : « L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé » et de reprendre ainsi les définitions de corps simple et corps composé pour une espèce chimique. On peut éventuellement faire réfléchir au terme « plus » dans « n'est plus un corps simple » et faire référence à la théorie des quatre éléments

d'Aristote. On demande aux élèves à la fin de cette première étape, de répondre à la question de Sagredo en donnant leur proposition pour la formule de l'eau.

- Dans la deuxième étape, on demande aux élèves de formuler les propositions de Simplicio et de Salviati ainsi que les arguments proposés par chacun d'eux et de comparer à leurs réponses. L'objectif est de comparer le type d'arguments de Simplicio (simplicité de la formule) et de Salviati (interpréter un résultat empirique).
- Dans la troisième étape, on peut faire remarquer les raisons qui font que Sagredo ne semble pas vouloir retenir la proposition de Simplicio.

La séance doit donc permettre de revenir sur la définition du corps composé au niveau macroscopique en demandant aux élèves de donner une règle au niveau microscopique. Elle permet aussi de montrer qu'il y a eu débat autour des formules et que celles retenues par les scientifiques ne sont pas celles de Dalton qui s'est trompé sur ce point. À chaque étape, il est possible de faire débattre les élèves mais nous n'imposons pas cette modalité. Il est possible après cette première séance de proposer aux élèves différentes formules chimiques pour permettre de définir les règles d'écriture, notamment pour les corps composés qui vont être utilisés dans le deuxième dialogue : dioxyde de carbone, gaz chlorhydrique, ammoniac et méthane.

2.4.3.2 Dialogue 2 (Annexe 22.2)

Ce deuxième dialogue nécessite deux séances mais il permet de développer les concepts d'atome et de molécule et de présenter le modèle de la réaction chimique. Celui-ci porte sur la controverse Dalton et les équivalentistes contre les atomistes organiciens pour l'établissement des formules des corps simples gazeux. Les objectifs sont de définir atome et molécule au niveau microscopique et faire le lien avec l'espèce chimique (corps pur et corps simple). Pour le concept d'atome, nous introduisons la première notion de valence avec l'atomicité, à partir des molécules de chlorure d'hydrogène, d'eau, d'ammoniac et de méthane. Les enseignants peuvent faire le lien avec les modèles moléculaires et le tableau périodique. Le deuxième objectif est de proposer une interprétation microscopique du modèle de la réaction chimique comme un réarrangement des atomes des molécules correspondant aux espèces chimiques qui se transforment pour former les molécules correspondant aux espèces chimiques qui se forment. Les élèves doivent alors représenter la réaction au niveau microscopique par une équation et être capables de repérer la

conservation des atomes. La première séance doit permettre aux élèves de s'interroger sur les formules des corps simples et la deuxième séance d'appliquer cela dans les équations des réactions avec les gaz.

Nous proposons aux enseignants trois étapes possibles pour la première séance et cela toujours en décomposant le dialogue en trois extraits séparés par une ligne pointillée (Annexe 22.2).

- Dans la première étape, nous prévoyons de faire écrire aux élèves l'équation de réaction supposée de la transformation chimique entre l'«hydrogène» et le « chlore[46] » et de faire débattre les élèves sur l'éventuelle contradiction soulevée par Sagredo.
- Dans la deuxième étape, les élèves doivent écrire l'équation de réaction supposée de la synthèse de l'eau et de la synthèse de l'ammoniac. Les corps simples sont encore supposés monoatomiques. L'enseignant peut les faire débattre sur la proposition de Simplicio au regard des informations apportées par Salviati et leur demander leurs éventuelles hypothèses.
- Dans la troisième étape, les élèves peuvent écrire les formules des corps simples à partir des propositions de Salviati. L'enseignant peut les faire réfléchir aux raisons de Simplicio (des propositions pour « coller » aux résultats expérimentaux) et à celles de Salviati (des propositions à partir d'hypothèses mises à l'épreuve de l'expérience).

Nous décomposons la deuxième séance en cinq étapes possibles (Annexe 22.3).

- Dans la première étape, les élèves doivent écrire l'équation de réaction de synthèse du gaz chlorhydrique avec les formules proposées par Salviati. On peut demander aux élèves les raisons qui ont amené au XIXe siècle certains chimistes à proposer la théorie atomique et à d'autres de la rejeter de l'hypothèse de l'atome.
- Dans la deuxième étape, on peut faire écrire aux élèves l'équation de réaction de synthèse de l'eau (celle de l'ammoniac peut être traitée plus tard en exercice) en faisant remarquer la conservation des atomes. C'est alors l'occasion de renommer les

[46] En théorie, les élèves ne connaissent pas encore les molécules de ces deux gaz. Il n'y a donc pas de raison de les appeler dihydrogène et dichlore en début de scénario.

molécules ou de justifier les noms que les élèves connaissent déjà (dioxygène, dihydrogène, etc.).

- Dans la troisième étape, on peut faire comparer aux élèves les formules du gaz chlorhydrique, de l'eau, de l'ammoniac et du méthane. Les enseignants peuvent alors utiliser les modèles moléculaires pour ces quatre molécules. Cette étape peut être réalisée plus tard.
- Dans la quatrième étape, les élèves doivent répondre à la question de Sagredo à propos de la représentation des espèces chimiques.
- Dans la cinquième étape, on fait comparer les réponses des élèves et la proposition de Salviati et on leur faire écrire les équations de réaction de synthèse du gaz chlorhydrique avec les espèces chimiques en faisant remarquer le lien entre les nombres stœchiométriques et les volumes échangés.

2.4.3.3 Conclusion pour l'ensemble des séances

Les séances sur l'introduction des formules chimiques permettent de travailler les concepts à la fois du niveau macroscopique (espèce chimique et transformation chimique) et du niveau microscopique (atome et molécule) ainsi que le modèle de la réaction chimique. Une phase d'institutionnalisation est possible à la fin de ces deux séances en reprenant l'ensemble des notions abordées et en proposant aux élèves les définitions suivantes.

- Les espèces chimiques, ou corps purs, sont formées au niveau microscopique de particules. Ces particules sont toutes identiques pour une même espèce chimique. Pour les espèces chimiques étudiées, ces particules sont soit des atomes soit des molécules[47]. Les molécules sont elles-mêmes des assemblages d'atomes.

- Quand une molécule est constituée du même type d'atome, l'espèce chimique associée est un corps simple. Quand une molécule est constituée de plusieurs types d'atome, l'espèce chimique associée est un corps composé. Celui-ci est alors décomposable chimiquement en corps simples.

- Les atomes se caractérisent par leur masse[48] et par l'atomicité, soit le nombre de combinaisons qu'ils peuvent réaliser[49].

[47] Cette définition est à reprendre au moment de l'introduction des espèces ioniques.
[48] Pour les chimistes du XIXe siècle, il s'agit du poids relatif.
[49] Ce point est à reprendre en lien avec le tableau périodique.

- Un atome est représenté par un symbole. Une molécule est représentée par une formule chimique. On utilise soit le même symbole soit la même formule pour représenter l'espèce chimique au niveau macroscopique dans les réactions chimiques.

- Certaines espèces chimiques peuvent réagir entre elles : cela signifie que lorsqu'on les met en présence, une espèce chimique (ou plusieurs) peut disparaître et il se forme alors une ou plusieurs nouvelles espèces chimiques. Les espèces chimiques présentes au début de la mise en contact et après changement ne sont pas les mêmes. On dit qu'il y a eu une transformation chimique.

- Pour interpréter les transformations chimiques, les chimistes ont construit le modèle de la réaction chimique. À l'échelle microscopique, les molécules présentes dans les espèces chimiques changent. Les atomes des molécules constituant les réactifs se réarrangent pour former les molécules constituant les produits. On dit qu'il y a eu réaction chimique. Et donc au cours d'une réaction chimique, les atomes sont indivisibles et ne peuvent être ni créés ni détruits. Ils peuvent se recombiner pour former de nouvelles molécules. À l'échelle macroscopique, les espèces chimiques réagissent dans les proportions indiquées par les nombres stœchiométriques. La notion de mole n'est introduite qu'en seconde mais les proportions peuvent être étudiées dans le cas des volumes de gaz.

2.4.3.4 Des exercices possibles pour la suite

Nous proposons aux enseignants des exercices ou activités possibles pour la suite. Ils peuvent proposer des cartes d'identité des espèces chimiques[50] utilisées dans ces dialogues (dihydrogène, dioxygène, eau, dichlore, ……) en indiquant la formule des molécules constituant l'espèce chimique, la formule de l'espèce chimique, le nom scientifique associé et préciser si l'espèce chimique est un corps simple ou un corps composé. Ils peuvent continuer ce travail en réalisant les cartes d'identité de quelques espèces chimiques différentes mais avec des formules chimiques « proches » :

- H_2O et H_2O_2
- O_2 et O_3
- CH_4 et CH_3OH : un groupe OH à la place d'un H
- C_2H_6O et $C_2H_4O_2$: un O à la place de 2H

[50] Ou, s'ils ont déjà proposé aux élèves des cartes d'identité, ils peuvent les faire compléter.

- C_2H_4 et C_6H_{12} et C_3H_6 et C_6H_{12} (proportionnel)
- O_2 et O_3 ; H_2O et H_2O_2 ; C_2H_6O et $C_2H_4O_2$; CH_4 et CH_3OH.

L'objectif est de montrer l'importance du type et du nombre d'atomes constituant la molécule pour distinguer les espèces chimiques.

Les enseignants peuvent faire écrire les équations de réaction de synthèse de l'ammoniac et du méthane au niveau macroscopique avec les formules des espèces chimiques en faisant le lien entre nombre stœchiométrique et volumes de gaz, et au niveau microscopique en faisant observer le réarrangement des atomes.

Chapitre 3 : Premières utilisations des ressources

Nous avons souhaité tester les scénarios avec des enseignants et des élèves pour en vérifier la faisabilité. Nous avons proposé le premier scénario à deux enseignants dont Mathieu[51]. Nous les avons rencontrés pour leur présenter les textes, la démarche proposée et les objectifs de la séquence. Les deux enseignants ont semblé intéressés par les propositions et l'utilisation des textes historiques mais la deuxième étape du premier scénario leur a semblé à tous les deux difficile. Cela nous a conduit à élaborer le deuxième scénario à partir des dialogues. Ces enseignants ont accepté de tester les ressources dans leur classe, les textes originaux pour Mathieu et les dialogues pour le deuxième enseignant, que nous appelons Benjamin. Nous sommes allée les filmer au moment de la réalisation de leur séance. Nous avons ensuite proposé les dialogues à trois groupes d'élèves volontaires, respectivement en quatrième, troisième et seconde. Nous présentons dans ce chapitre la séance de Mathieu et nous faisons la comparaison avec celle étudiée dans la partie 2. Puis nous présentons une première analyse de l'utilisation des dialogues par Benjamin et de la séance réalisée en classe. Enfin, nous indiquerons quelques réactions des élèves volontaires au moment de la présentation des dialogues.

[51] Aude n'ayant plus de quatrième l'année de la nouvelle expérimentation n'a pas pu continuer ce travail.

1. Comparaison intra-personnelle avec ou sans les ressources

Au cours d'un entretien d'une heure au mois de mars 2016, nous avons présenté à Mathieu le premier scénario, les raisons qui nous ont amenée à choisir ces textes et nos objectifs quant à leur utilisation en classe. Nous lui avons proposé d'utiliser un ou plusieurs de ces textes avec le scénario proposé, ou d'en élaborer un nouveau. Nous avons filmé la séance qu'il a réalisée en juin 2016 devant seize élèves et nous l'avons interviewé juste après. Nous avons retranscrit la séance (Annexe 23) et l'entretien (Annexe 24). Nous allons dans un premier temps présenter les choix faits par Mathieu pour les ressources et le scénario. En comparant avec la séance analysée en partie 2, nous indiquerons ce qui nous semble stabilisé dans ses pratiques et ce que les ressources ont éventuellement permis de faire évoluer. Pour cela, nous réutilisons la méthodologie développée dans l'analyse des séances « ordinaires ». Puis, à partir de cette étude intra-personnelle, nous cherchons à définir ce qui serait nécessaire en formation pour permettre une évolution de l'enseignement du langage symbolique.

1.1 Textes et scénario choisis par Mathieu

La séance proposée par Mathieu à partir des textes historiques vient remplacer la séance « ordinaire » que nous avions filmée l'année précédente. Il choisit d'utiliser uniquement les textes proposés dans la première étape du scénario 1 pour introduire les formules chimiques en les simplifiant. Il ne conserve dans les textes proposés que les exemples de symbole d'Hassenfratz et Adet, de Dalton et il réduit le texte de Berzelius expliquant le choix des lettres (Annexe 25).

Nous constatons que ce choix lui permet de ne pas changer sa progression. Comme pour la séance « ordinaire », la séance à partir des textes historiques se situe entre un cours introduisant le concept d'atome en tant que particule élémentaire et une séance permettant aux élèves de manipuler les modèles moléculaires. Il termine toujours son programme de chimie par l'étude des équations de réaction. À la différence de la séance « ordinaire », Mathieu a déjà défini précédemment le terme de molécule. Au cours de l'entretien, il indique que ce travail lui permet d'ajouter un nouvel objectif, celui de montrer que la science se construit (Annexe 24, lignes 21-22 et 122-123). La première raison invoquée pour justifier ses choix dans le scénario proposé est l'intérêt qu'il porte à l'évolution historique des

connaissances. Il le répète plusieurs fois au cours de l'entretien (Annexe 24, lignes 20-22 ou 120-123).

> *Après cela leur permettait d'expliquer déjà une première fois que c'est là qu'il y a eu pas mal d'évolution pour la chimie moderne et donc c'est ça qui m'a intéressé. (Entretien 3 – Lignes 129-132 – Annexe 24)*

C'est aussi, à son avis, la partie qui doit le plus intéresser les élèves (Annexe 24 – Lignes 35-36). Mathieu n'utilise pas dans la proposition de scénario le texte de Lavoisier, point 3 de la première étape (Annexe 21.1). Travailler autour des proportions chimiques lui semble intéressant mais il indique que le temps ne lui permet pas de tout faire (Annexe 24 – Lignes 26-27). Cette remarque semble indiquer qu'il considère la fin de la première étape du scénario et la deuxième étape comme des éléments venant s'ajouter à ce qu'il propose déjà aux élèves. Il ne semble pas concevoir, qu'à partir du scénario proposé, il pourrait changer sa progression sans que le temps imparti au programme de chimie augmente. Le scénario doit en effet permettre de traiter simultanément l'introduction des formules chimiques et des équations de réaction. Mais cela implique la modification de la progression proposée dans le programme. De plus l'équation de réaction correspond à une transformation chimique non réalisable expérimentalement en classe. Mathieu semble ne pas imaginer de faire travailler les élèves sur une transformation chimique sans la réaliser expérimentalement (Annexe 24 – Lignes 28-34).

> *C'est pour ça dans cette partie-là j'aurais bien voulu voir plus à partir d'une expérience (Entretien 3 – Lignes 32-33 – Annexe 24)*

1.2 Analyse comparée de l'activité de l'enseignant

Nous comparons dans ce paragraphe les deux scénarios puis l'organisation du travail.

1.2.1 Comparaison des scénarios

Nous avons déjà comparé au paragraphe 1.1 les objectifs des deux séances et la place identique de ces deux dernières dans la progression de Mathieu. Nous allons examiner maintenant les deux itinéraires et les tâches prescrites aux élèves.

1.2.1.1 Comparaison des itinéraires

La séance élaborée à partir des textes historiques comporte quatre parties.

- Mathieu débute par un rappel très bref de la séance précédente.

- Il propose ensuite un travail à partir des textes historiques permettant d'introduire différents symboles et différentes représentations de l'écriture des formules chimiques à partir de deux exemples. Cette partie est la plus longue de la séance.

- Il institutionnalise l'écriture actuelle des formules chimiques.

- Il fait un bilan des deux exemples présentés dans la partie introductive en reprenant l'écriture qu'il vient d'institutionnaliser. Il applique cela à deux nouveaux exemples.

Nous avons repris les deux itinéraires dans le Tableau 20. Ils sont bien identiques dans le déroulé chronologique mais avec des durées différentes. Dans la séance « ordinaire » (Tableau 20), la dernière partie, portant sur les applications du cours, est la plus importante en durée. Dans la nouvelle séance (Tableau 20), la partie la plus longue en durée correspond à la partie introductive.

Tableau 20 Comparaison des itinéraires des deux séances

	Séance « ordinaire »		Séance avec textes historiques	
	Description	Durée	Description	Durée
Partie1	Rappel de la séance précédente	5 min	Rappel de la séance précédente	2 min
Partie 2	Exemple introductif	7 min	Exemples introductifs à partir des supports historiques	34 min
Partie 3	Bilan de l'exemple et institutionnalisation	7 min	Institutionnalisation	2 min
Partie 4	Applications	35 min	Bilans des exemples et application	14 min

Mathieu indique avoir conservé entre les deux séances le diaporama de sa quatrième partie dans lequel il présente les différents exemples utilisés pour le bilan : oxyde de carbone, dioxyde de carbone, eau et dihydrogène (Annexe 24, lignes 9-11).

1.2.1.2 Les tâches ou sous-tâches prescrites

Comme pour la séance ordinaire, nous regroupons dans le Tableau 21 les tâches ou sous-tâches prescrites en précisant la nature du travail (type et forme) et les connaissances et savoir-faire mobilisés par les élèves et les objectifs supposés de l'enseignant. La séance à partir des textes historiques comporte vingt-sept tâches, dont vingt-cinq distinctes, d'une durée moyenne de 2min 10s (Tableau 21).

Tableau 21 Ensemble des tâches prescrites au cours de la séance réalisée à partir des textes historiques

Partie	Épisode(s)	Durée	Nature du travail (type et forme)	Connaissances et savoir-faire visés par les élèves	Objectifs supposés de l'enseignant pour la tâche
1	2	57s	Rappel de la séance précédente par questions orales successives posées aux élèves.	Les définitions d'atome et de molécule	Distinguer atome et molécules dans les modèles moléculaires
	3	1min 6s	Présentation d'un texte publicitaire introduisant une formule et question orale posée aux élèves.	Savoir reconnaître une formule chimique dans un texte	Reconnaître une formule chimique
	4	1min 17s	Rappel de séances antérieures par questions orales successives posées aux élèves.	Lavoisier et la composition de l'air	Connaître la composition de l'air
	5	1min 58s	Lecture par un élève du texte. Analyse du vocabulaire par questions orales successives posées aux élèves.	Reconnaître la composition d'une molécule à partir de son nom et en déduire la définition du terme « binaire »	Comprendre un texte
	6	3min 15s	Analyse des représentations proposées dans le texte par questions orales successives posées aux élèves.	La composition du dioxyde de carbone Retrouver les symboles des atomes dans différentes représentations de la formule de la molécule de dioxyde de carbone	Décoder une formule chimique dans plusieurs systèmes de représentations
	8	1min 58s	Lecture par un élève de la première question. Réponse à la question par interrogation orale de quelques élèves.	Choisir entre deux types de représentation	Expliquer ses choix
	9	1min 22s	Rappel de ce qui vient d'être fait et présentation par l'enseignant de la question 2. Les élèves écoutent.		Comprendre des consignes
	11	1min 43s	Travail individuel des élèves pour répondre à la question 2 de l'exercice	Choisir des symboles et les associer pour représenter la formule de l'oxyde de carbone	Coder une composition chimique en une formule chimique à partir de différents symboles
	12	2min 42s	Correction au tableau de la question 2 de l'exercice par des élèves volontaires et vérification de la compréhension de la réponse par question orales successives posées aux élèves	Représenter la molécule de dioxyde de carbone à partir de symboles différents	Décoder la représentation d'une molécule à partir de symboles autres que les lettres

	13	1min 8s	Lecture par un élève de la troisième question. Explication par l'enseignant du travail à faire. Les élèves écoutent.		Comprendre des consignes
	14	1 min	Travail individuel des élèves pour répondre à la question 3 de l'exercice	Représenter une molécule dont la composition est donnée à partir des différents symboles proposés pour le carbone et l'oxygène	Choisir des symboles pour coder la formule d'une molécule dont la composition est donnée
	15	1min 58s	Correction au tableau de la question 3 de l'exercice par des élèves volontaires	Proposer plusieurs représentations.	Savoir qu'il y a plusieurs possibilités pour représenter la formule chimique d'une molécule.
	16	1min 33s	Analyse critique des représentations proposées par questions orales successives posées aux élèves	Donner son avis à propos des différentes représentations	Comparer des systèmes de représentations pour choisir la plus adaptée
	17	44s	Bilan des premières questions et introduction de la suite de l'exercice par l'enseignant. Les élèves écoutent		Savoir qu'il y a des représentations plus ou moins adaptées
	19	1min 14s	Lecture par un élève de la suite de l'exercice. Analyse du texte par questions orales successives posées aux élèves.	Expliquer l'expression « proportions chimiques »	Comprendre un texte
	20	1min 28s	Suite de la lecture par un élève. Analyse du texte par questions orales successives posées aux élèves.	Les atomes sont représentés par des lettres.	Comprendre les consignes
	21	**57s**	**Travail individuel des élèves pour répondre à la suite de l'exercice (tâche complexe)**	**Écrire la formule chimique du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone en retrouvant les symboles des atomes de carbone et d'oxygène**	**Trouver les symboles à associer aux atomes et proposer une représentation de la formule chimique d'une molécule à partir de sa composition**
	22	24s	Aide apportée aux élèves par questions orales successives posées aux élèves pour résoudre l'exercice	Symbole du carbone et symbole de l'oxygène	Connaître les symboles des atomes
	23	58s	Travail individuel des élèves pour répondre à la suite de l'exercice	Représenter la formule chimique du monoxyde de carbone et du dioxyde de carbone avec le bon nombre d'atomes	Ecrire une formule chimique à partir des symboles des atomes avec les bonnes proportions

	24	4min 22s	Correction au tableau de la fin de l'exercice par des élèves volontaires et par questions orales successives posées aux élèves.	Représenter la formule du dioxyde de carbone avec des lettres puis avec des lettres et des chiffres	Savoir qu'il y a plusieurs façons d'écrire une formule chimique et comprendre l'intérêt des chiffres.
	25	2min 21s	Institutionnalisation de l'enseignant par oral. Les élèves écoutent.		Savoir qu'il y a eu plusieurs représentations avant celle de Berzelius et connaître la syntaxe utilisée de nos jours
2	26, 28 et 32	1min 25s	Étude d'exemples par questions orales successives posées aux élèves	Retrouver les noms et le nombre des atomes dans monoxyde de carbone et dioxyde de carbone	Décoder un nom chimique pour trouver la composition chimique et coder une composition chimique en une formule chimique
	27	43s	Digression de l'enseignant pour préparer la prochaine séance par questions orales successives posées aux élèves.	Associer la bille rouge à l'atome d'oxygène et la bille noire à l'atome de carbone	Connaître les couleurs des billes associées aux atomes dans les modèles moléculaires
	30	2min 47s	Étude d'un exemple par questions orales successives posées aux élèves	Donner le nom et le nombre d'atomes dans la molécule d'eau à partir de la formule	Décoder une formule chimique en donnant la composition de la molécule.
	31	2min 28s	Copie des élèves dans leur cahier de l'exemple écrit au tableau par l'enseignant		

Comme dans la première séance, Mathieu propose une seule tâche que nous pouvons considérer comme complexe. Dans l'épisode 21 et à partir du texte distribué aux élèves à propos des symboles de Berzelius (Annexe 25.2), les élèves doivent écrire les formules chimiques de l'oxyde de carbone et du dioxyde de carbone. Mathieu indique toutefois aux élèves la composition des deux molécules. Ceux-ci doivent alors associer à carbone le symbole C et à oxygène le symbole O puis associer les symboles dans les bonnes proportions pour aboutir aux deux formules. À la différence de la séance « ordinaire » où Mathieu décompose immédiatement la tâche complexe, il laisse les élèves un peu chercher mais il intervient toutefois au bout d'une minute pour donner aux élèves la première étape du travail : les symboles des deux atomes nécessaires pour pouvoir répondre (Annexe 23 – Épisode 22).

En comparant la durée et le nombre de tâches prescrites (Tableau 22) et les objectifs des tâches prescrites (Tableau 23), les deux séances sont très proches. La seule différence notable apparaît dans la diversité des tâches proposées au cours de la séance avec les textes historiques (Tableau 22).

Tableau 22 Comparaison du nombre et de la durée des tâches prescrites

	Séance « ordinaire »	Séance à partir des textes historiques
Nombre de tâches	29	27
Nombre de tâches distinctes	17	25
Durée moyenne des tâches	1min 32s	2min 10s
Nombre de tâches complexes	1 (durée : 0s)	1 (durée : 1min)

Nous observons quelques changements au niveau des objectifs (Tableau 23). Mathieu demande un peu plus de travail de codage et de décodage et un peu moins de tâches en lien avec les modèles moléculaires dans sa deuxième séance. Il se focalise un peu moins sur les objectifs de connaissances au profit d'objectifs de compréhension (textes et consignes).

Tableau 23 Comparaison des objectifs des tâches prescrites

Fréquence pour chaque séance Objectifs de la tâche	Séance « ordinaire »	Séance à partir des textes historiques
Coder	3	4
Décoder	3	6
En lien avec les modèles moléculaires	5	2
Savoir - Connaître	10	6
Comprendre (textes – consignes)	0	5
Autres	3	4
Aucun objectif	3	1

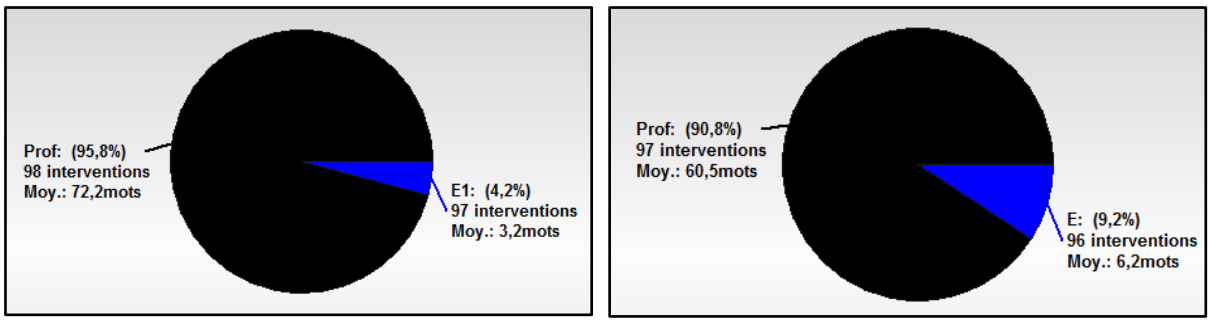
Nous allons vérifier dans le paragraphe suivant que les élèves participent un petit peu plus dans la deuxième séance.

1.2.2 Comparaison de l'organisation du travail : qui, comment et quand ?

Nous comparons pour les deux séances le temps de parole de l'enseignant ou des élèves et la répartition dans les cinq catégories retenues dans la thématique « organisation du travail » (pour mémoire : professeur seul, professeur – élèves, questions élèves, travail individuel et transition).

Nous observons (Graphique 28) que, même si la prise de parole des élèves augmente légèrement dans la deuxième séance, le profil des deux séances pour les interventions de Mathieu et des élèves est à nouveau assez proche.

Séance « ordinaire » Séance à partir des textes historiques

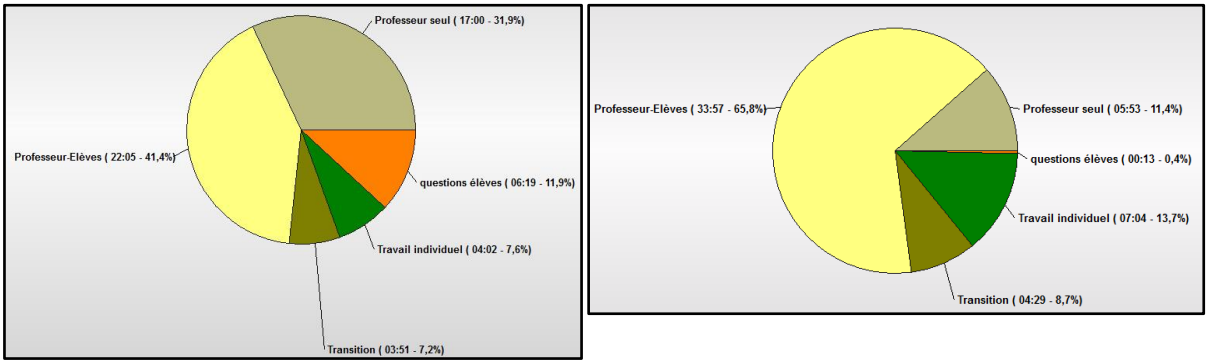


Graphique 28 Comparaison de la répartition en pourcentage des interventions en fonction du nombre de mots prononcés

Nous constations (Graphique 29) que Mathieu intervient moins souvent seul dans la deuxième séance (31,9% dans la séance « ordinaire » et 11,4% dans la séance à partir des textes historiques) au profit d'une augmentation de l'interaction professeur – élèves (65,8 % dans la deuxième séance contre 41,4% dans la première). Les élèves posent moins de questions dans

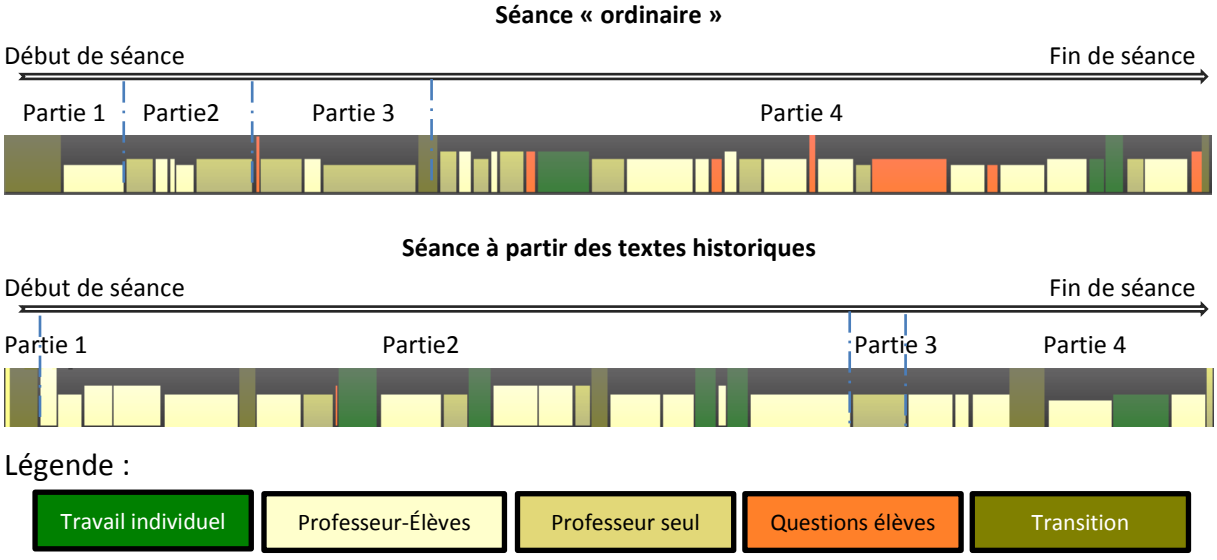
la deuxième séance (Graphique 29) mais ils sont en fait plus sollicités par Mathieu, les phases de travail individuel étant en augmentation (Graphique 29) ainsi que les phases « Professeurs-Élèves » (Graphique 29). Dans la séance conçue à partir des textes historiques, les élèves sont invités à aller proposer leurs solutions au tableau, ce qui n'a jamais été le cas dans la première séance. Les tâches de « compréhension » des textes et des consignes que nous avons observées dans la deuxième séance (Tableau 23) permettent de préparer les phases de travail individuel.

Séance « ordinaire » Séance conçue à partir des textes historiques



Graphique 29 Comparaison de la répartition des différents types d'organisation du travail en durée et en pourcentage

Chronologiquement (Graphique 30), on observe un début de séance « ordinaire » avec essentiellement des interventions de Mathieu seul, pour présenter aux élèves les connaissances à apprendre, alors que celles-ci sont réparties tout au long de la deuxième séance entre consignes avant les parties de travail individuel et bilan des connaissances à acquérir.



Graphique 30 Comparaison de l'analyse chronologique des différentes phases d'organisation du travail (séance ordinaire et séances à partir des textes historiques)

1.2.3 Comparaison de l'étayage

Le discours de Mathieu reste bienveillant vis-à-vis des élèves. Comme pour la première séance, il illustre son cours à partir d'exemples de la vie courante en complément des textes historiques (Photo 9). Il propose notamment deux publicités faisant apparaître des formules chimiques.

Photo 9 Extraits du tableau : publicité de produits courants avec des formules chimiques (séance à partir des textes historiques)

Mathieu conserve le diaporama de la séance 1, présentant le lien entre le nom et la formule chimique en jouant toujours sur les couleurs (Photo 10).

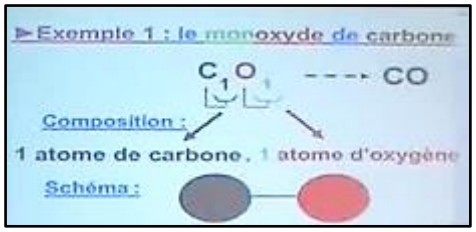


Photo 10 Extrait du tableau : lien entre le nom et la formule chimique (séance à partir des textes historiques)

À la différence de la première séance, il laisse aux élèves plus de liberté, avec la possibilité de présenter au tableau toutes leurs réponses pour l'écriture des formules chimiques, notamment à partir des lettres.

> *[>P]: par rapport à l'an dernier, j'ai supprimé le côté très rigoureux où il fallait absolument C, absolument O. Là plus de liberté dans la façon de noter leur formule chimique. Surtout ça. Leur laisser plus de liberté sur la façon de noter leur formule chimique. (Entretien3 – Lignes 116-118 – Annexe 24)*

Au cours de la séance « ordinaire », les élèves n'ont pas eu l'occasion de proposer leur propre représentation des formules chimiques. Nous constatons dans la deuxième séance que, spontanément, ils sont capables de proposer quatre représentations pour la formule du dioxyde de carbone (Photo 11).

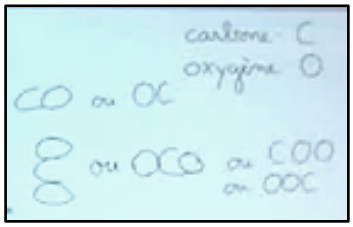


Photo 11 Extrait du tableau : proposition des élèves à partir des lettres pour l'écriture des formules chimiques de l'oxyde de carbone et du dioxyde de carbone

Mathieu peut ainsi expliciter les choix de représentation faits par les chimistes en montrant l'intérêt d'utiliser des chiffres dans la formule. Un élève va d'ailleurs proposer spontanément les chiffres pour simplifier l'écriture (Épisode 24 – Annexe 23).

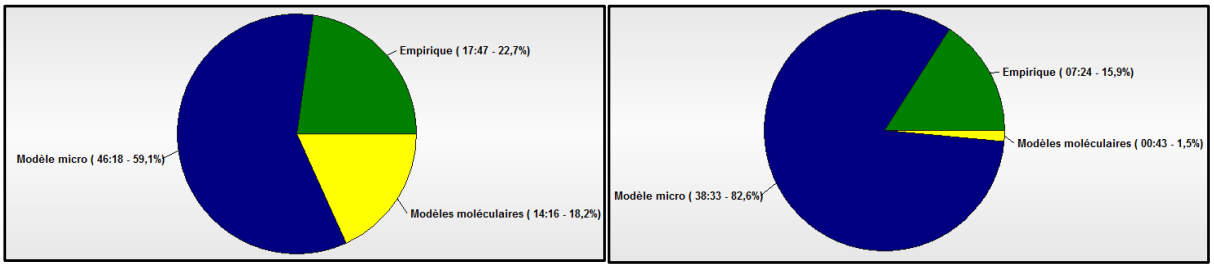
1.2.4 Comparaison de l'utilisation des registres de la chimie

Nous avons comparé à quel niveau, microscopique ou macroscopique, se situent les situations proposées par Mathieu puis si le langage utilisé nous semble « explicite », « implicite » ou « non-défini ».

1.2.4.1 Niveau des situations proposées

Mathieu utilise très peu les modèles moléculaires dans la nouvelle séance par rapport à la séance « ordinaire » (Graphique 31). On peut supposer que les textes historiques lui servent de support pour illustrer la séance et qu'il a donc moins besoin des modèles moléculaires, d'autant plus que les représentations de Dalton sont assez proches.

Séance « ordinaire » | Séance à partir des textes historiques

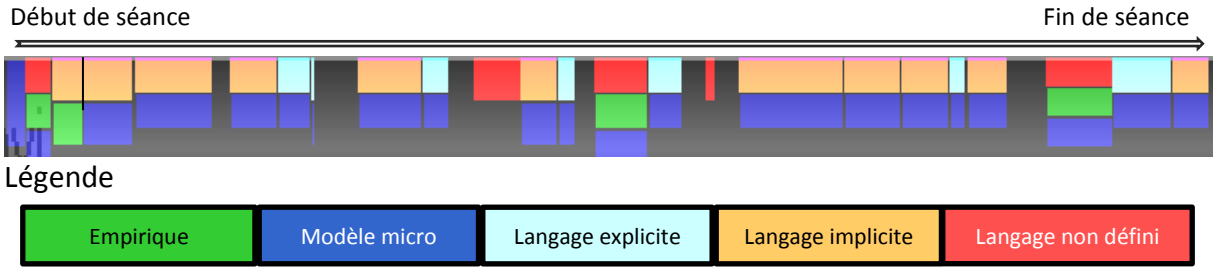


Graphique 31 Comparaison de la répartition en durée et en pourcentage des niveaux de savoir travaillés au cours de la séance hors langage symbolique

Le discours de Mathieu se situe encore plus au niveau microscopique (registre « Modèle micro » Graphique 31) dans la nouvelle séance. Il nous confirme au cours de l'entretien (Lignes 109-110 – Annexe 24) que c'est bien à ce niveau qu'il souhaitait situer les deux séances que nous avons filmées. Les moments correspondant au niveau macroscopique (registre « Empirique » Graphique 31) sont essentiellement ceux où Mathieu présente les exemples publicitaires.

1.2.4.2 Niveau du langage symbolique utilisé : « explicite », « implicite » ou « non défini »

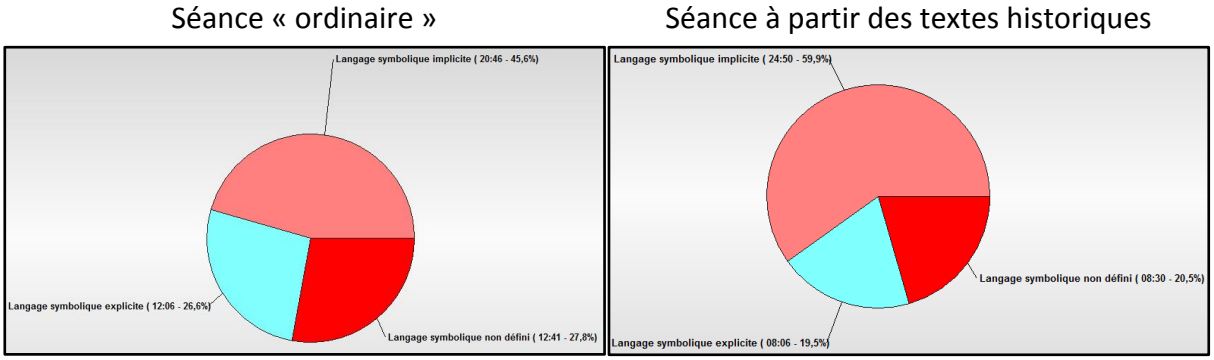
Comme pour les séances ordinaires, nous avons étudié comment se situent les critères de langage par rapport au registre empirique ou au registre des modèles microscopiques (Graphique 32). Comme pour les séances « ordinaires », nous constatons à nouveau que le niveau de langage est majoritairement « non défini » quand les épisodes se situent à la fois aux niveaux macroscopiques et microscopiques.



Graphique 32 Analyse chronologique des niveaux de langage utilisés en lien avec les registres de la chimie (séances à partir des textes historiques)

Nous observons deux passages (épisodes 15 et 22 – Annexe 23) où Mathieu utilise des noms et des symboles sans aucune référence au registre empirique ou au modèle microscopique. Il s'agit des épisodes où il fait travailler les élèves à partir des différentes propositions de symboles proposées par les chimistes pour leur permettre de choisir une représentation. Dans ces deux épisodes le signifiant est étudié seul, sans lien avec le signifié.

Le nombre d'épisodes en lien avec le registre empirique diminuant dans la nouvelle séance, avec quatre épisodes (Graphique 32) au lieu de treize dans la séance « ordinaire », cela entraîne la diminution de l'utilisation d'un langage symbolique « non défini » (Graphique 33). Mais dans la séance à partir des textes historiques, le niveau de langage reste très majoritairement « implicite », le langage « explicite » diminuant encore (Graphique 33).



Graphique 33 Comparaison de la répartition en durée et en pourcentage des niveaux de langage utilisés

Nous constatons à nouveau au cours de l'entretien 3 (Annexe 24) que Mathieu n'a pas nécessairement conscience de cette difficulté pour les élèves.

> *[>I]: on observe une difficulté des élèves pour associer aux formules des critères macroscopiques et dans les livres le glissement du microscopique au macroscopique se fait de façon implicite au moment des formules.*
>
> *[>P]: et c'est quelque chose sur lequel il faudrait plus insister ?*
>
> *[>I]: sans doute. Justement le gaz carbonique. Gaz c'est un état de la matière*
>
> *[>P]: oui*
>
> *[>I]: donc on est nécessairement au niveau macroscopique. Alors que quand on passe à dioxyde de carbone, là ça peut aussi bien vouloir dire l'espèce que la molécule. Alors qu'avec le gaz carbonique, on sait que c'est du niveau macro.*
>
> *[>P]: c'est donc à nous de le préciser ?*
>
> *[>I]: ah oui, les élèves ne peuvent pas savoir que cela peut vouloir dire les deux. Ils ne peuvent pas deviner. Il faut les aider à ce niveau.*
>
> *[>P]: OK d'accord. Chose que je ne fais pas.*
>
> *(Entretien 3 – Lignes 170-182 – Annexe 24)*

1.2.5 Comparaison des raisons données quant à la constitution des formules chimiques.

Comme dans la première séance, Mathieu justifie toujours les formules chimiques par les noms ou par les modèles moléculaires.

> *[>P]: […] Pour le schéma, on verra quand on construira la molécule que vous aurez un atome de carbone avec deux atomes d'oxygène. Ça on le reverra quand on commencera les modèles moléculaires la semaine prochaine. (Séance 3 – Épisode 29 – Annexe 23)*

Au cours de l'entretien, Mathieu explique qu'avec les modèles moléculaires les élèves « *se rendent compte*» du nombre d'atomes qu'ils peuvent mettre dans une molécule (Entretien 3 – Ligne 47 – Annexe 24). Il parle même de contrainte imposée par le modèle moléculaire.

> *[>P]: ben par exemple quand je leur demande de construire la molécule de méthane, il y en a certains qui dessinent un carbone, un hydrogène, un hydrogène, un hydrogène, un hydrogène. Avec le modèle par exemple de Dalton, au départ je ne leur demande pas de faire une construction rigoureuse, comme tout à l'heure lorsqu'elle a fait son choix*

esthétique. Voilà pour l'instant je garde sa représentation et après en passant aux modèles moléculaires, ils se rendent compte qu'il y a des contraintes pour la constitution.

[>I]: oui et comment tu les expliques ces contraintes ?

[>P]: après je leur explique tout simplement que pour l'hydrogène il peut se lier qu'une seule fois. Je m'arrête juste là.

[>I]: et tu parles de liaison

[>P]: oui

(Entretien 3 – Lignes 51-61 – Annexe 24)

Comme nous l'avons déjà signalé dans la partie 2, et ce que confirme Mathieu au cours de ces échanges, les enseignants se sentent obligés de présenter les liaisons chimiques aux élèves et de traiter implicitement la valence des atomes. Mathieu indique même que le modèle moléculaire représente pour lui la réalité de la molécule.

[>P]: parce que je sais comme avec les modèles que je leur donne avec les tiges, j'ai les deux représentations. J'ai même une représentation coudée. Ils dessinent ça et j'accepte. Après, ce que j'aime bien aussi c'est qu'ils soient intéressés quand ils construisent les molécules comme dioxyde de soufre ou l'eau avec la tête de Mickey, là tout de suite ils accrochent aussi. C'est pour ça que le côté réaliste, moi ça m'intéresse. Quand on peut les accrocher avec quelque chose d'un petit peu marrant c'est intéressant. Voilà pourquoi je respecte la réalité. (Entretien 3 – Lignes 81-86 – Annexe 24)

Mathieu utilise les modèles éclatés car cela semble plaire aux élèves et qu'il y a un « *côté ludique* » (Entretien3 – Ligne 102 – Annexe 24).

Pendant la séance, Mathieu peut aussi laisser penser aux élèves que ce sont les chimistes qui créent les molécules, ce que nous avions déjà constaté dans la première séance.

[>P]: c'est celui dont on a lu le texte précédemment Dalton qui lui propose ça (l'enseignant montre au tableau). Ça, c'est sa façon de représenter le gaz carbonique, toujours avec la même composition, un atome de carbone et deux atomes d'oxygène, il propose ça. Est-ce que quelqu'un peut m'expliquer comment il a procédé tout simplement pour créer cette molécule de gaz carbonique à partir de ces modèles d'atomes ? Oui Anaël

[>E]: ben il a mis euh un atome de carbone puis autour deux atomes d'oxygène

[>P]: d'accord il a pris son atome de carbone et il a associé ça avec deux atomes d'oxygène.

(Séance 3 – Épisode 6 – Annexe 23)

Dans cet échange, Mathieu parle de la formule créée par Dalton et non de la molécule. Mais pour les élèves la confusion est possible, ce qui se confirme dans l'épisode 14 où un élève demande à l'enseignant s'il peut créer sa propre molécule pour utiliser les symboles.

> *[>E]: on peut créer la nôtre (élève dit quelque chose) ?*
>
> *[>P]: comment ?*
>
> *[>E]: on peut créer notre propre molécule ?*
>
> *(Séance 3 – Épisode 14 – Annexe 23)*

Mathieu indique pendant l'entretien qu'il n'avait pas perçu que l'objectif essentiel du scénario est de justifier la composition des formules chimiques aux élèves.

> *[>I]: parce qu'est-ce qui justifie qu'une molécule est composée de deux atomes ?*
>
> *[>P]: ça c'est du domaine de l'empirique. C'est d'après les résultats expérimentaux.*
>
> *[>I]: mais là on le donne aux élèves et on le justifie pas*
>
> *[>P]: oui je le donne sans le justifier. Donc toi après le travail c'est ça, c'est de trouver la justification.*
>
> *(Entretien 3 – Lignes 148-151 – Annexe 24)*

Les élèves ne lui posant jamais la question, cela ne semble être un objectif prioritaire.

1.3 Discussion et analyse des besoins pour une formation

1.3.1 Ce qui nous semble être stabilisé

Même si le contenu de la séance a évolué avec l'utilisation des textes historiques, l'organisation du travail proposé par Mathieu reste assez proche de celle que nous avions pu observer dans la séance « ordinaire ». Les tâches restent simples et s'enchaînent au même rythme qu'à la première séance. Le cours est encore sur le mode d'un dialogue entre le professeur et les élèves et ces derniers prennent aussi peu la parole. Mathieu propose à nouveau les exemples extraits de publicité et utilise le même diaporama pour faire la synthèse de la séance. Nous avions indiqué en première partie l'hypothèse faite par Robert (2007) selon laquelle il est plus difficile pour un enseignant expérimenté de changer sa gestion de classe plutôt que son contenu. La comparaison des deux séances observées semble aller dans le sens de cette hypothèse. Quant à l'utilisation des registres de la chimie, Mathieu reste

majoritairement dans le registre microscopique avec un langage majoritairement implicite ou non-défini. La justification des formules se fait à partir des noms ou des modèles moléculaires.

1.3.2 Ce qui nous semble en évolution

L'utilisation des textes historiques permet une plus grande variété d'objectifs dans les tâches prescrites. Le nouveau contenu amène Mathieu à laisser plus de liberté aux élèves pour les écritures de formules. Ceux-ci peuvent alors être plus sollicités qu'à la première séance pour proposer leurs idées de représentation. Nous constatons d'ailleurs qu'ils ne manquent pas d'imagination, notamment avec les symboles d'Hassenfratz et Adet ainsi que ceux de Berzelius. Le nouveau contenu permet de montrer que les scientifiques ont hésité entre plusieurs types de symboles et qu'il y a eu évolution. C'est pour Mathieu un nouvel objectif de sa séance.

1.3.3 Ce qui nous semble nécessaire en formation

Mathieu confirme dans l'entretien qu'il n'a pas perçu le rôle du langage symbolique en tant que méta-niveau et que l'enseignant doit être attentif à définir explicitement les niveaux, macroscopique ou microscopique, au moment de l'utilisation des noms et des formules. Il hésite lui-même pour le niveau à associer à la notion de corps pur (Entretien3 – Ligne 252 - Annexe 24).

L'utilisation des modèles pour justifier les formules chimiques semble être à ce stade suffisante pour Mathieu qui indique n'avoir jamais eu de questions d'élèves à ce propos. Il n'avait pas perçu que la deuxième partie des textes historiques, à partir des lois de Gay-Lussac, devait permettre d'arriver à la formule chimique.

2 Utilisation des dialogues par un enseignant

Un enseignant, que nous nommons Benjamin, a accepté de tester les dialogues dans sa classe comprenant 27 élèves. Nous avons pu le filmer en novembre 2016 et retranscrire sa première séance. Benjamin exerce dans un collège sensible de Paris depuis plus de trente ans. Nous l'avons rencontré trois fois, deux fois pour lui présenter les dialogues et lui expliquer les objectifs de ce travail, et une fois après la première séance pour faire un bilan. Benjamin s'étant très peu exprimé pendant ces entretiens, nous ne les avons pas retranscrits mais nous

tenons compte dans l'analyse des quelques propos qu'il a pu tenir. Il se décrit notamment comme un enseignant plutôt « *dirigiste* » car il craint sinon de ne pas pouvoir terminer les programmes, mais il trouve intéressant de travailler à partir de dialogues historiques. Il nous indique qu'il n'a jamais suivi de formation de didactique mais qu'il utilise l'histoire des sciences chaque fois qu'il le peut pour en montrer l'évolution. Benjamin va utiliser les ressources proposées pour construire deux séances (Annexes 26 et 27). Nous avons pu filmer la première et la retranscrire (Annexe 28). Nous présentons dans ce paragraphe les documents élaborés par Benjamin à partir des dialogues, puis la séance filmée. Toujours à partir de la même méthodologie, nous présentons succinctement l'organisation du travail de Benjamin puis nous analysons la répartition des registres de la chimie utilisés au cours de la séance et le niveau du langage utilisé (explicite, implicite ou non-défini). Les interventions des élèves au cours de la séance et leurs réponses aux questions posées nous permettent de repérer plusieurs difficultés dans les dialogues et les propositions de Benjamin.

2.1 Les documents élaborés par Benjamin

Au cours des entretiens, nous indiquons à Benjamin qu'il peut utiliser les dialogues et les scénarios en l'état ou les faire évoluer à sa convenance. Il élabore deux séances reprenant une partie des dialogues.

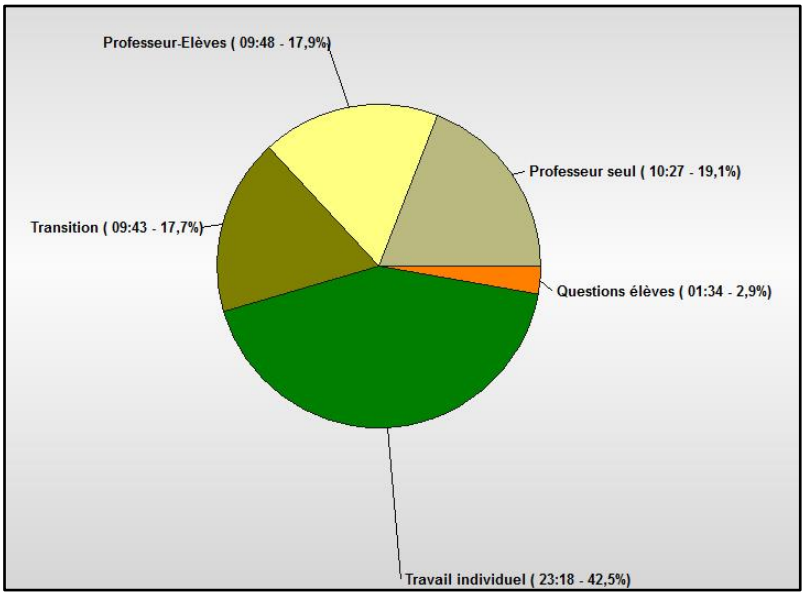
- La première séance (Annexe 26) doit lui permettre d'introduire la notion de formule chimique. Il utilise tous les textes du dialogue 1 (Annexe 22.1). Cette séance vient dans sa progression juste après l'introduction, à partir de la composition de l'air, du concept de molécule comme particule élémentaire de la matière, et après la définition de la molécule comme une combinaison d'atomes. Il n'a pas encore traité les transformations chimiques. Il n'a pas encore non plus présenté aux élèves les symboles des atomes. Il doit donc faire un ajout dans les dialogues pour introduire quelques symboles. Nous constatons pendant la séance que les élèves connaissent déjà au moins ceux du carbone, de l'hydrogène et de l'oxygène. Au cours des entretiens, Benjamin semble également inquiet des premières questions à propos des corps simples et des corps composés. Il ne traite en effet jamais cet aspect avec ses classes. La séance proposée par Benjamin semble suivre les objectifs que nous lui avions présentés sauf peut-être pour les deux dernières questions. À l'avant-dernière question (Annexe 26), il demande aux élèves : « quelle formule chimique retenir pour

présenter la molécule d'eau ? ». Notre intention dans le dialogue 1 était plutôt de faire remarquer aux élèves les formules choisies par les chimistes à l'époque et non de conclure sur la « bonne » formule. À la dernière question (Annexe 26), il demande aux élèves : « *peut-on retenir qu'il y a une relation entre les volumes des espèces chimiques et leurs formules traduisant une réaction chimique ?* ». La question, telle qu'elle est posée, nous fait craindre un contre-sens. Nous avons en effet l'impression que Benjamin souhaite faire faire aux élèves le lien entre les volumes et la formule (deux volumes de gaz hydrogène soit deux hydrogènes dans la formule) alors que ceux-ci sont liés au nombre stœchiométrique de l'équation chimique.

- Pour la deuxième séance (Annexe 27), Benjamin propose un document de cinq pages dont les trois premières sont des révisions des séances précédentes. L'objectif du deuxième dialogue est de proposer aux élèves les raisons qui ont permis aux chimistes du XIXe siècle d'élaborer les formules chimiques. Il nous indique qu'il n'a jamais pensé à justifier les formules chimiques. Il les donne aux élèves comme un fait qui ne se discute pas et ils doivent les apprendre par cœur. Quand nous lui présentons les résultats du questionnaire élève à propos de la proportionnalité des formules, il indique n'avoir jamais fait travailler les élèves sur ce point. Il n'est d'ailleurs pas certain de la méthode qui consiste à montrer des molécules qui n'existent pas, telles que H_4O_2. Nous constatons quelques incohérences et une mécompréhension des dialogues dans la conception de sa deuxième séance. Dans la partie II (Annexe 27), Benjamin demande aux élèves, en bas de page 1, la constitution des molécules d'eau, de dihydrogène et de dioxygène. Or ce n'est que plus tard dans la séance qu'il utilise les dialogues qui doivent permettre la recherche de ces formules. De façon similaire, il demande aux élèves de donner les équations de réaction en partie IV en haut de la page 3 (Annexe 27). Il propose ensuite le début de la première partie des dialogues 2 (Annexe 22.2) mais en s'arrêtant à la synthèse du gaz chlorhydrique. Notamment, il ne propose pas la synthèse de l'eau et le paradoxe de l'interprétation de Simplicio de ces deux réactions en termes de volume de gaz. Nous nous rendons en fait compte, au cours d'un dernier entretien, qu'il pense que Gay-Lussac s'est trompé dans les lois volumétriques à propos de l'eau, raison pour laquelle il n'est pas allé plus loin dans l'utilisation des dialogues. Nous n'avons donc pas retranscrit cette deuxième séance.

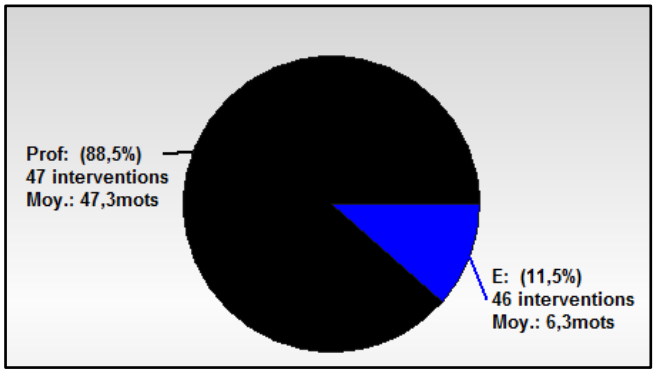
2.2 L'organisation du travail pendant la première séance

Pendant pratiquement la moitié de la séance (Graphique 34), les élèves vont répondre individuellement aux questions posées dans le document (Annexe 26). Benjamin a plusieurs fois indiqué au cours des entretiens son inquiétude par rapport à sa progression et au fait de terminer le programme, d'où sa crainte de lancer des débats. Il est donc, comme il l'a souligné lui-même, directif pendant les phases de recherche et celles-ci restent individuelles, avec peu d'échanges entre les élèves et Benjamin. Cela se confirme par le nombre d'interventions de Benjamin (47 interventions - Graphique 35) et des élèves (46 interventions - Graphique 35). Elles sont deux fois moins importantes que dans les séances conduites par Mathieu (97 et 98 interventions Graphique 28).



Graphique 34 Répartition des différents types d'organisation du travail en durée et en pourcentage

Malgré l'utilisation des dialogues qui pourrait permettre des échanges entre les élèves, Benjamin conserve majoritairement la parole (Graphique 35).

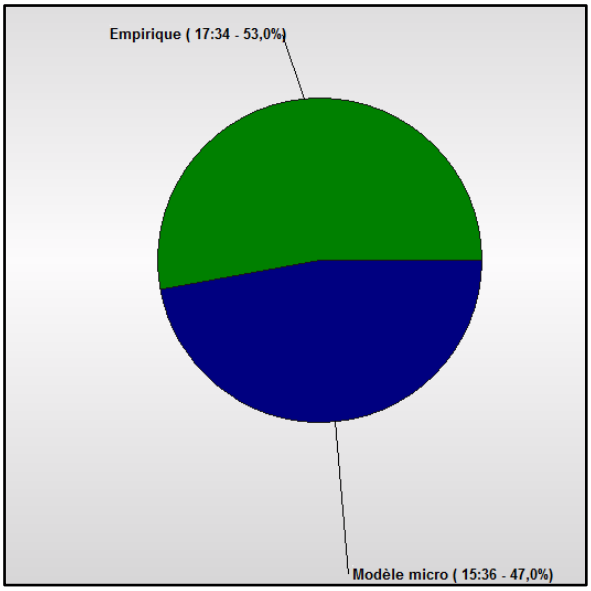


Graphique 35 Comparaison de la répartition en pourcentage des interventions en fonction du nombre de mots prononcés

L'analyse des registres de la chimie et des niveaux de langage utilisés par Benjamin ne porte donc que sur un peu moins de la moitié de la séance.

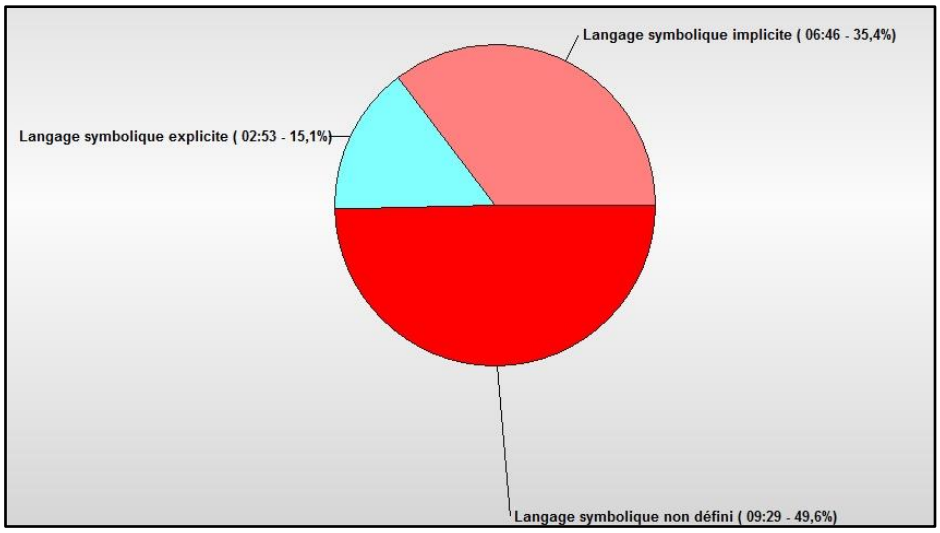
2.3 Registres de la chimie et niveau de langage

Les dialogues faisant référence aux transformations chimiques étudiées par Lavoisier et Gay-Lussac, les registres utilisés se répartissent de façon équivalente entre l'empirique et les modèles microscopiques (Graphique 36).



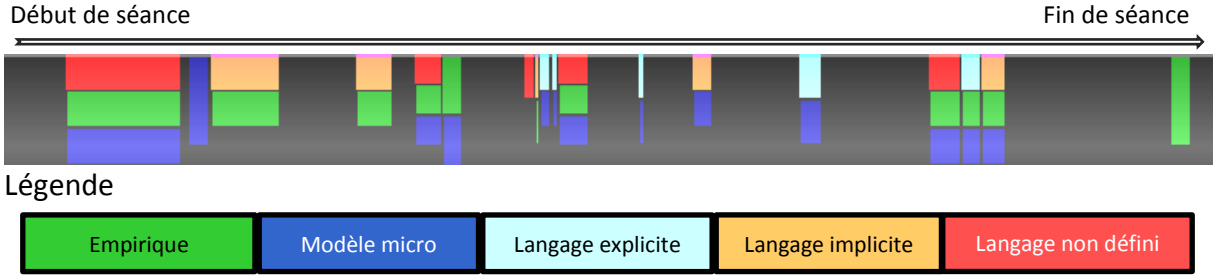
Graphique 36 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de savoir travaillés au cours de la séance hors langage symbolique

Mais, comme pour les séances de Mathieu (Graphique 32), nous constatons l'utilisation d'un langage symbolique non explicite (Graphique 37).



Graphique 37 Répartition en durée et en pourcentage des niveaux de langage utilisés

L'analyse chronologique (Graphique 38) permet de constater qu'en dehors d'un épisode, toutes les phases où le langage est non défini correspondent aux utilisations simultanées du registre empirique et de celui des modèles.



Graphique 38 Analyse chronologique des niveaux de langage utilisés en lien avec les registres de la chimie

Dans l'épisode 12 (Annexe 28) catégorisé en « Langage non défini », Benjamin relie le langage symbolique aux éléments.

> *[>P]: nous allons apprendre les symboles des éléments chimiques. Nous allons donc les retenir. Le symbole du chlore, ce n'est pas C mais Cl. Il faut donc l'apprendre par cœur. (Séance 4 - Épisode 12- Annexe 28)*

Nous ne pouvons pas savoir à quelle définition du mot « élément » se réfère Benjamin. En effet, ce terme est d'abord utilisé dans les dialogues par Lavoisier mais dans un sens macroscopique. Il est repris par Benjamin au sens d'Aristote en début de séance (Séance 4 - Épisode 2- Annexe 28). Il est utilisé par les élèves *a priori* dans un sens macroscopique.

> *[>E]: Parce qu'il avait réussi à décomposer l'eau et qui n'est donc pas un élément. (Séance4 - Épisode 2- Annexe 28)*

Puis vient une utilisation microscopique.

> *[>P]: nous avons bien vu que les lettres qui sont des symboles désignent quoi ? C'est la représentation de chaque élément, chaque type d'atomes. (Séance 4 - Épisode 18- Annexe 28)*

Au cours de l'entretien après la séance, Benjamin nous indique qu'il n'a jamais fait attention au niveau du langage utilisé. Il ne s'est même jamais posé la question. Nous constatons dans certains de ses propos un manque de rigueur sur ce point.

Nous pouvons tirer la conclusion suivante, la molécule d'eau est une combinaison binaire donc de deux (inaudible), deux éléments, deux espèces. Donc la molécule d'eau est une combinaison binaire d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène.

(Séance 4 - Épisode 22- Annexe 28)

Benjamin associe aux corps simples et composés, notion macroscopique, une définition en lien avec le niveau microscopique sans prendre de précaution langagière pour bien expliciter les deux niveaux.

[>P]: un corps simple est constitué

[>E]: d'une seule sorte d'atome

[>P]: d'une seule sorte d'atome

[>E]: et un corps composé de plusieurs sortes d'atome

[>P]: et un corps composé de plusieurs sortes d'atome. Est-ce que c'est clair ? Question suivante, chacun note avant cette réponse sur la feuille.

(Séance 4 - Épisode 10- Annexe 28)

2.4 Réactions et réponses des élèves

2.4.1 Corps simple/ corps composé

Nous avons pu nous procurer le document (Annexe 26) complété par les élèves au cours de la séance.

Sur les vingt-sept copies récupérées, nous constatons que plus de la moitié des élèves n'ont pas su classer correctement, en corps simple ou corps composé, les espèces chimiques proposées par Benjamin : le dioxygène, le diazote, le dioxyde de carbone :

- douze élèves ont répondu correctement ;
- huit élèves ne répondent pas ou réécrivent qu'un corps composé est formé d'un assemblage d'atomes ou de plusieurs atomes ;
- sept élèves répondent que N_2, O_2 et CO_2 sont des corps composés. Certains justifient leur réponse en indiquant que leur formule est constituée de plusieurs atomes. Deux élèves vont même proposer des exemples de corps simples constitués d'un seul atome.

Tous les élèves ont noté la définition donnée par Benjamin dans l'épisode 10 (Annexe 28) mais la moitié des élèves n'ont pas interprété correctement le terme « sorte » dans « plusieurs sortes d'atomes » (Séance 4 - Épisode 10- Annexe 28). Un quart des élèves écrivent explicitement que O et O ou N et N, etc. correspondent à deux sortes d'atomes au même titre que C et O. Benjamin ne semble pourtant pas percevoir de difficultés dans cette question quand un élève lui demande comment faire.

> *[>E]: Comment on peut savoir ?*
>
> *[>P]: ben on relit.*
>
> *(Séance 4 - Épisode 17- Annexe 28)*

Les difficultés rencontrées par certains de ces élèves pourraient s'expliquer par le fait que les atomes sont introduits en quatrième sans aucune caractéristique permettant de les distinguer autre que le symbole. À l'inverse, nous n'avons trouvé dans aucun ouvrage scolaire le fait que deux atomes représentés par le même symbole sont parfaitement identiques et indistinguables. Nous n'avons jamais entendu Aude, Mathieu ou Benjamin l'indiquer explicitement à leurs élèves.

2.4.2 Des formules déjà connues

Tous les élèves sauf deux ont répondu spontanément que la formule de l'eau est H_2O. Les élèves ont déjà vu la formule du dioxyde de carbone et celle de l'eau, soit dans la vie de tous les jours soit dans les cours de Sciences de la Vie et de la Terre en cinquième. Nous n'avons sans doute pas suffisamment tenu compte de cela dans l'élaboration des scénarios. Les élèves ont déjà leur propre interprétation à propos de la signification des formules comme l'indique l'échange ci-dessous.

> *[>P]: ou est-ce que vous l'avez appris ?*
>
> *[>E]: l'an dernier en cinquième, en sciences*
>
> *[>P]: en SVT. Donc le prof de SVT vous a dit que le dioxyde de carbone, c'est le CO2. C'est ça ?*
>
> *[>E]: oui (ensemble)*
>
> *[>P]: Si je dis CO2, c'est la même chose que dioxyde de carbone.*
>
> *[>E]: oui (ensemble)*

> *[>E]: c'est juste l'abréviation*
>
> *(Séance4 - Épisode 5- Annexe 28)*

La formule chimique est pour cet élève une abréviation. Il n'est sans doute pas le seul à penser cela et ce n'est peut-être pas la seule interprétation. Il serait sans doute nécessaire, avant de proposer aux élèves de quatrième la critique des formules proposées par les chimistes du XIXe siècle, de leur faire exprimer ce que représentent pour eux celles qu'ils ont déjà rencontrées en dehors de la chimie.

La partie du dialogue, qui aurait dû permettre aux élèves de constater que Berzelius et Dalton ne proposaient pas la même formule, n'a pas été exploitée au cours de la séance. Benjamin a en effet oublié de faire lire le texte de Simplicio, qui présente la formule de l'eau proposée par Dalton, avant de leur poser la question. Seuls deux élèves ont compris les changements de consignes de Benjamin et ont su indiquer que la formule proposée par Dalton est HO.

2.4.3 Difficultés des élèves pour passer du microscopique au macroscopique

Nous avons constaté que Benjamin n'a pas suffisamment pris de précautions entre le niveau macroscopique et le niveau microscopique pour définir un corps composé et un corps simple. Nous avons constaté au paragraphe 2.4.1 que, quand les élèves donnent une justification pour trier les corps simples des corps composés, celle-ci est exclusivement microscopique.

À partir du passage de Salviati ci-dessous, Benjamin demande aux élèves de rappeler le volume de chaque gaz utilisé pour obtenir de l'eau (Annexe 26).

> *Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience, et n'a peut-être pas agi avec assez de précaution en appliquant sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie. Monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène. Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il paraît plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. (Annexe 22.1)*

Seule la moitié des élèves est capable de répondre correctement en indiquant deux volumes de gaz hydrogène et un volume de gaz oxygène. Huit élèves répondent deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène et cinq élèves ne savent pas répondre. Un échange entre

Benjamin et un élève en début de séance montre la difficulté de l'élève à différencier niveaux macroscopique et microscopique.

> *[>P]: il a réussi à décomposer l'eau donc l'eau ne peut pas être un élément. Et qu'est-ce qu'il a obtenu dans la décomposition de l'eau ?*
>
> *[>E]: ben euh trois atomes, dans la molécule d'eau*
>
> *[>P]: alors dans la décomposition de l'eau, qu'est-ce que l'on a obtenu ? L'eau est formée de ?*
>
> *[>E]: d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.*
>
> *(Séance4 - Épisode 2- Annexe 28)*

Il est là aussi sans doute nécessaire d'être encore plus explicite dans les dialogues pour différencier les passages dans le macroscopique de ceux dans le microscopique. Nous pensons qu'il est également nécessaire que les enseignants soient conscients de la difficulté pour les élèves de circuler entre ces deux niveaux et de l'importance de développer le langage symbolique en tant que méta-niveau.

2.4.4 Difficultés de compréhension de la transformation chimique

La transformation chimique est un concept qui est tout juste introduit en classe de quatrième. Nous constatons là aussi des difficultés de compréhension du passage décrivant la décomposition de l'eau. Pour un élève, cela revient à rechercher les gaz qui sont dans l'eau et non les gaz qui sont formés à l'issue de la décomposition de l'eau.

> *[>E]: J'écris les gaz qui sont dans l'eau ?*
>
> *[>P]: Qu'est-ce que tu as compris de cette phrase ?*
>
> *[>E]: les gaz qui sont dans l'eau*
>
> *(Séance4 - Épisode 26- Annexe 28)*

Peut-être faudrait-il plutôt partir de la synthèse de l'eau plutôt que de la décomposition ?

Enfin, nous avons déjà signalé l'ambiguïté de la toute dernière question posée par Benjamin dans son document (Annexe 26).

> *Peut-on retenir qu'il y a une relation entre les volumes des espèces chimiques et leurs formules traduisant une réaction chimique ? (Annexe 26)*

La plupart des élèves se contentent de répondre seulement oui à cette question, sachant qu'elle est vraiment traitée en toute fin de séance. Mais deux élèves font explicitement une réponse indiquant que les deux volumes de gaz hydrogène correspondent au deux atomes d'hydrogène de la formule de l'eau.

> *Oui, il y a une relation car dans certaine formule la quantité est représentée dans certaine formule : CO_2, H_2O, … (Eliot)*
>
> *Oui, car H2 = deux atomes et O = simple (Louanisse)*

Nous n'avons pu échanger sur ce point avec Benjamin. Nous ne savons pas quelles étaient ses intentions exactes dans cette question. La présentation aux élèves des réactions étudiées par Gay-Lussac doit pouvoir susciter de nombreuses interprétations de leur part. Traiter cela correctement avec les élèves nécessiterait d'y consacrer un temps important. Les enseignants sont-ils prêts à cela ?

2.5 Bilan

Après la première séance, Benjamin a trouvé les dialogues accessibles aux élèves et la séance intéressante. Il pense ne pas avoir suffisamment cadré les consignes portant sur les passages historiques, ce qui ne lui a pas permis de faire suffisamment réfléchir les élèves à partir des dialogues. Il considère qu'il faudrait laisser plus de temps aux élèves pour lire le texte et les consignes. Mais il craint alors que cela ne devienne trop long, d'y passer trop de temps et de ne pas pouvoir terminer le programme.

Les dialogues ont été proposés aux élèves dans le cadre d'un enseignement très directif. Les réponses des élèves indiquent que les notions proposées ne sont pas comprises à la fin de la séance. Benjamin n'a pas conscience de leurs difficultés. Il nous indique plusieurs fois au cours de l'entretien que les élèves se trompent car ils ne font pas suffisamment d'efforts.

Les deux entretiens passés avec Benjamin pour lui faire découvrir les scénarios et lui expliquer nos intentions n'ont pas été suffisantes pour lui faire prendre conscience des liens à créer entre langage symbolique, niveau macroscopique et niveau microscopique. Nous remarquons que lors d'une séance incorporant les dialogues, la répartition des notions est beaucoup plus équilibrée entre le registre empirique et le registre des modèles mais par contre l'imprécision du langage semble s'aggraver

Conclusion partie 4

Un de nos objectifs dans l'élaboration des ressources était de proposer des formules chimiques en tant que savoir apodictique. Nous avons décidé de rechercher dans l'enquête historique les raisons qui ont amené au XIXe siècle l'élaboration de la formule de l'eau et de celles des corps simples, le choix de ces formules étant lié aux contraintes institutionnelles. Pour cela, nous avons adapté les espaces de contraintes et de nécessité (Orange, 2000) à la chimie en y introduisant le registre symbolique. En les appliquant aux différents groupes de chimistes du XIXe siècle, nous avons pu constater la nécessité d'utiliser, en plus de ce qui est déjà proposé dans les programmes, les lois volumétriques de Gay-Lussac pour les formules de l'eau et des corps simples dans le registre empirique, et l'atomicité pour les formules des corps simples dans le registre des modèles. Nous avons fait le choix de la controverse Dalton/atomistes – organiciens. Celle-ci nous semble *a priori* accessible aux élèves.

À partir de ces choix, nous avons élaboré deux scénarios, l'un proposant des textes originaux et l'autre des dialogues fictifs entre ces chimistes. Chacun a été testé en classe par un enseignant.

Nous observons que Mathieu a choisi dans le premier scénario ce qui lui permettait de rester au plus près de son organisation de travail habituelle. Benjamin a utilisé de son côté les dialogues mais n'a, semble-t-il, pas changé ses habitudes de travail, se qualifiant lui-même d'enseignant « *dirigiste* ». Ces observations semblent confirmer ce qui a déjà été constaté en mathématiques (Robert, 2003). Les entretiens menés avec les deux enseignants nous indiquent qu'ils n'ont pas conscience des spécificités du langage symbolique de la chimie et des difficultés que peuvent avoir les élèves dans ce registre. Mathieu et Benjamin ne semblent pas avoir perçu dans les scénarios l'importance de la recherche des raisons permettant l'élaboration des formules. La séance de présentation des scénarios que nous avons passée avec chacun d'eux ne semble pas avoir été suffisante pour cela. Nous ne pouvons donc pas savoir, à l'issue de ces deux séances, si les élèves étaient capables de percevoir la controverse et d'extraire des textes historiques ou des dialogues les raisons qui ont amené les formules actuelles. Enfin le temps que nécessiterait la réalisation complète de chacun des scénarios en laissant aux élèves la possibilité d'exploiter complètement les documents historiques semble

problématique à Mathieu et Benjamin. Ils ne voient pas comment ils pourraient terminer leur programme.

Selon nos observations, une formation didactique et épistémologique importante, voire des compléments de formation théorique, seraient nécessaires pour que les enseignants acceptent de passer le temps nécessaire à partir de ces ressources en classe et qu'ils en comprennent toutes les intentions didactiques.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion

Dans ce travail, nous avons souhaité étudier l'enseignement et l'apprentissage des représentations symboliques de la chimie, noms et formules. Faisant l'hypothèse que les enseignants n'ont pas les outils didactiques pour introduire ce langage, nous avons entrepris cette recherche avec l'objectif de proposer des ressources permettant d'introduire en cycle 4 les formules chimiques à partir d'une reconstruction didactique fondée sur l'histoire des sciences (de Hosson, 2011).

Les noms et les formules chimiques ou langage symbolique (Jacob, 2001) constituent un pont entre le niveau macroscopique et le niveau microscopique (Taber, 2013). Le langage symbolique est à l'interface du registre empirique et des registres des modèles. Ces spécificités en font pour nous un méta-niveau (Canac & Kermen, 2016). La complexité de ce registre sémiotique justifie que nous développions des outils d'enseignement spécifiques pour en permettre son apprentissage.

> *Le langage jour un rôle déterminant dans l'acquisition des connaissances. (Weil-Barais, 1994, p. 292)*

L'apprentissage du langage symbolique doit pouvoir jouer un rôle déterminant dans l'acquisition des concepts chimiques. Il doit se faire en dialectique avec les différents concepts issus du registre empirique et de celui des modèles : concepts d'atome, de molécule, d'espèce chimique, de transformation chimique et de réaction chimique. Le sens de ces concepts doit pouvoir se construire dans les interrelations des différents systèmes symboliques (Weil-Barais, 1994).

Dans le cadre de la reconstruction didactique, nous avons mené plusieurs enquêtes.

Une enquête institutionnelle

Les spécificités du langage symbolique de la chimie n'apparaissent ni dans les programmes ni dans les ouvrages scolaires. Les formules chimiques sont introduites explicitement avec les

concepts du niveau microscopique : atome et molécule. Nous avons alors constaté que seuls les symboles permettent de différencier les atomes au moment de leur introduction en quatrième. Aucune caractéristique ne leur est associée en classe de quatrième.

Une enquête auprès des élèves

Pour cette enquête nous avons fait passer un questionnaire à un peu plus de six cents élèves et étudiants.

Nous avons constaté que les élèves associent quasiment exclusivement des critères microscopiques aux noms scientifiques ou aux formules chimiques. Ce phénomène s'amplifie avec les années d'études. Est-ce le langage qui n'est pas compris comme un système représentatif des espèces chimiques ou est-ce le concept d'espèce chimique qui n'est pas suffisamment maîtrisé pour permettre aux élèves d'associer correctement les critères tels que corps pur ou mélange à des noms ou des formules ? Nous pensons que ces deux aspects interviennent dans les réponses que nous avons obtenues. Les difficultés des élèves à propos du concept de substance ont déjà été repérées dans de nombreuses recherches dont certaines récentes (Ngai, Sevian & Talanquer, 2014). Mais plusieurs indices dans l'analyse que nous avons faite des réponses au questionnaire-élèves nous permettent de penser que la formule chimique ou le nom scientifique peut aussi entraîner une difficulté d'identification des critères espèce chimique et mélange. Ce résultat semble de plus cohérent avec l'enquête institutionnelle.

Nous avons également constaté que les élèves sont capables de faire évoluer la constitution des formules chimiques en fonction du contexte, ce qui semble indiquer des difficultés dans la maîtrise du concept de molécule.

Ces résultats semblent corroborer le bienfondé de faire travailler en dialectique le registre symbolique, le registre empirique et les registres des modèles.

Une enquête sur les pratiques des enseignants

Les ressources élaborées à partir de la reconstruction didactique le sont en direction des enseignants. Nous avons donc choisi d'ajouter à l'enquête institutionnelle et à celle menée auprès des élèves, l'enquête didactique proposée par Cécile de Hosson (2011), une troisième

enquête auprès des enseignants. Avoir un premier aperçu des connaissances didactiques et épistémologiques des enseignants à propos de l'enseignement du langage symbolique de la chimie nous semble indispensable pour élaborer des ressources adaptées. Nous nous plaçons dans le cadre de la double approche ergonomique et didactique des pratiques (Robert & Rogalski, 2002) pour réaliser l'analyse de deux séances ordinaires au moment de l'introduction des formules chimiques en classe de quatrième. Les deux enseignants proposent la même présentation des concepts atome et molécule. Comme dans l'enquête institutionnelle, il apparaît que pour ces enseignants les atomes sont caractérisés par leur symbole ou leur représentation dans les modèles moléculaires. Les formules chimiques sont justifiées à partir des noms et des modèles moléculaires. Les enseignants se situent dans le registre des modèles microscopiques pour présenter les formules chimiques. Dans l'analyse du discours, le niveau du langage symbolique est majoritairement microscopique mais le langage reste souvent implicite ou même non défini dans les quelques épisodes où les enseignants utilisent le registre empirique. Ils n'ont ni l'un ni l'autre conscience du rôle de pont qu'assure le langage symbolique entre les niveaux macroscopique et microscopique, ni que cette spécificité du langage symbolique peut devenir une source de difficultés pour les élèves. Les résultats obtenus pour ces deux enseignants semblant cohérents avec l'enquête didactique, nous pensons qu'il ne s'agit pas de cas isolés.

Une enquête historique

L'enquête historique montre que la nomenclature et les formules chimiques se sont élaborées conjointement avec le développement des connaissances empiriques et du modèle microscopique de la matière au cours de la première moitié du XIXe siècle. Les formules de l'eau et des corps simples ont été à l'origine de plusieurs controverses entre les chimistes de l'époque et au cœur des débats scientifiques. Dans le registre empirique, les lois volumétriques de Gay-Lussac et les découvertes en chimie organique des réactions de substitution et des isomères notamment, semblent avoir joué un rôle essentiel. Dans le registre des modèles, la première caractéristique associée à l'atome est sa masse[52] mais il faut plus de soixante ans, à partir du modèle atomique de Dalton, pour différencier les concepts d'atome et de molécule. Cela ne devient possible que lorsque les chimistes associent une

[52] Ou poids pour les chimistes de l'époque.

deuxième caractéristique à l'atome : son atomicité. C'est à partir de là que les formules des corps simples prennent leur forme actuelle.

L'élaboration et les premières utilisations du *media*

Pour élaborer le *media* (de Hosson, 2011), nous avons cherché à identifier les raisons, contraintes et nécessités, qui ont permis l'élaboration des formules chimiques. Pour cela, nous avons adapté les espaces de contraintes et de nécessités (Orange, 2000) à la chimie en introduisant le registre symbolique en tension entre le registre empirique et le registre des modèles. Ces espaces mettent en évidence la complexité du cheminement pour aboutir aux formules des corps simples. Pourtant celles-ci sont présentées dans les programmes, dans les ouvrages scolaires et par les deux enseignants comme allant de soi.

À partir de ces différents espaces, et pour que le *media* reste adapté aux contraintes institutionnelles et dans la zone proximale de développement des élèves (Vygotski, 2013), nous pensons qu'il est possible d'utiliser pour le registre empirique les réactions dans les gaz étudiées par Gay-Lussac et nous éliminons, du moins en collège, tout ce qui fait référence à la chimie organique. Travailler avec les volumes des gaz permet de donner une signification macroscopique aux nombres stœchiométriques de l'équation chimique. Actuellement, l'équation chimique pour un élève de collège est exclusivement microscopique. Nous pensons que ce travail pourrait aider ultérieurement le passage aux quantités de matière en classe de seconde. Du côté du registre des modèles, l'introduction des formules doit se faire en dialectique avec les concepts d'atome, de molécule et de réaction chimique. Pour cela, l'atome doit être caractérisé par des attributs notamment son atomicité. L'atomicité présenterait alors l'avantage de donner une raison à l'arrangement des atomes dans les modèles moléculaires utilisés par tous les enseignants de collège.

Pour faire évoluer l'enseignement du langage symbolique en chimie, les deux premières utilisations des ressources que nous avons élaborées semblent indiquer la nécessité d'une formation à la fois didactique et épistémologique des enseignants.

Perspectives de recherche

Le travail effectué dans cette thèse peut se prolonger selon trois axes complémentaires : une étude approfondie des réactions des élèves face au *media*, la conception de formations qui rencontrent l'adhésion des enseignants, l'élaboration de nouvelles prescriptions curriculaires.

Les élèves peuvent-ils construire des raisons ?

Nous avions fait l'hypothèse que l'utilisation du *media* en classe devrait permettre aux élèves d'élaborer les contraintes et les raisons quant à l'élaboration de formules chimiques. Nous n'avons pas pu tester cette hypothèse dans les classes de Mathieu et de Benjamin. Ils n'ont en effet pas mené de débat avec leurs élèves. Il nous semble pourtant indispensable de vérifier l'usage des textes ou des dialogues fictifs dans les conditions d'un débat avec des élèves.

Nous avons testé nous-mêmes les dialogues que nous avions élaborés, avec des élèves volontaires en classe de quatrième (deux élèves), puis de troisième (quatre élèves), puis de seconde (douze élèves), hors du contexte d'une séance de classe. Nous avons indiqué en Annexes 29, 31 et 33, les protocoles et les dialogues que nous avions proposés pour ces essais effectués entre janvier 2017 et mars 2017. Nous avons intégralement retranscrit les échanges pour les élèves de quatrième et de troisième et pour un des groupes de seconde. Il nous reste maintenant à analyser ces échanges pour déceler l'éventuel « *caractère apodictique des interventions des élèves* » (Crépin-Obert, 2010b, 2011). Crépin-Obert (2010, 2011) répertorie trois cas possibles d'analyse.

- « *La nécessité est explicitée par l'élève* ». Elle n'obtient cela qu'une seule fois.
- « *La nécessité est déduite ˝ en miroir ˝ des impossibles explicités* ».
- « *La nécessité est implicite, inférée par recoupement de plusieurs interactions langagières et redondance d'un argument avancé* ».

Nous avons au moins déjà constaté que le passage des dialogues où Sagredo présente les résultats de Gay-Lussac avec la double interprétation de Salviati et de Simplicio, ne laisse pas indifférents les élèves et leur pose problème.

La formation des enseignants

Proposer un contenu de séance aux enseignants sans leur donner des pistes pour accompagner les élèves leur demande un investissement trop important et entraîne un risque d'abandon des ressources. Nous pensons que l'appropriation de ces outils par les enseignants n'est possible qu'avec une formation parce que selon notre enquête, ceux que nous avons côtoyés n'imaginent pas le rôle dual du langage symbolique et par conséquent les incompréhensions, les implicites et les difficultés que l'appréhension de ce langage peut susciter chez les élèves. Pour favoriser la compréhension des élèves, les enseignants sont amenés à décomposer un savoir pour pouvoir l'enseigner. Comme le suggère Robert (2003), une formation doit prendre en compte au moins deux composantes des pratiques : la cognitive et la médiative. Elle devrait de plus apporter dans la composante personnelle les éléments didactique et épistémologique nécessaires aux enseignants pour qu'ils proposent des tâches et un étayage adaptés au but visé. Nous avons le projet d'adjoindre à une telle formation une utilisation des espaces de contraintes et des nécessités pour étudier des ressources historiques primaires (ou peu modifiées). L'objectif serait alors de déterminer si ces espaces constituent un outil pertinent pour la formation épistémologique des enseignants. Comme le suggère (Orange, 2005a), ces espaces pourraient développer tout autant les compétences didactiques des formés.

> *Nos recherches ont également des visées plus pratiques, liées à la formation des enseignants. En caractérisant la problématisation scientifique par la construction de nécessités et en menant des recherches empiriques qui déterminent, pour un domaine donné, les nécessités accessibles aux différents niveaux de la scolarité, nous pouvons fournir aux enseignants des repères pour conduire la problématisation des élèves ; ce que l'on peut appeler des « cartes de la problématisation possible », prenant la forme « d'espaces de contraintes. (Orange, 2005, p. 87)*

De plus pour que les enseignants s'approprient effectivement les documents d'une ressource, ceux-ci ne peuvent se contenter d'être une proposition théorique de chercheur. Les scénarios utilisant les ressources historiques doivent provenir d'une co-construction avec les enseignants (Gueudet & Trouche, 2008). En effet certains travaux montrent que la conception de matériaux d'enseignement en collaboration avec des chercheurs est un facteur de développement professionnel des enseignants (Coenders, Terlouw, Dijkstra & Pieters, 2010)

L'élaboration d'un nouveau curriculum

Les travaux en didactique des mathématiques (Robert, 2010) montrent que les enseignants reprennent peu les ingénieries développées par la recherche en didactique. Une des raisons semblerait être le « caractère isolé de ces propositions » qui ne couvrent pas tout un programme ni même tout un chapitre.

Comme nous l'avons déjà indiqué dans la première partie de ce travail, de nombreux travaux de didactique s'interrogent sur les connaissances nécessaires pour débuter l'apprentissage de la chimie. Faut-il développer le registre particulaire dès les premières années ? Différents travaux de recherche en éducation de la chimie semblent indiquer que les concepts de particules n'aident pas à interpréter les phénomènes de chimie appliquée de la vie de tous les jours et que ceux-ci peuvent s'expliquer au niveau macroscopique sans avoir recours au niveau microscopique (Fensham, 2002).

> *Nous pensons que la construction du concept de substance au niveau manipulatoire doit précéder tout travail de modélisation au niveau atomique et constitue un pas décisif vers un processus d'articulation entre représentations du niveau manipulatoire et du niveau atomique. (Solomonidou & Stavridou, 1994, p. 94)*

Johnson (2002) montre de son côté que le modèle particulaire, notamment la notion de liaison, semble jouer un rôle essentiel dans le développement des idées nouvelles pour les élèves, notamment celles de transformation chimique et de substance chimique mais qu'une introduction prématurée de la structure atomique est inutile. Protons, neutrons et électrons ne sont sans doute pas nécessaires pour expliquer les possibilités de transformations chimiques. La notion d'atomicité est sans doute plus adaptée que la connaissance de la constitution de l'atome.

Les différents travaux semblent indiquer la nécessité de trouver le juste équilibre entre le registre empirique et le registre des modèles et de définir les caractéristiques essentielles des différents concepts pour y arriver. Mais l'apprentissage de la chimie ne peut se faire sans le registre des représentations. Solomonidou et Stavridou (1994, p. 94) proposaient d'apporter « *l'attention nécessaire aux obstacles qui sont liés au fonctionnement et à la structure de la langue quotidienne* ». Suite à notre étude, nous ajoutons qu'il est aussi nécessaire de porter l'attention nécessaire à l'introduction du langage symbolique de la chimie Le langage symbolique est pour l'expert un pont entre le niveau microscopique et le niveau

macroscopique (Taber, 2013). Il devrait aussi pouvoir jouer ce rôle pour permettre aux débutants la circulation entre le registre empirique et celui des modèles en s'interrogeant notamment à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique sur « *quelles propriétés du signifiant représentent quelles propriétés du signifié* » Vergnaud (1988, p. 41).

Nos réflexions historico-didactiques dont un aspect s'incarne dans les espaces de contraintes et de nécessités nous conduisent à dire qu'un programme de chimie pour débutants doit intégrer l'apprentissage des trois registres en dialectique.

Bibliographie

Sources primaires historiques

Berthelot, M. (1860). *Chimie organique fondée sur la synthese* (Vol. 1). Paris : Mallet-Bachelier.

Berthelot, M. (1877). *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Vol. 84). Paris : Gauthiers-Villars.

Berthollet, C.-L. (1803). *Essai de statique chimique. Première partie* (Vol. tome 1). Paris : F.Didot.

Berzelius. (1819). *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*. Paris : Méquignon-Marvis.

Berzelius. (1835). *Théorie des proportions chimiques et table synoptique des poids atomiques des corps simples, et de leurs combinaisons les plus importantes* (Deuxième Edition). Paris : Firmin Didot Fréres, Libraires-Editeurs, J.-B.Baillère, Librairie.

Boutlerow, A. (1864). *Bulletin de la Société chimique de Paris*. L. Hachette.

Comte, A. (1869). *Cours de philosophie positive : La philosophie chimique et la philosophie biologique* (Vol. 3). Paris : Baillière et Fils.

Condillac, E. B. de. (1822). *Œuvres complètes de Condillac : Étude de l'histoire et logique* (Vol. 1–tome quinzième). Paris : Lecointe et Durey.

Dalton, J. (1808). *A new system of chemical philosophy* (Vol. 1). London : Rickerstaff.

de Morveau, Lavoisier, Bertholet, & de Fourcroy. (1787). *Méthode de nomenclature chimique*. Paris : Cuchet.

Diderot, D., & d'Alembert, J. le R. (1762, 1777). Recueil de planches. In *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers.* (Vol. 2b). Brunet.

Dumas, J.-B. (1836). *Leçons sur la philosophie chimique professées au Collège de France*. Paris : Ébrard, Libraire.

Gaudin, M.-A. (1833). Recherches sur la structure intime des corps inorganiques définis. *Annales de chimie et de physique*, *52*, 113-133.

Gaudin, M.-A. (1873). *L'architecture du monde des atomes dévoilant la structure des composés chimiques et leur cristallogénie*. Paris : Gauthiers-Villars.

Gay-Lussac, J.-L. (1809). Mémoire sur la combinaison des substances gazeuses, les unes avec les autres. *Mémoires de la Société d'Arcueil*, *2*, 207-234.

Geoffroy, E. F. (1718). Table des différents rapports observés en chimie entre différentes substances, *Histoire de l'Académie royale des sciences*, 202‑ 212.

Gerhardt, C. (1844). *Précis de chimie organique. Tome 1*. Paris : Fortin, Masson et Cie.

Gerhardt, C. (1854). *Traité de chimie organique. Tome 4*. Paris : F. Didot frères.

Grimaux, É. (1866). *Équivalents, atomes, molécules...* Paris : F.Savy.

Lavoisier, A. L. (1864). *Œuvres tome I* (Vol. Tome I traité élémentaire de chimie). Paris : Imprimerie impériale.

Lavoisier, A.-L. (1801). *Traité élémentaire de chimie*. Paris : Deterville.

Lavoisier, A.-L. (1862). *Œuvres tome II* (Vol. Tome II Mémoires de chimie et physique). Paris : Publiées par les soins de son excellence le Ministre de l'Instruction Publiques et des Cultes.

Laurent, A. (1854). *Méthode de chimie*. Paris : Mallet-Bachelier.

Louyet, P. (1841). *Cours élémentaire de chimie générale, inorganique, théorique et pratique* (Vol. Tome1). Bruxelles.

Pelouze, J., & Fremy, E. (1854). *Traité de chimie générale* (Vol. 1). Paris : Masson.

Regnault, V. (1850). *Premiers éléments de chimie*. Paris : V. Masson, Langlois et Leclercq.

Venel, G. F. (1751, 1772). Chymie. In *Encyclopédie, ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers* (Vol. 3), 408‑ 437. Paris : Le Breton, David, Durand, Briasson.

Wurtz, C. A. (1864). *Leçons de philosophie chimique*. Paris : Hachette.

Wurtz, C. A. (1869). *Histoire des doctrines chimiques depuis Lavoisier jusqu'à nos jours*. Paris : L. Hachette.

Wurtz, C. A. (1871). *Leçons élémentaires de chimie moderne*. Paris : Victor Masson.

Wurtz, C. A. (1877). *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* (Vol. 84). Paris : Gauthiers-Villars.

Wurtz, C. A. (1886). *La théorie atomique* (4e édition). Paris : Felix Alcan.

Programmes et ouvrages scolaires

Bulletin officiel spécial n° 6. (2008). Programme de cinquième, quatrième, troisième.

Bulletin officiel spécial n°4. (2010). Programme d'enseignement de physique-chimie en classe de seconde générale et technologique.

Bulletin officiel spécial n°11. (2015). Programme d'enseignement du cycle des approfondissements (cycle 4).

Bazin, D. (2006). *Physique chimie 5ème livre de l'élève édition 2006*. Rosny-sous-Bois : Bréal.

Collectif. (1999). *Physique - Chimie 5e*. Paris : Belin.

Collectif, & Durandeau, J.-P. (1998). *Sciences physiques, 5e*. Paris : Hachette.

Collectif, & Meneret, D. (2017). *Physique Chimie Cycle 4* (édition 2017). Paris : Magnard.

Donadei, É. (2017). *Physique chimie cycle 4 : Livre de l'élève* (édition 2017). Paris : Belin scolaire.

Donadei, E., Foltrauer, F., Gruneisen, S., Hochereau, E., & Robert, S. (2011). *Physique Chimie 4e*. Paris : Belin.

Dulaurans, T., Barde, M., Bigorre, M., Dessaint, S., Lémonie, C., Matagne, E., … Théboeuf, D. (2017). *Physique-Chimie cycle 4 / 5e, 4e, 3e - Livre élève - éd. 2017* (édition 2017). Paris : Hachette Éducation.

Durandeau, J.-P., Bramand, P., Comte, M.-J., Cuisset, J.-C., & Collectif. (2007). *Physique Chimie 4e*. Paris : Hachette Education.

Durandeau, J.-P., Bramand, P., Comte, M.-J., Farloubeix, B., & Collectif. (2006). *Physique Chimie 5e*. Paris : Hachette.

Daujean, C., & Massa, F. (2017). *Microméga - Physique-Chimie Cycle 4 Éd. 2017 - Mon carnet de labo*. Paris : Hatier.

Bibliographie générale

Al-Kunifed, A., Good, R., & Wandersee, J. (1993). Investigation of High School Chemistry Students' Concepts of Chemical Symbol, Formula, and Equation: Students' Prescientific Conceptions. (Publication no. ED 376020). Retrieved from ERIC http://www. eric. ed. gov.

Astolfi, J.-P., & Peterfalvi, B. (1997). Stratégies de travail des obstacles : dispositifs et ressorts. *Aster, (25), 193-216*.

Bachelard, G. (1967). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance* (5ème édition). Paris : Librairie philosophique J.VRIN.

Bachelard, G. (2010). *Le matérialisme rationnel* (4ème édition). Paris : Presses Universitaires de France - PUF.

Barberousse, A., Kistler, M., & Ludwig, P. (2000). *La philosophie des sciences au XXe siècle*. Paris : Flammarion.

Barlet, R. (1999). ENSEIGNEMENT - L'espace épistémologique et didactique de la chimie. *Actualité Chimique*, *7*(4), 23-33.

Barlet, R., & Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, (18), 25-55.

Barth, B.-M. (2001). *L'apprentissage de l'abstraction*. Paris, France : Retz.

Beaufils, D., Maurines, L., & Chapuis, C. (2010). Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique et chimie. *Le BUP physique chimie*, *924*, 581-598.

Bensaude-Vincent, B. (1989). Lavoisier : une révolution scientifique. In *Eléments d'histoire des sciences* (363‑ 385). Paris : Bordas.

Bensaude-Vincent, B. (2005). *Faut-il avoir peur de la chimie ?* Paris : les Empêcheurs de penser en rond.

Bensaude-Vincent, B., & Kounelis, C. (1991). *Les Atomes. Une anthologie historique*. Paris : Presses Pocket.

Bensaude-Vincent, B., & Stengers, I. (1993). *Histoire de la chimie*. Paris : Ed. la Découverte.

Ben-Zvi, R., Eylon, B., & Silberstein, J. (1987). Students' visualization of a chemical reaction. *Education in chemistry*, *24*(4), 117-120.

Bimbot, R., & Guillerme, J. (s. d.). ÉLÉMENTS CHIMIQUES. Consulté 27 septembre 2016, à l'adresse http://www.universalis-edu.com.ezproxy.u-pec.fr/encyclopedie/elements-chimiques

Blondel-Mégrelis, M. (2008). Quelques aspects méconnus de la personne et de l'œuvre de Charles Gerhardt (1816-1856). *Revue d'histoire de la pharmacie*, *95*(357), 39‑ 62.

Boilevin, J. M., Davous, D., & Thibault, J. (1996). Modèles moléculaires et nouveaux programmes au lycée. *Bulletin de l'Union des Physiciens, 786, 1289-1306*.

Brehelin, D., & Guedj, M. (2007). Le modèle particulaire au collège : fluctuations des programmes et apports de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, (31), 129-165.

Calmettes, B. (2010). Analyse pragmatique de pratiques ordinaires, rapport pragmatique à l'enseigner: Étude de cas : des enseignants experts, en démarche d'investigation en physique. *Recherches en didactiques des sciences et des technologies,* (2), 235‑ 272.

Camel, T. (2012). L'importance de la loi de volumes pour le développement de la Chimie Organique. *Bulletin de la Sabix. Société des amis de la Bibliothèque et de l'Histoire de l'École polytechnique*, (50), 79‑ 89.

Canac, S., & Kermen, I. (2016). Exploring the mastery of French students in using basic notions of the language of chemistry. *Chemistry Education Research and Practice, 17*(3), 452‑ 473.

Carretto, J., & Viovy, R. (1994). Relevé de quelques obstacles épistémologiques dans l'apprentissage du concept de réaction chimique. *Aster*, (18), 12-26.

Coenders, F., Terlouw, C., Dijkstra, S., & Pieters, J. (2010). The effects of the design and development of a chemistry curriculum reform on teachers' professional growth: A case study. *Journal of Science Teacher Education*, *21*(5), 535–557.

Cohen-Azria, C., Daunay, B., Delcambre-Derville, I., Lahanier-Reuter, D., & Reuter, Y. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux aux didactiques*. Bruxelles : De Boeck Supérieur.

Cokelez, A., & Dumon, A. (2005). La liaison chimique : du savoir de référence au savoir appris au lycée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 877-878, 1011-1023.

Cottez, H. (1994). Les bases épistémologiques et linguistiques de la nomenclature chimique de 1787. *Meta : Journal des traducteurs*, *39*(4), 676–691.

Crépin-Obert, P. (2010a). *Construction de problèmes et obstacles épistémologiques à propos du concept de fossile : étude épistémologique comparative entre des situations de débat à l'école primaire et au collège et des controverses historiques du XVIIe au XIXe siècle*. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

Crépin-Obert, P. (2010b). Idées et raisons sur les coquilles fossiles: étude épistémologique comparée entre une situation de débat à l'école primaire et une controverse historique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (1), 93-120.

Crépin-Obert, P. (2011). Raison ou obstacle en histoire de la paléontologie et en classe de collège : analogie ou analogisme?. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (3), 21–54.

Crosland, M. P. (1980). *Historical Studies in the Language of Chemistry*. New York : Dover Publications Inc.

Dagognet, F. (2002). *Tableaux et langages de la chimie : essai sur la représentation*. Seyssel, France : Champ Vallon.

Davous, D., Féoré, M.-C., Fort, L., Lévêque, T., Mauhourat, M.-B., Perchard, J.-P., & Jullien, L. (1999). Transformation chimique d'un système : le modèle de la réaction chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, *817*, 3–35.

de Hosson, C. (2011). *L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique*. (Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches). Université Paris-Diderot.

de Hosson, C., & Décamp, N. (2014). Using Ancient Chinese and Greek Astronomical Data: A Training Sequence in Elementary Astronomy for Pre-Service Primary School Teachers. *Science & Education*, *23*(4), 809–827.

de Hosson, C., & Kaminski, W. (2006). Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences. *Didaskalia* (28), 101-126

de Hosson, C., & Schneeberger, P. (2011). Orientations récentes du dialogue entre recherche en didactique et histoire des sciences. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (3), 9-20.

de Menten, P. (2013). *Dictionnaire de chimie : une approche étymologique et historique*. Bruxelles: De Boeck.

De Vecchi, G., & Carmona-Magnaldi, N. (2015). *Faire vivre de véritables situations-problèmes*. Paris : Hachette éducation.

de Vos, W., & Verdonk, A. H. (1987). A new road to reactions. Part 4. The substance and its molecules. *Journal of Chemical Education*, *64*(8), 692‑ 694.

Dehon, J., & Snauwaert, P. (2015). L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues. Étude de productions d'élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (12), 209-235.

Dumon, A., & Cokelez, A. (2006). La cohésion de la matière. *L'actualité chimique*, (297), 49‑ 56.

Dumon, A., & Luft, R. (2008). *Naissance de la chimie structurale*. Les Ulis, France : EDP sciences.

Dumon, A., & Mzoughi-Khadhraoui, I. (2014). Teaching chemical change modeling to Tunisian students: an "expanded chemistry triplet" for analyzing teachers' discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, *15*(1), 70-80.

Duval, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de didactique et de sciences cognitives*, *5*, 37-65.

Edeline, F. (2009). Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques : Ou de l'icône au symbole et retour. *Protée*, *37*(3), 45‑ 56.

Fabre, M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : Presses universitaires de France.

Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes: Dewey et Bachelard. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle*, *38*(3), 53-67.

Fabre, M. (2009). *Philosophie et pédagogie du problème*. Paris : Vrin.

Fabre, M., & Musquer, A. (2009). Les inducteurs de problématisation. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère nouvelle*, *42*(3), 111-129.

Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, (24)., 37-57

Fensham, P. J. (2002). Implications, large and small, from chemical education research for the teaching of chemistry. *Química nova*, *25*(2), 335-339.

Fillon, P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *Aster*, (25), 113‑ 141.

Furio, C. J., Bullejos, J., & de Manuel, E. (1994). L'apprentissage de la réaction chimique comme activité de recherche. *Aster* (18), 143-164

Gauchon, L. (2005). Transformation chimique : conceptions des élèves. *Bulletin de l'Union des physiciens*, (876), 733-746.

Goupil, M. (1991). *Du flou au clair? Histoire de l'affinité chimique de Cardan à Prigogine* (Paris : Ed. du CTHS, 1991). In: *Revue d'histoire des sciences*, tome 46, n°1, 1993. 115-117.

Guedj, M. (2005). Utiliser des textes historiques dans l'enseignement des sciences physiques en classe de seconde des lycées français : compte rendu d'innovation. *Didaskalia* (26), 75-95

Guedj, M., & Savaton, S. L. P. (2007). Éléments de problématiques et de méthodologie pour une didactique de l'épistémologie et de l'histoire des sciences et des techniques (EHST). In *IUFM du Nord Pas de Calais. Colloque Théories et expériences dans les didactiques de la géographie et de l'histoire. La question des références pour la recherche et pour la formation*. Consulté à http://ecehg.ens-lyon.fr/ECEHG/colloquehgec/journees-d-etude-didactique-2007/jed2007_pdf/guedj-laube-savaton_jed2007-pdf.pdf

Gueudet, G., & Trouche, L. (2008). Du travail documentaire des enseignants : genèses, collectifs, communautés. *Éducation et didactique*, *2*(3), 7‑ 33.

Haéri, G., & Roche, B. (1999). *Introduction à la philosophie des sciences : thèmes et sujets*. Paris : Presses Universitaires de France.

Harrison, A. G., & Treagust, D. F. (2002). The particulate nature of matter: Challenges in understanding the submicroscopic world. *Chemical education: Towards research-based practice*, *17*, 189-212.

Hébert, L. (2016). Dictionnaire de sémiotique générale. In *Louis Hébert (dir.), Signo [en ligne]* (p. 1‑ 276). Rimouski (Québec).

Hirn, C. (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique de classe de quatrième ? *Didaskalia* (6), 39-54

Horoks, J. (2008). Les triangles semblables en classe de seconde: de l'enseignement aux apprentissages. *Recherches en didactique des mathématiques*, *28*(3), 379-416.

Izquierdo-Aymerich, M. (2012). School Chemistry: An Historical and Philosophical Approach. *Science & Education*, *22*(7), 1633‑ 1653.

Jacob, C. (2001). Analysis and synthesis. *Hyle: An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, *7*, 31-50.

Johnson, P. (2000). Children's understanding of substances, part 1: recognizing chemical change. *International Journal of Science Education*, *22*(7), 719-737.

Johnson, P. (2002). Children's understanding of substances, Part 2: Explaining chemical change. *International Journal of Science Education*, *24*(10), 1037-1054.

Johnstone, A. H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, *70*(9), 701‑ 705.

Kaya, E., & Erduran, S. (2013). Integrating Epistemological Perspectives on Chemistry in Chemical Education: The Cases of Concept Duality, Chemical Language, and Structural Explanations. *Science & Education*, *22*(7), 1741‑ 1755.

Keig, P. F., & Rubba, P. A. (1993). Translation of representations of the structure of matter and its relationship to reasoning, gender, spatial reasoning, and specific prior knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(8), 883-903.

Kermen, I. (2015). Modéliser, représenter des transformations chimiques. In *T. Evrard & B. Amory, Les modèles : des incontournables pour enseigner les sciences : apprendre les sciences de 2 ans 1/2 à 18 ans* (193‑ 201). Louvain-la-Neuve : De Boeck.

Kermen, I. (2016). *Modèles et modélisation dans l'enseignement de la chimie : d'une analyse épistémologique et didactique à l'étude des pratiques enseignantes* (Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches). Université Paris-Diderot.

Kermen, I., & Barroso, M. T. (2013). Activité ordinaire d'une enseignante de chimie en classe de terminale. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (8), 91-114.

Kermen, I., & Colin, P. (2014). Comparaison de l'activité de trois enseignantes lors d'une séance sur les piles en classe de terminale. *SKHÔLE.*, *32*, 115-123.

Kermen, I., & Colin, P. (2017). Trois mises en œuvre d'une transformation chimique pour introduire le thème des piles : des choix didactiques très contrastés. *Éducation et didactique, n°22, à paraître*.

Kermen, I., & Meheut, M. (2008). Mise en place d'un nouveau programme à propos de l'évolution des systèmes chimiques : impact sur les connaissances professionnelles d'enseignants. *Didaskalia* (32), 77-116

Kermen, I., & Méheut, M. (2009). Different models used to interpret chemical changes: analysis of a curriculum and its impact on French students' reasoning. *Chemistry Education Research and Practice*, *10*(1), 24‑ 34.

Kermen, I., & Méheut, M. (2011). Grade 12 French students' use of a thermodynamic model for predicting the direction of incomplete chemical changes. *International Journal of Science Education*, *33*(13), 1745-1773.

Kind, V. (2004). *Beyond appearances: Students' misconceptions about basic chemical ideas* (2nd Edition). Durham University, UK: School of Education.

Klein, U. (2001a). Berzelian Formulas as Paper Tools in Early Nineteenth-Century Chemistry. *Foundations of Chemistry*, *3*(1), 7‑ 32.

Klein, U. (2001b). Paper tools in experimental cultures. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, *32*(2), 265‑ 302.

Kluge, F. F., & Larder, D. F. (1971). AM Butlerov. On the chemical structure of substances. *Journal of Chemical Education*, *48*(5), 289‑ 291.

Kuhn, T. S. (1989). *La Structure des révolutions scientifiques*. Paris: Flammarion.

Larcher, C. (1996). La physique et la chimie, sciences de modèles. In *Toussaint Jacques, Didactique appliquée de la physique-chimie : éléments de formation pour l'enseignement* (160‑ 178). Paris : Nathan Pédagogie.

Laszlo, P. (1993). *La Parole des choses ou le langage de la chimie*. Paris : Editions Hermann.

Laszlo, P. (2010). Ampère et la « forme représentative » des molécules. Consulté 10 octobre 2016, à l'adresse http://www.bibnum.education.fr/chimie/theorie-chimique/lettre-d-ampere-berthollet

Laszlo, P. (2011). Towards Teaching Chemistry as a Language. *Science & Éducation*, *22*(7), 1669‑ 1706.

Laszlo, P. TYPES THÉORIE DES, chimie. Consulté le 2 janvier 2017, In *Universalis éducation [en ligne]*. *Encyclopædia Universalis*.

Laugier, A. (1998). *Représentation de la réaction chimique dans les registres macroscopique et microscopique : contribution au repérage des obstacles épistémologiques. Une étude en classe de seconde*. Thèse de doctorat. Pau.

Laugier, A., & Dumon, A. (2000). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *Bulletin de l'union des physiciens*, (826), 1261-1283.

Laugier, A., & Dumon, A. (2001). D'aristote à Mendeleev: Plus de 2000 ans de symbolisme pour représenter la matière et ses transformations. *L'Actualité chimique*, (3), 38-50.

Laugier, A., & Dumon, A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelles convergences ? *Didaskalia* (22), 69-97

Laugier, A., & Dumon, A. (2004). L'Équation de Réaction : Un Nœud d'Obstacles Difficilement Franchissable. *Chemistry Education Research and Practice*, *5*(1), 51-68.

Le Maréchal, J.-F., & Cross, D. (2010). Difficultés d'apprentissage liées aux représentations en chimie. *Le BUP physique chimie*, *928*, 1025-1035.

Lecourt, D. (2002). *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*. Paris : Vrin.

Lemeignan, G., & Weil-Barais, A. (1993). *Construire des concepts en physique : l'enseignement de la mécanique*. Paris : Hachette.

Lerman, I.-C. (2008). Analyse de la Vraisemblance des Liens Relationnels : Une méthodologie d'analyse classificatoire des données. 3e Journées Thématiques Apprentissages Artificiel et Fouille des Données, 8-9 avril 2008. Consulté à l'adresse https://www.irisa.fr/symbiose/images/stories/ilerman/2009/Artcl-Lerman-AAFD08.pdf.

Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissage dans les sciences de la vie. Étude de quelques débats scientifiques dans la classe dans deux thèmes biologiques : nutrition et évolution*. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

Lhoste, Y., & Peterfalvi, B. (2009). Problématisation et perspective curriculaire en SVT: l'exemple du concept de nutrition. Aster (49), 79-108

Marais, P., & Jordaan, F. (2000). Are we taking symbolic language for granted? *Journal of Chemical Education*, *77*(10), 1355-1357.

Margolinas, C. (2002). Situations, milieux, connaissances : analyse de l'activité du professeur. *Actes de la 11ème École d'Été de Didactique des Mathématiques*, 141-156.

Martinand, J.-L. (1992). Présentation. In *équipe INRP / LIREST, Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris: INRP.

Martinand, J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations? *Didaskalia*, *2*, 89‑ 99.

Martinand, J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In *Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et technologiques au lycée d'enseignement général et au collège-Université d'été*. INRP; ENS Cachan. Consulté à http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf

Martinez Barrera, L. H. M. (2014). *Construir un problema : un primer paso hacia la investigación en ciencias. Análisis de una formación para docentes de primaria en el contexto colombiano y francés*, Thèse de doctorat. Université Paris Diderot - Paris 7.

Massain, R. (1966). *Chimie et chimistes*. Paris : Magnard

Masselot, P., & Robert, A. (2007). Le rôle des organisateurs dans nos analyses didactiques de pratiques de professeurs enseignant les mathématiques. *Recherche & formation*, (56), 15-31

Maurines, L., & Beaufils, D. (2011). Un enjeu de l'histoire des sciences dans l'enseignement : l'image de la nature des sciences et de l'activité scientifique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (3), 271–305.

Maurines, L., & Mayrargue, A. (2007). Utiliser l'histoire de l'optique dans l'enseignement : pourquoi? Comment. *Actes des Journées de l'Union des Professeurs de Physique et Chimie « Paris de sciences». Consulté à* http://actescongres.udppc.asso.fr/docactes/2007/185_21032008123615.doc

Méheut, M. (1989). Des représentations des élèves au concept de RC : premières étapes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, *716*, 997-1012.

Morge, L. (2003). Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire. *Didaskalia*, (23), 101‑ 131.

Morge, L. (2007). Comparaison des conceptions épistémologiques à l'œuvre dans les anciens et les nouveaux programmes de collège sur le thème du modèle particulaire : Quelles conséquences pour l'enseignement ? *Bulletin de l'Union des physiciens*, (890), 23-30.

Mounin, G. (1981b). Une sémiologie du système des signes de la chimie. *Diogene*, (114), 92, 216-228

Mzoughi-Khadhraoui, I., & Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en Didactique des Sciences et des Technologies*, (6), 89‑ 118.

Nakhleh, M. B., & Mitchell, R. C. (1993). Concept learning versus problem solving: There is a difference. *Journal of Chemical Education*, *70*(3), 190‑ 192.

Nelson, P. G. (2003). Basic chemical concepts. *Chemistry Education Research and Practice*, *4*(1), 19-24.

Ngai, C., Sevian, H., & Talanquer, V. (2014). What is this Substance? What Makes it Different? Mapping Progression in Students' Assumptions about Chemical Identity. *International Journal of Science Education*, *36*(14), 2438‑ 2461.

Orange, C. (2000). *Idées et raisons : constructions de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en SVT*. Mémoire de recherche pour l'HDR, Université de Nantes, Nantes.

Orange, C. (2005a). Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les sciences de l'éducation-pour l'ère nouvelle*, *38*(3), 69–94.

Orange, C. (2005b). Problème et problématisation dans l'enseignement scientifique. *Aster*, *40*, 3-11.

Orange, C., Lhoste, Y., & Orange-Ravachol, D. (2008). Argumentation, problématisation et construction de concepts en classe de sciences. *Buty, C. y C. Plantin (2008) Argumenter en classe de sciences. Du débat à l'apprentissage, Lyon : Institut National de Recherche Pédagogique*.

Orange, C., & Orange-Ravachol, D. (2013). Le concept de représentation en didactique des sciences : sa nécessaire composante épistémologique et ses conséquences. *Recherches en éducation*, *17*, 46-61.

Pastré, P. (2007). Quelques réflexions sur l'organisation de l'activité enseignante. *Recherche & formation*, n°56., p. 81-93.

Piaget, J., & Garcia, R. (1983). *Psychogenèse et histoire des sciences*. Paris : Flammarion.

Pigeard-Micault, N. (2007). *Charles Adolphe Wurtz, doyen de l'École de médecine de Paris (1866-1875)*. Thèse de doctorat. Université de Nanterre-Paris X.

Plantin, C. (2005). *L'argumentation : histoire, théorie et perspectives.* Paris : Presses Universitaires de France. Collection Que sais-je.

Ponot, R. (1971). Les signes alchimiques. *Communication et langages*, *12*(1), 65–79.

Régis, A., Roletto, E., Soudani, O., & Soudani, M. (2014). Fonctionnement sémiotique et construction des modèles en chimie. Un cadre d'analyse peircien. *Recherche en Didactique des Sciences et des Technologies, (9),* 179-208.

Robardet, G., & Guillaud, J.-C. (1997). *Eléments de didactique des sciences physiques*. Paris : Presses Universitaires de France.

Robert, A. (2003). De l'idéal didactique aux déroulements réels en classe de mathématiques : le didactiquement correct, un enjeu de la formation des (futurs) enseignants (en collège et lycée). *Didaskalia (22)*, p99-116

Robert, A. (2007). Stabilité des pratiques des enseignants de mathématiques (second degré): une hypothèse, des inférences en formation. *Recherches en didactique des mathématiques*, *27*(81), 271-312.

Robert, A. (2010). Formation professionnelle des enseignants de mathématiques du second degré. *Repères-IREM*, *80*, 87-103.

Robert, A., & Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, *2*(4), 505‑ 528.

Robert, A., & Vandebrouck, F. (2014). Proximités-en-acte mises en jeu en classe par les enseignants du secondaire et ZPD des élèves : analyses de séances sur des tâches complexes. *Recherches en didactique des mathématiques*, *34*(2), 239-283.

Robert, A., & Vivier, L. (2013). Analyser des vidéos sur les pratiques des enseignants du second degré en mathématiques : des utilisations contrastées en recherche en didactique et en formation de formateurs–quelle transposition ? *Education & didactique*, *7*(2), 115-144.

Roditi, E. (2003). Régularité et variabilité des pratiques ordinaires d'enseignement. *Recherches en didactique des mathématiques*, *23*(2), 183-216.

Rogalski, J. (2000). Approche de psychologie ergonomique de l'activité de l'enseignant. In *Actes du XXVIe colloque COPIRELEM*, p. 45-66.

Rogalski, J. (2015). Didactique et cognition. De Vygotsky à Dehaene… ? *Cahiers du laboratoire de didactique André Revuz n° 13*.

Roletto, E., & Piacenza, B. (1994). Faut-il construire le concept de substance ? *Aster*, (18), 63‑ 74.

Ruthven, K., Laborde, C., Leach, J., & Tiberghien, A. (2009). Design tools in didactical research: Instrumenting the epistemological and cognitive aspects of the design of teaching sequences. *Educational researcher*, *38*(5), 329-342.

Sanger, M. J. (2000). Using particulate drawings to determine and improve students' conceptions of pure substance and mixtures. *Journal of Chemical Education*, *77*(6), 762‑ 766.

Sanger, M. J. (2005). Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. *Journal of Chemical Education*, *82*(1), 131‑ 134.

Scheidecker-Chevallier, M. (1997). L'hypothèse d'Avogadro (1811) et d'Ampère (1814) : la distinction atome/molécule et la théorie de la combinaison chimique. *Revue d'histoire des sciences*, 159-194.

Scheidecker-Chevallier, M. (2000). Marc-Antoine Gaudin, Alexandre-Édouard Baudrimont, Auguste Laurent et l'approche structurale en chimie. *Revue d'histoire des sciences*, 133–167.

Scheidecker-Chevallier, M. (2003). Le débat sur les atomes au XIXème siècle. *in La pluridisciplinarité dans les enseignements scientifiques*, Poitiers. p. 57-72. Consulté à

http://media.eduscol.education.fr/file/Formation_continue_enseignants/91/9/uescience_histoireT1_acte_111919.pdf#page=57

Scheidecker-Chevallier, M., & Laporte, G. (1999). *La démarche de modélisation en chimie*. Paris: Ellipses.

Schummer, J. (1998). The Chemical Core of Chemistry I : A Conceptual Approach. *HYLE–International Journal for Philosophy of Chemistry*, *4*(2), 129-162.

Serres, M., & Farouki, N. (1997). *Dictionnaire des sciences*. Paris : Flammarion.

Sevian, H., & Talanquer, V. (2014). Rethinking chemistry: a learning progression on chemical thinking. *Chemistry Education Research and Practice*, *15*(1), p. 10-23.

Sliwka, H.-R. (2003). Reform of Chemical Language as a Model for Spelling Reform. *Journal of the Simplified Spelling Society*, (32), 24-28.

Solomonidou, C., & Stavridou, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*. p. 75-95

Solomonidou, C., & Stavridou, H. (2000). From inert object to chemical substance: Students' initial conceptions and conceptual development during an introductory experimental chemistry sequence. *Science Education*, *84*(3), 382-400.

Solsona, N. ria, Izquierdo, M., & De Jong, O. (2003). Exploring the development of students' conceptual profiles of chemical change. *International Journal of Science Education*, *25*(1), 3-12.

Stains, M., & Talanquer, V. (2007). Classification of chemical substances using particulate representations of matter: An analysis of student thinking. *International Journal of Science Education*, *29*(5), 643-661.

Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1989). Physical phenomena–chemical phenomena: do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, *11*(1), 83-92.

Stavridou, H., & Solomonidou, C. (1998). Conceptual reorganization and the construction of the chemical reaction concept during secondary education. *International Journal of Science Education*, *20*(2), 205-221.

Taber, K. S. (2009). Learning at the Symbolic Level. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Éd.), *Multiple Representations in Chemical Education* (Vol. 4, p. 75‑ 105). Dordrecht: Springer Netherlands.

Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, *14*(2), 156‑ 168.

Taber, K. S., & Bricheno, P. (2009). Coordinating Procedural and Conceptual Knowledge to Make Sense of Word Equations: Understanding the complexity of a 'simple' completion task at the learner's resolution. *International Journal of Science Education*, *31*(15), 2021‑ 2055.

Talanquer, V. (2007). Explanations and teleology in chemistry education. *International Journal of Science Education*, *29*(7), 853-870.

Talanquer, V. (2009). On cognitive constraints and learning progressions: The case of "structure of matter". *International Journal of Science Education*, *31*(15), 2123-2136.

Talanquer, V. (2011). Macro, Submicro, and Symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, *33*(2), 179‑ 195.

Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' Understanding of Chemical Formulae: A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, *36*(1), 157‑ 185.

Team, D. (s. d.). Langage (A). Consulté le 15 juillet 2017, à l'adresse http://encyclo-philo.fr/langage-a/

Tiberghien, A. (2017). Modélisation des savoirs dans la classe en didactique de la physique. *Recherches en Éducation*, (29), 72‑ 87.

Tiberghien, A., & Vince, J. (2005). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, *10*, 153-176.

Van Brakel, J. (2014). Philosophy of Science and Philosophy of Chemistry. *Hyle: An International Journal for the Philosophy of Chemistry*, *20*(1), 11–57.

Vergnaud, G. (1988). Question de représentation et de formulation dans la résolution de problèmes mathématiques. *Annales de didactique et des sciences cognitives, Strasbourg*. IREM de Strasbourg, 33-55

Vygotski, L. S. (2013). *Pensée et langage (4e éd)*. Paris: La Dispute.

Weil-Barais, A. (1994). *L'homme cognitif*. Paris : Presses universitaires de France.

Weininger, S. J. (1998). Contemplating the finger : Visuality and the Semiotics of Chemistry. *HYLE–International Journal for Philosophy of Chemistry*, *4*(1), 3-27.

Wunderli, P. (2016). Ferdinand de Saussure : le signe. In *Louis Hébert (dir.), Signo [en ligne]*. Rimouski (Québec).

Table des illustrations

Figures

FIGURE 1 EXEMPLE DE PROBLÈME TYPIQUE D'ÉQUILIBRE CHIMIQUE (MARAIS & JORDAAN, 2000, P. 135) 11
FIGURE 2 LES DIFFÉRENTES REPRÉSENTATIONS DU BUTANE DANS LES OUVRAGES SCOLAIRES DU SECOND DEGRÉ 12
FIGURE 3 DISTINCTION ENTRE DEUX MONDES ET LES RELATIONS ÉTABLIES DANS LE CAS DU SAVOIR ENSEIGNÉ EN PHYSIQUE (ANDRÉE TIBERGHIEN & VINCE, 2005) 27
FIGURE 4 SCHÉMA DE LA MODÉLISATION (MARTINAND, 1998) 28
FIGURE 5 ARTICULATION DU NIVEAU EXPÉRIMENTAL ET DU NIVEAU DES MODÈLES (KERMEN, 2015) 29
FIGURE 6 LE TRIANGLE DE JOHNSTONE (1993) 30
FIGURE 7 REGISTRES DES MODÈLES ET REGISTRE EMPIRIQUE LIÉS AU REGISTRE DES REPRÉSENTATIONS SYMBOLIQUES (KERMEN & MÉHEUT, 2009) 30
FIGURE 8 TRIPLET DE LA CHIMIE REVISITÉ (DUMON & MZOUGHI-KHADHRAOUI, 2014) 31
FIGURE 9 DEUX NIVEAUX DE CONCEPTS RELIÉS PAR UNE MÊME REPRÉSENTATION SYMBOLIQUE (TABER, 2013) 32
FIGURE 10 STRUCTURE OPÉRATOIRE DU CONCEPT (BARTH, 2001, P. 38) 35
FIGURE 11 HYPOTHÈSES IMPLICITES LIMITANT LA RÉFLEXION DES ÉLÈVES ET DES ÉTUDIANTS À PROPOS DE LA STRUCTURE DE LA MATIÈRE D'APRÈS TALANQUER (2009, P. 6) 40
FIGURE 12 LES LIENS ENTRE LANGAGE SYMBOLIQUE ET LES REGISTRES ET NIVEAUX DE LA CHIMIE 52
FIGURE 13 ORGANISATION DES PROJETS D'ENQUÊTE PSYCHO-COGNITIVE, DE RECONSTRUCTIONS HISTORIQUE ET DIDACTIQUE (DE HOSSON, 2011, P. 35) 59
FIGURE 14 UNE REPRÉSENTATION DE LA CONSTRUCTION DU PROBLÈME : DE LA CONNAISSANCE ORDINAIRE AU SAVOIR SCIENTIFIQUE(ORANGE, 2000, P. 27) 62
FIGURE 15 ESPACE DES CONTRAINTES DE LA DEUXIÈME PROBLÉMATISATION DU MILIEU INTÉRIEUR PAR CLAUDE BERNARD (ORANGE, 2000) 63
FIGURE 16 UNE REPRÉSENTATION MODIFIÉE DES « ESPACES DE CONTRAINTES » : LES « ESPACES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS » (LHOSTE, 2008, P. 79) 64
FIGURE 17 ESPACE DES CONTRAINTES ET DES NÉCESSITÉS POUR LE LANGAGE SYMBOLIQUE DE LA CHIMIE 66
FIGURE 18 LA DOUBLE RÉGULATION DE L'ACTIVITÉ (ROGALSKI, 2000, P. 4) 71
FIGURE 19 UNE REPRÉSENTATION DES CINQ COMPOSANTES DES PRATIQUES (KERMEN, 2016, P. 79) 73
FIGURE 20 HYPOTHÈSES DE TRAVAIL ET PLAN DE LA THÈSE 77
FIGURE 21 EXTRAIT DU PROGRAMME DE QUATRIÈME (RENTRÉE 2007) (P 126). 87
FIGURE 22 NOM D'USAGE COURANT OU SCIENTIFIQUE AU MÊME PLAN (DULAURANS ET AL., 2017, P. 117) 92
FIGURE 23 UN NOM SCIENTIFIQUE PAS NÉCESSAIREMENT ASSOCIÉ À UNE SUBSTANCE PURE (DURANDEAU, BRAMAND, COMTE, CUISSET & COLLECTIF, 2007, P. 60) 92
FIGURE 24 EXEMPLE DE DIFFÉRENTIATION NOM USUEL ET NOM SCIENTIFIQUE (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 105) 92
FIGURE 25 NOM SCIENTIFIQUE ET ESPÈCE CHIMIQUE (DAUJEAN & MASSA, 2017, P. 155) 93
FIGURE 26 NOM COURANT ET ESPÈCE CHIMIQUE (DAUJEAN & MASSA, 2017, P. 156) 93
FIGURE 27 EXEMPLE DE CARTE D'IDENTITÉ : LE DIOXYDE DE CARBONE (COLLECTIF & DURANDEAU, 1998, P. 47) 93
FIGURE 28 EXEMPLE DE CARTE D'IDENTITÉ : LE DIOXYDE DE CARBONE (COLLECTIF, 1999, P.36-) 93
FIGURE 29 EXEMPLE DE CARTE D'IDENTITÉ DE L'EAU : L'EAU (COLLECTIF, 1999, P. 101) 95
FIGURE 30 INTRODUCTION DES SYMBOLES ET DES FORMULES (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 106) 96
FIGURE 31 EXEMPLE D'EXERCICES À PARTIR DES FORMULES CHIMIQUES (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 113) 98
FIGURE 32 EXEMPLE D'EXERCICES À PARTIR DES MODÈLES MOLÉCULAIRES (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 113) 98
FIGURE 33 EXEMPLE D'ÉQUATION AVEC LES NOMS (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 71) 99
FIGURE 34 INTRODUCTION DES ÉQUATIONS DE RÉACTION (DAUJEAN & MASSA, 2017, P. 164) 100

FIGURE 35 EXEMPLE D'ÉQUATIONS DANS LES EXERCICES DU NIVEAU MACROSCOPIQUE (COLLECTIF & MENERET, 2017, P. 115) 100
FIGURE 36 ÉQUATIONS AVEC LES NOMS ET AVEC LES FORMULES DANS UN MÊME BILAN (DONADEI, 2017, P. 101) 101
FIGURE 37 ARBRE DE SIMILARITÉ DES RÉPONSES CORRECTES POUR LES NOMS, CRITÈRES MACRO ET CRITÈRES MICRO, TOUS NIVEAUX D'ÉTUDE CONFONDUS (603 RÉPONSES) 126
FIGURE 38 ARBRE DE SIMILARITÉ DES RÉPONSES CORRECTES POUR LES FORMULES, CRITÈRES MACRO ET CRITÈRES MICRO, TOUS NIVEAUX D'ÉTUDE CONFONDUS (603 RÉPONSES) 127
FIGURE 39 EXTRAIT D'UNE TRANSCRIPTION À L'AIDE DU LOGICIEL SONAL 160
FIGURE 40 REPRODUCTION DU TABLEAU (SÉANCE 2) INDIQUANT LES LIENS ENTRE LE NOM CHIMIQUE ET LA FORMULE CHIMIQUE 190
FIGURE 41 EXEMPLES DE FORMULES DE DALTON (WURTZ, 1886, P. 23) 235
FIGURE 42 PLANCHE 4 ET SA LÉGENDE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES ET DE LEURS COMBINAISONS (DALTON, 1808, P. 218‑219) 236
FIGURE 43 REPRÉSENTATION DE L'ALBUMINE ET DE LA GÉLATINE (CROSLAND, 1980, P. 262) 237
FIGURE 44 REPRÉSENTATION DE L'ACIDE OXALIQUE, DU SEL ACIDE ET DU SEL NEUTRE DE POTASSIUM (CROSLAND, 1980, P. 263) 237
FIGURE 45 ÉVOLUTION DE LA REPRÉSENTATION DE LA MOLÉCULE (DUMON & COKELEZ, 2006, P. 53) 253
FIGURE 46 LES MODÈLES PÉDAGOGIQUES D'HOFMANN (COKELEZ & DUMON, 2005, P. 297) 254
FIGURE 47 FORMULES PROPOSÉES PAR WURTZ (WURTZ, 1871, P. 156) 255
FIGURE 48 UNE ÉQUATION CHIMIQUE (WURTZ, 1871, P. 157) 256
FIGURE 49 LES FORMULES TYPIQUES ET LES FORMULES DE CONSTITUTION (WURTZ, 1871, P. 139) 257
FIGURE 50 PROPORTIONS PONDÉRALES EN AZOTE ET EN OXYGÈNE DANS LES COMBINAISONS POSSIBLES (REGNAULT, 1850, P. 519) 260
FIGURE 51 QUANTITÉS PONDÉRALES D'OXYGÈNE POUR UN MÊME POIDS D'AZOTE (REGNAULT, 1850, P. 519-520) 261
FIGURE 52 EXEMPLE DE TABLE D'ÉQUIVALENTS (LAURENT, 1854, P. 2) 262
FIGURE 53 PROPORTIONS PONDÉRALES DES COMBINAISON DES MÉTAUX AVEC L'OXYGÈNE (PELOUZE & FREMY, 1854, P. 30) 262
FIGURE 54 QUANTITÉ PONDÉRALE DES MÉTAUX QUI SE COMBINENT AVEC 200 DE SOUFRE (PELOUZE & FREMY, 1854, P. 30) 263
FIGURE 55 EQUIVALENTS DE QUELQUES CORPS SIMPLES (PELOUZE & FREMY, 1854, P. 31) 264
FIGURE 56 FORMULES ORGANIQUES PROPOSÉES PAR BERTHELOT (1860, P. CXV) 278
FIGURE 57 EXEMPLES DE FORMULES ADMISES EN CHIMIE ORGANIQUE (GERHARDT, 1844, P. 50) 281
FIGURE 58 OXYDES DU RADICAL ÉTHYLE ET ACÉTYL (GERHARDT, 1854, P. 582‑583) 282
FIGURE 59 LA RÉACTION DU CHLORE ET DE L'HYDROGÈNE PAR GAUDIN (1833, P. 121) 285
FIGURE 60 EXEMPLES DE RÉACTIONS PROPOSÉES PAR LAURENT AVEC DES « DYADES » (LAURENT, 1854, P. 84) 286
FIGURE 61 POIDS MOLÉCULAIRES ET FORMULES (WURTZ, 1864, P. 59) 288
FIGURE 62 NOMBRE D'ATOMES DANS LA FORMULE DES CORPS SIMPLES (WURTZ, 1886, P. 52) 288
FIGURE 63 ESPACE DES CONTRAINTES ET DES NÉCESSITÉS POUR L'ÉTUDE HISTORIQUE 303
FIGURE 64 CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS POUR LA COMPOSITION DE L'EAU ET DES GAZ HYDROGÈNE ET OXYGÈNE 305
FIGURE 65 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DE L'EAU POUR LES ÉQUIVALENTISTES 307
FIGURE 66 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DE L'EAU POUR GERHARDT (ÉQUIVALENTISTE - ORGANICIEN) 308
FIGURE 67 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DE L'EAU POUR DALTON 310
FIGURE 68 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DE L'EAU POUR BERZELIUS 312
FIGURE 69 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DE L'EAU POUR LES ATOMISTES APRÈS LE CONGRÈS DE KARLSRUHE 314
FIGURE 70 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULE DES CORPS SIMPLES POUR DALTON 316
FIGURE 71 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULES DES CORPS SIMPLES POUR BERZELIUS 317
FIGURE 72 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULES DES CORPS SIMPLES POUR LES ORGANICIENS (DUMAS - GERHARDT - LAURENT) 318
FIGURE 73 ESPACE DES CONTRAINTES ET NÉCESSITÉS : FORMULES DES CORPS SIMPLES POUR LES ATOMISTES APRÈS LE CONGRÈS DE KARLSRUHE 320
FIGURE 74 LES ÉLÉMENTS D'ARISTOTE ET LES SYMBOLES ISSUS DE L'ASTROLOGIE (PONOT, 1971) 514

FIGURE 75 EXTRAIT PLANCHE N°1 : UNE SUBSTANCE CHIMIQUE (DIDEROT & D'ALEMBERT, 1762, P. PL1). 515
FIGURE 76 EXTRAIT PLANCHE N°1 : UN PROCÉDÉ (DIDEROT & D'ALEMBERT, 1762, P. PL1). 515
FIGURE 77 EXTRAIT PLANCHE N°1 : UN INSTRUMENT (DIDEROT & D'ALEMBERT, 1762, P. PL1). 515
FIGURE 78 EXTRAITS PLANCHE N°1 ET PLANCHE N°4 : L'AIR (DIDEROT & D'ALEMBERT, 1762, PP. PL1-4) 515
FIGURE 79 TABLE DE GEOFFROY PUBLIÉE DANS L'HISTOIRE DE L'ACADÉMIE ROYALE DES SCIENCES (1718, P. 212) 516
FIGURE 80 TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE : TABLEAU DES CORPS SIMPLES (A. L. LAVOISIER, 1864, P. 135) 520
FIGURE 81 TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE : EXTRAIT DU TABLEAU COMBINAISONS BINAIRES DE L'HYDROGÈNE (LAVOISIER, 1864, P. 152) 522
FIGURE 82 TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE : EXTRAIT DES COMBINAISONS BINAIRES DU PHOSPHORE (A. L. LAVOISIER, 1864, P. 157) 523
FIGURE 83 TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE : EXTRAITS DU TABLEAU DES COMBINAISONS DU PHOSPHORE SATURÉ D'OXYGÈNE (A. L. LAVOISIER, 1864, P. 176) 523
FIGURE 84 TRAITÉ ÉLÉMENTAIRE DE CHIMIE : EXTRAIT DU TABLEAU DES COMBINAISONS DU PHOSPHORE, PREMIER DEGRÉ D'OXYGÉNATION (A. L. LAVOISIER, 1864, P. 175) 523
FIGURE 85 SYMBOLES D'HASSENFRATZ ET ADET (DE MORVEAU ET AL., 1787) 531
FIGURE 86 SYMBOLES PROPOSÉS PAR HASSENFRATZ ET ADET (LAUGIER & DUMON, 2001) 532
FIGURE 87 RAPPORT VOLUMÉTRIQUE DANS PLUSIEURS COMBINAISONS ENTRE GAZ (WURTZ, 1886, P. 71) 536
FIGURE 88 EXTRAIT DE LA TABLE SYNOPTIQUE DES POIDS ATOMIQUES (BERZELIUS, 1835, P. 124) 538
FIGURE 89 BERZELIUS PRÉSENTANT LES RÉSULTATS OBTENUS PAR DULONG ET PETIT (BERZELIUS, 1835, P. 81‑82) 540
FIGURE 90 TABLEAU DE QUELQUES POIDS ATOMIQUES PROPOSÉS PAR BERZELIUS (MASSAIN, 1966, P. 166) 541
FIGURE 91 DESCRIPTION DU CALCUL DU POIDS DE L'ATOME DE CARBONE (BERZELIUS, 1819, P. 126‑128) 542
FIGURE 92 REPRÉSENTATION DU NOYAU C8H12 SELON LAURENT (DUMON & LUFT, 2008, P. 33) 544
FIGURE 93 LE TYPE EAU DE WILLIAMSON (BENSAUDE-VINCENT & STENGERS, 1993, P. 174) 548
FIGURE 94 LES TYPES DE GERHARDT (GERHARDT, 1854, P. 588) 549

Graphiques

GRAPHIQUE 1 RÉPARTITION DES CRITÈRES PROPOSÉS PAR LES ÉLÈVES ET LES ÉTUDIANTS (N = 603) 120
GRAPHIQUE 2 RÉPARTITION DES CRITÈRES PROPOSÉS PAR LES ÉLÈVES ET ÉTUDIANTS (N = 603) EN FONCTION DES CATÉGORIES 121
GRAPHIQUE 3 CRITÈRES MACROSCOPIQUES OU MICROSCOPIQUES CHOISIS PAR LES ÉLÈVES POUR LE DIOXYGÈNE (NOM OU FORMULE) 129
GRAPHIQUE 4 CRITÈRES MACROSCOPIQUES OU MICROSCOPIQUES CHOISIS PAR LES ÉLÈVES POUR L'EAU (NOM OU FORMULE) 130
GRAPHIQUE 5 COMPARAISON PAR NIVEAU SCOLAIRE DES RÉPONSES D'ÉLÈVES CHOISISSANT UNIQUEMENT LE CRITÈRE MACROSCOPIQUE ENTRE LES NOMS « CHARBON, « PÉTROLE » ET « EAU » 130
GRAPHIQUE 6 COMPARAISON DES RÉPONSES CORRECTES AUX CRITÈRES MICROSCOPIQUES ENTRE LES QUATRE NOMS ET ENTRE LES QUATRE FORMULES 132
GRAPHIQUE 7 COMPARAISON DES RÉPONSES CORRECTES AUX CRITÈRES MACROSCOPIQUES ENTRE LES QUATRE NOMS ET ENTRE LES QUATRE FORMULES 132
GRAPHIQUE 8 COMPARAISON DES RÉPONSES CORRECTES AUX CRITÈRES MACROSCOPIQUES ENTRE LE NOM ET LA FORMULE POUR LES QUATRE ESPÈCES CHIMIQUES 135
GRAPHIQUE 9 POURCENTAGE D'ÉLÈVES OU D'ÉTUDIANTS PAR NIVEAU SCOLAIRE AYANT CONNAISSANCE DE L'EXISTENCE D'AUTRES SYMBOLES QUE LES LETTRES POUR LES ATOMES 145
GRAPHIQUE 10 REPRÉSENTATION SUR LA BANDE SON DES THÉMATIQUES PAR UN CODAGE COULEUR 159
GRAPHIQUE 11 RÉPARTITION EN POURCENTAGE DES INTERVENTIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE MOTS PRONONCÉS (SÉANCE 1) 183
GRAPHIQUE 12 RÉPARTITION EN POURCENTAGE DES INTERVENTIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE MOTS PRONONCÉS (SÉANCE 2) 184
GRAPHIQUE 13 RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ORGANISATION DU TRAVAIL EN DURÉE ET EN POURCENTAGE (SÉANCE 1) 185

GRAPHIQUE 14 RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ORGANISATION DU TRAVAIL EN DURÉE ET EN POURCENTAGE (SÉANCE 2) 185
GRAPHIQUE 15 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES DIFFÉRENTES PHASES D'ORGANISATION DU TRAVAIL (SÉANCE 1) 186
GRAPHIQUE 16 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES DIFFÉRENTES PHASES D'ORGANISATION DU TRAVAIL (SÉANCE 2) 186
GRAPHIQUE 17 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE SAVOIR TRAVAILLÉS AU COURS DE LA SÉANCE HORS LANGAGE SYMBOLIQUE (SÉANCE 1) 200
GRAPHIQUE 18 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE SAVOIR TRAVAILLÉS AU COURS DE LA SÉANCE HORS LANGAGE SYMBOLIQUE (SÉANCE 2) 201
GRAPHIQUE 19 GRAPHE EN AIRE DE LA CLASSE D'ÉQUIVALENT OXYGÈNE 204
GRAPHIQUE 20 GRAPHE EN AIRE DE LA CLASSE D'ÉQUIVALENT O 205
GRAPHIQUE 21 GRAPHE EN AIRE DE LA CLASSE D'ÉQUIVALENT OXYDE DE CARBONE 205
GRAPHIQUE 22 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DE L'UTILISATION DU REGISTRE EMPIRIQUE, DU REGISTRE DES MODÈLES MICROSCOPIQUE OU MACROSCOPIQUE ET DU REGISTRE SYMBOLIQUE (SÉANCE 1) 207
GRAPHIQUE 23 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DE L'UTILISATION DU REGISTRE EMPIRIQUE, DU REGISTRE DES MODÈLES MICROSCOPIQUE OU MACROSCOPIQUE ET DU REGISTRE SYMBOLIQUE (SÉANCE 2) 207
GRAPHIQUE 24 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS (SÉANCE 1) 208
GRAPHIQUE 25 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS (SÉANCE 2) 208
GRAPHIQUE 26 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE (SÉANCE 1) 209
GRAPHIQUE 27 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE (SÉANCE 2) 209
GRAPHIQUE 28 COMPARAISON DE LA RÉPARTITION EN POURCENTAGE DES INTERVENTIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE MOTS PRONONCÉS 348
GRAPHIQUE 29 COMPARAISON DE LA RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ORGANISATION DU TRAVAIL EN DURÉE ET EN POURCENTAGE 349
GRAPHIQUE 30 COMPARAISON DE L'ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES DIFFÉRENTES PHASES D'ORGANISATION DU TRAVAIL (SÉANCE ORDINAIRE ET SÉANCES À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES) 349
GRAPHIQUE 31 COMPARAISON DE LA RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE SAVOIR TRAVAILLÉS AU COURS DE LA SÉANCE HORS LANGAGE SYMBOLIQUE 351
GRAPHIQUE 32 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE (SÉANCES À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES) 352
GRAPHIQUE 33 COMPARAISON DE LA RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS 352
GRAPHIQUE 34 RÉPARTITION DES DIFFÉRENTS TYPES D'ORGANISATION DU TRAVAIL EN DURÉE ET EN POURCENTAGE 359
GRAPHIQUE 35 COMPARAISON DE LA RÉPARTITION EN POURCENTAGE DES INTERVENTIONS EN FONCTION DU NOMBRE DE MOTS PRONONCÉS 359
GRAPHIQUE 36 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE SAVOIR TRAVAILLÉS AU COURS DE LA SÉANCE HORS LANGAGE SYMBOLIQUE 360
GRAPHIQUE 37 RÉPARTITION EN DURÉE ET EN POURCENTAGE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS 360
GRAPHIQUE 38 ANALYSE CHRONOLOGIQUE DES NIVEAUX DE LANGAGE UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE 361

Photos

PHOTO 1 SÉANCE 1 157
PHOTO 2 SÉANCE 2 157
PHOTO 3 SÉANCE 1 187
PHOTO 4 EXTRAIT DU TABLEAU (SÉANCE 1) : LIEN ENTRE LE NOM DE LA MOLÉCULE ET LA FORMULE 188
PHOTO 5 EXTRAITS DU TABLEAU (SÉANCE 1) : LETTRE EN MINUSCULE OU EN MAJUSCULE 189

PHOTO 6 : EXTRAIT DU TABLEAU – SÉANCE 1 189
PHOTO 7 EXTRAIT DU TABLEAU (SÉANCE 1) : LES SYMBOLES À APPRENDRE ET LES COULEURS ASSOCIÉES 194
PHOTO 8 UTILISATION DES MODÈLES MOLÉCULAIRES POUR LA MOLÉCULE DE DIOXYGÈNE 215
PHOTO 9 EXTRAITS DU TABLEAU : PUBLICITÉ DE PRODUITS COURANTS AVEC DES FORMULES CHIMIQUES (SÉANCE À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES) 350
PHOTO 10 EXTRAIT DU TABLEAU : LIEN ENTRE LE NOM ET LA FORMULE CHIMIQUE (SÉANCE À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES) 350
PHOTO 11 EXTRAIT DU TABLEAU : PROPOSITION DES ÉLÈVES À PARTIR DES LETTRES POUR L'ÉCRITURE DES FORMULES CHIMIQUES DE L'OXYDE DE CARBONE ET DU DIOXYDE DE CARBONE 351

Tableaux

TABLEAU 1 RÉPARTITION DES RÉPONSES, PAR NIVEAU D'ÉTUDE ET POUR L'ENSEMBLE, DANS CHAQUE CATÉGORIE 120
TABLEAU 2 RÉPONSES CORRECTES PAR NIVEAU D'ÉTUDE POUR CHAQUE NOM 124
TABLEAU 3 RÉPONSES CORRECTES PAR NIVEAU D'ÉTUDE POUR CHAQUE FORMULE 124
TABLEAU 4 RÉPONSES CORRECTES PAR NIVEAU D'ÉTUDE POUR CARBONE, DIOXYGÈNE ET EAU PUIS POUR C, O_2 ET H_2O 125
TABLEAU 5 COMPARAISON DES CRITÈRES MACROSCOPIQUES CHOISIS PAR LES ÉLÈVES ENTRE « DIOXYGÈNE » ET « DIOXYDE DE CARBONE » 134
TABLEAU 6 POURCENTAGE DE RÉPONSES PAR GROUPE INDIQUANT QUE LES FORMULES NE CORRESPONDENT PAS À LA MÊME MOLÉCULE DANS CHAQUE COUPLE 139
TABLEAU 7 RÉPONSES CORRECTES DONNÉES AUX ÉQUATIONS CONTENANT LA FORMULE CHIMIQUE ERRONÉE 140
TABLEAU 8 PROFILS D'ÉLÈVES ET D'ÉTUDIANTS DANS LEUR INTERPRÉTATION DES FORMULES CHIMIQUES OU DES ÉQUATIONS CHIMIQUES 141
TABLEAU 9 RÉPONSES CORRECTES À L'ÉQUATION CONTENANT LA FORMULE CHIMIQUE O PARMI LES ÉTUDIANTS QUI CONSIDÈRENT QUE O ET O2 SONT DIFFÉRENTES 141
TABLEAU 10 : POURCENTAGE DE RÉPONSES CORRECTES SUR L'ENSEMBLE, POUR L'EAU ET POUR L'ÉTHANOL. 143
TABLEAU 11 : MOTS-CLÉS OU TAGS CORRESPONDANT À DES REGROUPEMENTS DE MOTS PRONONCÉS PAR L'ENSEIGNANT OU LES ÉLÈVES 161
TABLEAU 12 LIEN ENTRE LES MOTS-CLÉS ET LES REGISTRES DE LA CHIMIE 164
TABLEAU 13 LIEN ENTRE LE NIVEAU DE LANGAGE ET LES MOTS-CLÉS 165
TABLEAU 14 : ITINÉRAIRE COMPARAISON DES DEUX SÉANCES 172
TABLEAU 15 ENSEMBLE DES TÂCHES PRESCRITES AU COURS DE LA SÉANCE 1 174
TABLEAU 16 ENSEMBLE DES TÂCHES PRESCRITES AU COURS DE LA SÉANCE 2 178
TABLEAU 17 CORRESPONDANCE DES COULEURS ET DES NIVEAUX OU REGISTRES DU TABLEAU 18 ET DU TABLEAU 19 202
TABLEAU 18 OCCURRENCE DES MOTS UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE (SÉANCE 1) 202
TABLEAU 19 OCCURRENCE DES MOTS UTILISÉS EN LIEN AVEC LES REGISTRES DE LA CHIMIE (SÉANCE 2) 202
TABLEAU 20 COMPARAISON DES ITINÉRAIRES DES DEUX SÉANCES 343
TABLEAU 21 ENSEMBLE DES TÂCHES PRESCRITES AU COURS DE LA SÉANCE RÉALISÉE À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES 344
TABLEAU 22 COMPARAISON DU NOMBRE ET DE LA DURÉE DES TÂCHES PRESCRITES 347
TABLEAU 23 COMPARAISON DES OBJECTIFS DES TÂCHES PRESCRITES 348

TABLE DES ANNEXES

ANNEXES DE 1 À 14 : PARTIE 2 409

ANNEXES 1 : PROGRAMMES 2008 DE CHIMIE AU COLLÈGE 410

Annexe 1.1 : Programme de 5ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008) 410
Annexe 1.2 : Programme de 4ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008) 412
Annexe 1.3 : Programme de 3ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008) 414

ANNEXES 2 : EXTRAITS D'OUVRAGES SCOLAIRES 417

Annexe 2.1 : Trois noms pour l'eau 417
Annexe 2.2 : Introduction des symboles et des premières formules chimiques 418
Annexe 2.3 : Langage symbolique implicite dans les exercices 420
Annexe 2.4 : L'équation chimique : macroscopique ou microscopique ?..... 421
Annexe 2.5 : Langage symbolique et histoire des sciences..... 423

ANNEXE 3 : QUESTIONNAIRE ÉLÈVES.....424

ANNEXES 4 : ENTRETIENS EXPLORATOIRES : PROTOCOLES ET TRANSCRIPTIONS 427

Annexe 4.1 : Protocole des entretiens au lycée Paul Éluard..... 427
Annexe 4.2 : Modification de la première partie du protocole d'entretien pour le lycée Branly 429
Annexe 4.3 : Transcriptions des entretiens exploratoires : première série d'entretiens 430
Annexe 4.4 : Transcriptions des entretiens exploratoires : deuxième série entretiens - 433

ANNEXES 5 : RÉSULTATS QUESTIONNAIRE ÉLÈVES 436

Annexe 5.1 : Résultats questions 2 et 3 : test du Khi2 436
Annexe 5.2 : Résultats questions 2 et 3 : choix des critères macroscopique ou microscopique..... 437
Annexe 5.3 : Résultats questions 2 et 3 : Test de Mc Nemar : critères macroscopiques 438
Annexe 5.4 : Résultats questions 2 et 3 : réponses correctes aux critères macroscopique ou microscopique 441
Annexe 5.5 : Résultats questions 2 et 3 : Test de Mc Nemar : critères microscopiques 442
Annexe 5.6 : Résultats questions 4 et 6 445
Annexe 5.7 : Réponses question 5 447

ANNEXE 6 : QUESTIONNAIRE ENSEIGNANT.....448

ANNEXE 7 : PRÉSENTATION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 1 (MATHIEU).....450

ANNEXE 8 : PRÉSENTATION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 2 (AUDE).....452

ANNEXE 9 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 1 (MATHIEU) 453

ANNEXE 10 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE « ORDINAIRE » 2 (AUDE).....474

ANNEXE 11 : DOCUMENTS DONNÉES AUX ÉLÈVES (SÉANCE 2 AUDE).....493

ANNEXE 12 : ENTRETIEN 1 AVEC MATHIEU 495

ANNEXE 13 : ENTRETIEN 2 AVEC AUDE 503

ANNEXE 14 : GRAPHES EN AIRE POUR L'ANALYSE DES SÉANCES.....508

ANNEXES DE 15 À 19 : PARTIE 3 509

ANNEXES 15 : ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE — AVANT LAVOISIER 510

Annexe 15.1 : La chimie en tant que science 510
Annexe 15.2 : La nomenclature avant Lavoisier 512
Annexe 15.3 : Les symboles avant Lavoisier 514

ANNEXES 16 : ÉLABORATION HISTORIQUE DU LANGAGE — LAVOISIER 518

Annexe 16.1 Les principes de la nouvelle classification 518
Annexe 16.2 Une nomenclature pour penser une nouvelle chimie 526
Annexe 16.3 : Une première tentative de nouveaux symboles 531

ANNEXES 17 : DALTON ET BERZELIUS 534

Annexe 17.1 : L'explosion des lois empiriques au début du XIXe siècle 534
Annexe 17.2 : Des formules s'appuyant sur des analyses quantitatives 538

ANNEXES 18 : LES ORGANICIENS 543

Annexe 18.1 La théorie des radicaux ou une vision dualistique en chimie organique 543
Annexe 18.2 La théorie des substitutions pour remplacer la vision dualistique 544
Annexe 18.3 La théorie des types 548

ANNEXES 19 : LES ÉQUIVALENTISTES.....550

Annexe 19.1 Table des équivalents chimiques des corps simples (Regnault, 1850) 550
Annexe 19.2 Méthode pour déterminer les équivalents (Pelouze & Fremy, 1854, p. 37) 551
Annexe 19.3 Recherche de la formule de l'acide benzoïque par un équivalentiste (Louyet, 1841, p. 93) 552

ANNEXES DE 20 À 29 : PARTIE 4 553

ANNEXE 20 : UNE PROPOSITION DE SÉQUENCE AVEC LES GAZ 554

ANNEXES 21 : LES EXTRAITS DE TEXTE HISTORIQUE DU SCÉNARIO 1 555

Annexe 21.1 : Première étape : introduction du modèle des atomes et choix des symboles pour le modèle atomique et première écriture d'équation chimique. 555
Annexe 21.2 : Deuxième étape : la formule d'une molécule et le modèle de la réaction chimique - écriture des formules des molécules, des espèces chimiques et d'une équation chimique. 558

ANNEXES 22 : LES DIALOGUES.....560

Annexe 22.1 : Dialogue 1 : formule des corps composés 560
Annexe 22.2 : Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (1ère partie)562
Annexe 22.3 : Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (2ère partie)564

ANNEXE 23 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE 3 À PARTIR DES TEXTES HISTORIQUES (MATHIEU) ..566

ANNEXE 24 : ENTRETIEN 3 AVEC MATHIEU 586

ANNEXES 25 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 3 (MATHIEU) 594

Annexe 25.1 Document 1 594
Annexe 25.2 Document 2 595

ANNEXE 26 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 4.1 (BENJAMIN) 596

ANNEXE 27 : DOCUMENTS DONNÉS AUX ÉLÈVES - SÉANCE 4.2 (BENJAMIN) 598

ANNEXE 28 : TRANSCRIPTION DE LA SÉANCE 4.1 À PARTIR DES DIALOGUES HISTORIQUES (BENJAMIN) 603

ANNEXE 29 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE QUATRIÈME.....613

ANNEXE 30 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE QUATRIÈME 617

ANNEXE 31 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE TROISIÈME.....638

ANNEXE 32 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE TROISIÈME 643

ANNEXE 33 : PROTOCOLE POUR LES ÉLÈVES DE SECONDE 667

ANNEXE 34 : TRANSCRIPTION DES ÉCHANGES : ÉLÈVES DE SECONDE 670

Annexes de 1 à 14 : Partie 2

Annexes 1 : Programmes 2008 de chimie au collège

Annexe 1.1 : Programme de 5ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008)

Physique-Chimie

CLASSE DE CINQUIÈME

Le programme est organisé en trois parties :

- L'eau dans notre environnement – Mélanges et corps purs (50%)
- Les circuits électriques en courant continu – Étude qualitative (25%)
- La lumière : sources et propagation rectiligne (25%)

A - L'eau dans notre environnement – Mélanges et corps purs

Cette partie propose un ensemble de notions essentiellement fondées sur l'observation et l'expérimentation. Sa finalité est de clarifier les notions de mélanges et de corps purs et de présenter les trois états de la matière et les changements d'état associés. Cette partie s'appuie sur l'étude de l'eau qui permet de travailler sur des sujets en relation avec leur environnement et de développer les thèmes de convergence : météorologie et climatologie, développement durable, énergie et sécurité.
Cette partie prolonge les acquis de l'école élémentaire, conforte et enrichit le vocabulaire (mélanges homogènes et hétérogènes…) ; elle développe les savoir-faire expérimentaux (manipulation d'une verrerie spécifique).

Connaissances	Capacités	Commentaires
L'EAU DANS NOTRE ENVIRONNEMENT : quel rôle l'eau joue-t-elle dans notre environnement et dans notre alimentation ?		
L'eau est omniprésente dans notre environnement, notamment dans les boissons et des organismes vivants. Test de reconnaissance de l'eau par le sulfate de cuivre anhydre.	Suivre un protocole donné pour mettre en évidence la présence d'eau dans différentes substances. Valider ou invalider l'hypothèse de la présence d'eau.	Pour les expériences avec le sulfate de cuivre anhydre, le port des lunettes est indispensable et l'utilisation de faibles quantités est fortement recommandée. **Thème de convergence** : météorologie et climatologie
MÉLANGES AQUEUX : comment obtenir de l'eau limpide ?		
Mélanges homogènes et hétérogènes. Décantation. Filtration.	Extraire des informations de l'observation d'un mélange. Réaliser un montage de décantation ou de filtration à partir d'un schéma. Faire le schéma d'un montage de décantation ou de filtration en respectant des conventions.	On peut approfondir le concept d'homogénéité en mettant en évidence son caractère relatif dans la mesure où l'aspect de la matière dépend de l'échelle d'observation. **Thème de convergence** : développement durable
L'eau peut contenir des gaz dissous. Test de reconnaissance du dioxyde de carbone par l'eau de chaux.	*Mettre en œuvre un protocole pour récupérer un gaz par déplacement d'eau.* Réaliser le test, le schématiser.	Le professeur précise que le dioxygène est également soluble dans l'eau.
MÉLANGES HOMOGÈNES ET CORPS PURS : un liquide d'aspect homogène est-il pur ? Une eau limpide est-elle une eau pure ?		
Une eau d'apparence homogène peut contenir des substances autres que l'eau. Mélanges et corps purs. Évaporation. *Chromatographie.*	Extraire les informations utiles de l'étiquette d'une eau minérale ou d'un autre document. Pratiquer une démarche expérimentale. *Suivre un protocole pour réaliser une chromatographie.* *Interpréter un chromatogramme simple.*	L'introduction de la molécule comme entité chimique est reportée en classe de quatrième. Ceci n'exclut pas que le professeur, s'il le juge pertinent, utilise dès la classe de cinquième la notion de molécule pour éclairer celle de corps pur. Le concept d'ion n'est abordé qu'en classe de troisième. **Thème de convergence** : développement durable
La distillation d'une eau minérale permet d'obtenir de l'eau quasi pure.	Présenter la démarche suivie lors d'une distillation, les résultats obtenus.	

Connaissances	Capacités	Commentaires
LES CHANGEMENTS D'ÉTAT DE L'EAU : que se passe-t-il quand on chauffe ou refroidit de l'eau (sous pression normale) ?		
Les trois états physiques de l'eau		
Propriétés spécifiques de chaque état physique de l'eau : - forme propre de l'eau solide (glace) ; - absence de forme propre de l'eau liquide ; - horizontalité de la surface libre de l'eau liquide ; - compressibilité et expansibilité de la vapeur d'eau qui occupe tout le volume offert.	Observer et recenser des informations relatives à la météorologie et à la climatologie. Identifier et décrire un état physique à partir de ses propriétés. Respecter sur un schéma les propriétés liées aux états de la matière.	**Thème de convergence** : météorologie et climatologie
Les changements d'état		
Cycle de l'eau.		**Thème de convergence** : météorologie et climatologie
Solidification, fusion, liquéfaction, vaporisation.	Réaliser, observer, schématiser des expériences de changements d'état.	**Thème de convergence** : météorologie et climatologie
Lors des changements d'état, la masse se conserve et le volume varie.	Pratiquer une démarche expérimentale pour mettre en évidence ces phénomènes.	
Un palier de température apparaît lors du changement d'état d'un corps pur.	Construire le graphique correspondant en appliquant des consignes. Contrôler, exploiter les résultats.	**Thème de convergence** *:* importance du mode de pensée statistique
L'augmentation de la température d'un corps pur nécessite un apport d'énergie. Les changements d'état d'un corps pur mettent en jeu des transferts d'énergie. Températures de changements d'état de l'eau sous pression normale.		**Thème de convergence** : énergie
Les grandeurs physiques associées		
Masse et volume. La masse de 1 L d'eau liquide est voisine de 1 kg dans les conditions usuelles de notre environnement. 1 L = 1 dm^3 ; 1 mL = 1 cm^3.	Associer les unités aux grandeurs correspondantes. Lire des mesures de masse et de volume. Choisir les conditions de mesures optimales (éprouvette graduée, balance électronique). Maîtriser les correspondances simples entre ces unités.	Le matériel de verrerie est évoqué au fur et à mesure de son utilisation. Les grandeurs masse volumique et concentration massique sont hors programme.
Température. Nom et symbole de l'unité usuelle de température : le degré Celsius (°C).	Repérer une température en utilisant un thermomètre, un capteur.	**Thème de convergence** : météorologie et climatologie
L'EAU SOLVANT : peut-on dissoudre n'importe quel solide dans l'eau (sucre, sel, sable...) ? Peut-on réaliser un mélange homogène dans l'eau avec n'importe quel liquide (alcool, huile, pétrole...) ?		
L'eau est un solvant de certains solides et de certains gaz. L'eau et certains liquides sont miscibles. Dissolution, miscibilité, solution, corps dissous *(soluté)*, solvant, *solution saturée*, soluble, insoluble, liquides miscibles et non miscibles, distinction entre dissolution et fusion.	Pratiquer une démarche expérimentale : dissolution de divers solides. *Suivre un protocole (ampoule à décanter).* Décrire une observation, une situation par une phrase correcte (expression, vocabulaire, sens).	**Thème de convergence** : *d*éveloppement durable
La masse totale se conserve au cours d'une dissolution.	Pratiquer une démarche expérimentale en lien avec cette propriété.	

Annexe 1.2 : Programme de 4ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008)

Physique-Chimie

CLASSE DE QUATRIÈME

Le programme est organisé en trois parties :

- De l'air qui nous entoure à la molécule (35%)
- Les lois du courant continu (35%)
- La lumière : couleurs, images, vitesse (30%)

A - De l'air qui nous entoure à la molécule

Cette partie a pour objet d'introduire dans un premier temps la molécule à partir de deux exemples : l'eau, déjà étudiée en classe de cinquième et l'air, abordé en classe de quatrième. Elle permet notamment de réinvestir les notions sur l'eau vues en classe de cinquième concernant la distinction entre mélanges et corps purs, les changements d'état et la conservation de la masse lors de ces changements d'état. Dans un second temps, elle conduit, en s'appuyant sur les combustions, à l'étude des transformations chimiques et à leur interprétation atomique.

Connaissances	Capacités	Commentaires
COMPOSITION DE L'AIR : de quoi est composé l'air que nous respirons ? Est-il un corps pur ?		
L'air est un mélange de dioxygène (environ 20 % en volume) et de diazote (environ 80 % en volume). Le dioxygène est nécessaire à la vie. *Distinction entre un gaz et une fumée.*	Extraire d'un document les informations relatives à la composition de l'air et au rôle du dioxygène.	**Thèmes de convergence** : développement durable, santé
VOLUME ET MASSE DE L'AIR : l'air a-t-il un volume propre ? A-t-il une masse ?		
L'état gazeux est un des états de la matière. Un gaz est compressible.	Proposer une expérience pour mettre en évidence le caractère compressible de l'air. Valider ou invalider une hypothèse.	
La pression est une grandeur qui se mesure avec un manomètre. *L'unité de pression SI est le pascal.*	*Mesurer une pression.*	
Un volume de gaz possède une masse. Un litre d'air a une masse d'environ un gramme dans les conditions usuelles de température et de pression.	Mesurer des volumes ; mesurer des masses. *Comprendre qu'à une mesure est associée une incertitude (liée aux conditions expérimentales).*	Les correspondances simples entre les unités ont été abordées en cinquième. Les calculs répétitifs de conversion sont à proscrire. **Thème de convergence** : météorologie et climatologie
UNE DESCRIPTION MOLÉCULAIRE POUR COMPRENDRE		
Un gaz est composé de molécules.	Percevoir la différence entre réalité et simulation. Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter : - la compressibilité d'un gaz ; - les différences entre corps purs et mélanges.	Le professeur limite la description à ce qui est nécessaire pour l'interprétation des phénomènes pris en compte.

Connaissances	Capacités	Commentaires
Les trois états de l'eau à travers la description moléculaire : - l'état gazeux est dispersé et désordonné ; - l'état liquide est compact et désordonné ; - l'état solide est compact ; les solides cristallins sont ordonnés.	Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter : - les différences entre les trois états physiques de l'eau ; - la conservation de la masse lors des changements d'état de l'eau ; *- la non compressibilité de l'eau.*	
Les mélanges à travers la description moléculaire.	*Argumenter en utilisant la notion de molécules pour interpréter :* *- la diffusion d'un gaz dans l'air ;* *- la diffusion d'un soluté dans l'eau (sucre, colorant, dioxygène…).* *Percevoir la différence entre réalité et simulation.*	On se limitera à des exemples de solutés moléculaires dans le cas de cette modélisation.
LES COMBUSTIONS : qu'est-ce que brûler ?		
La combustion du carbone nécessite du dioxygène et produit du dioxyde de carbone. La combustion du butane et/ou du méthane dans l'air nécessite du dioxygène et produit du dioxyde de carbone et de l'eau. Test du dioxyde de carbone : en présence de dioxyde de carbone, l'eau de chaux donne un précipité blanc.	Questionner, identifier un problème, formuler une hypothèse Mettre en œuvre un protocole expérimental. Observer, extraire les informations d'un fait observé. Exprimer à l'écrit ou à l'oral des étapes d'une démarche de résolution. Proposer une représentation adaptée. Suivre un protocole donné.	
Une combustion nécessite la présence de réactifs (combustible et *comburant*) qui sont consommés au cours de la combustion ; un (ou des) nouveau(x) produit(s) se forme(nt). Ces combustions libèrent de l'énergie.	Extraire d'un document (papier ou numérique) les informations relatives aux combustions.	**Thème de convergence :** énergie
Certaines combustions peuvent être dangereuses (combustions incomplètes, *combustions explosives*).	Extraire d'un document (papier ou numérique) les informations relatives aux dangers des combustions.	
LES ATOMES POUR COMPRENDRE LA TRANSFORMATION CHIMIQUE		
Lors d'une combustion, des réactifs disparaissent et des produits apparaissent : une combustion est une transformation chimique. Lors des combustions, la disparition de tout ou partie des réactifs et la formation de produits correspondent à un réarrangement d'atomes au sein de nouvelles molécules.	Exprimer par une phrase le passage des réactifs au(x) produit(s). Proposer une représentation adaptée (modèles moléculaires).	Le professeur limite la description à ce qui est nécessaire pour l'interprétation des phénomènes pris en compte. La manipulation des modèles moléculaires (désassemblage, assemblage) ne doit pas laisser croire qu'elle représente le mécanisme réactionnel.
Les atomes sont représentés par des symboles, les molécules par des formules (O_2, H_2O, CO_2, C_4H_{10} et/ou CH_4).	Communiquer à l'aide du langage scientifique. Utiliser une représentation adaptée : coder, décoder pour écrire les formules chimiques.	
L'équation de la réaction précise le sens de la transformation. Les atomes présents dans les produits (formés) sont de même nature et en même nombre que dans les réactifs.	Utiliser une représentation adaptée : coder, décoder pour écrire les équations de réaction. Présenter et expliquer l'enchaînement des étapes pour ajuster une équation chimique.	L'écriture d'équations de réactions est strictement limitée aux deux ou trois combustions étudiées. La mole (concept, grandeur et unité de quantité de matière) est hors programme.
La masse totale est conservée au cours d'une transformation chimique.	Participer à la conception d'un protocole ou le mettre en œuvre. Valider ou invalider une hypothèse.	

Annexe 1.3 : Programme de 3ème (Bulletin officiel spécial n° 6 du 28 août 2008)

Physique-Chimie

CLASSE DE TROISIÈME

Le programme est organisé en trois parties :

- La chimie, science de la transformation de la matière (45%)
- Énergie électrique et circuits électriques en « alternatif » (40%)
- De la gravitation à l'énergie mécanique (15%)

A - La chimie, science de la transformation de la matière

A1 – Conduction électrique

A1.1 - Conduction électrique et structure de la matière

Après avoir étudié dans les classes antérieures les propriétés du courant électrique dans les circuits, l'élève aborde ici la nature de ce courant. C'est d'abord dans les métaux que la nature du courant électrique est abordée puisque l'élève n'a utilisé que de tels conducteurs dans les circuits qu'il a construits ; cette notion est ensuite étendue aux solutions aqueuses.

Connaissances	Capacités	Commentaires
UTILISATION DES MÉTAUX DANS LA VIE QUOTIDIENNE : quels sont les métaux les plus couramment utilisés ?		
Les métaux les plus couramment utilisés sont le fer, le zinc, l'aluminium, le cuivre, l'argent et l'or.	*Observer, recenser des informations pour distinguer quelques métaux usuels et pour repérer quelques-unes de leurs utilisations.*	
L'ÉLECTRON ET LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES SOLIDES : tous les solides conduisent-ils le courant électrique ?		
Tous les métaux conduisent le courant électrique. *Tous les solides ne conduisent pas le courant électrique.* La conduction du courant électrique dans les métaux s'interprète par un déplacement d'électrons.	Pratiquer une démarche expérimentale afin de comparer le caractère conducteur de différents solides. Valider ou invalider une hypothèse sur le caractère conducteur ou isolant d'un solide.	
L'ION ET LA CONDUCTION ÉLECTRIQUE DANS LES SOLUTIONS AQUEUSES : toutes les solutions aqueuses conduisent-elles le courant électrique ?		
Toutes les solutions aqueuses ne conduisent pas le courant électrique. La conduction du courant électrique dans les solutions aqueuses s'interprète par un déplacement d'ions.	Pratiquer une démarche expérimentale afin de comparer (qualitativement) le caractère conducteur de l'eau et de diverses solutions aqueuses. Valider ou invalider une hypothèse sur le caractère conducteur ou isolant d'une solution aqueuse.	L'objectif des comparaisons de conduction électrique de l'eau et des solutions aqueuses n'est pas de constater la plus ou moins grande conduction en fonction des concentrations mais de permettre l'introduction de la notion d'ions en solution. Les risques d'électrocution ou d'électrisation dus à la conduction du courant électrique par l'eau du robinet (baignoire, fuites d'eau…) doivent être rappelés.
Constituants de l'atome : noyau et électrons. Structure lacunaire de la matière. Les atomes et les molécules sont électriquement neutres ; l'électron et les ions sont chargés électriquement.	Extraire d'un document (papier, multimédia) les informations relatives aux dimensions de l'atome et du noyau.	Il n'est pas demandé de donner la composition du noyau. La mémorisation des ordres de grandeur n'est pas exigible.
Le courant électrique est dû à : *- un déplacement d'électrons dans le sens opposé au sens conventionnel du courant dans un métal ;* *- des déplacements d'ions dans une solution aqueuse.*	*Observer, recenser des informations, à partir d'une expérience de migration d'ions.*	

A.1.2 - Quelques tests de reconnaissance d'ions

On retrouve ici la notion de test de reconnaissance appliquée à de nouvelles espèces chimiques souvent rencontrées dans ce programme. C'est l'occasion, en liaison avec la reconnaissance des ions hydrogène, d'introduire la notion de pH, premier pas dans l'étude de l'acido-basicité, en utilisant des produits d'utilisation courante.

Connaissances	Capacités	Commentaires
TESTS DE RECONNAISSANCE DE QUELQUES IONS : comment reconnaître la présence de certains ions en solution ?		
Formules des ions Na^+, Cl^-, Cu^{2+}, Fe^{2+} et Fe^{3+}.	Suivre un protocole expérimental afin de reconnaître la présence de certains ions dans une solution aqueuse. Faire un schéma.	L'écriture des équations de réaction correspondant à ces tests n'est pas au programme. Les tests ne sont pas à mémoriser.
Domaines d'acidité et de basicité en solution aqueuse.	Suivre un protocole expérimental afin de distinguer, à l'aide d'une sonde ou d'un papier pH, les solutions neutres, acides et basiques.	
Une solution aqueuse neutre contient autant d'ions hydrogène H^+ que d'ions hydroxyde HO^-. *Dans une solution acide, il y a plus d'ions hydrogène H^+ que d'ions hydroxyde HO^-.* *Dans une solution basique, il y a plus d'ions hydroxyde HO^- que d'ions hydrogène H^+.*	*Extraire des informations d'un fait observé et décrire le comportement du pH quand on dilue une solution acide.*	**Thèmes de convergence** : sécurité, développement durable
Les produits acides ou basiques concentrés présentent des dangers.	Identifier le risque correspondant, respecter les règles de sécurité.	

A.1.3 - Réaction entre le fer et l'acide chlorhydrique ; interprétation

Ce paragraphe permet d'aborder des réactions chimiques en milieu aqueux avec mise en jeu d'ions.

Connaissances	Capacités	Commentaires
RÉACTION ENTRE L'ACIDE CHLORHYDRIQUE ET LE FER : quels produits sont formés ?		
Les ions hydrogène et chlorure sont présents dans une solution d'acide chlorhydrique. Le fer réagit avec l'acide chlorhydrique, avec formation de dihydrogène et d'ions fer (II). Critères de reconnaissance d'une transformation chimique : disparition des réactifs et apparition de produits.	Suivre un protocole pour : - reconnaître la présence des ions chlorure et des ions hydrogène ; - réaliser la réaction entre le fer et l'acide chlorhydrique avec mise en évidence des produits. Faire un schéma.	Les demi-équations électroniques sont hors programme. La mise en évidence du dihydrogène sera réalisée sur une très petite quantité de gaz. À ce stade, le bilan de la réaction est écrit en toutes lettres : fer + acide chlorhydrique → dihydrogène + solution de chlorure de fer (II) **Thème de convergence** : sécurité

A.1.4 - Pile électrochimique et énergie chimique

De nombreux appareils courants (lampe de poche, télécommande, calculatrice, petits appareils domestiques tels que rasoirs, appareils photographiques, téléphones portables, outils de bricolage…) fonctionnent avec des piles électrochimiques ou avec des accumulateurs. Quelques notions d'énergie chimique sont donc proposées à ce niveau d'enseignement en se limitant aux piles électrochimiques.

Connaissances	Capacités	Commentaires
APPROCHE DE L'ÉNERGIE CHIMIQUE : comment une pile électrochimique peut-elle être une source d'énergie ?		
La pile est un réservoir d'énergie chimique. Lorsque la pile fonctionne, une partie de cette énergie est transférée sous d'autres formes. L'énergie mise en jeu dans une pile provient d'une réaction chimique : la consommation de réactifs entraîne l'usure de la pile.	Réaliser, décrire et schématiser la réaction entre une solution aqueuse de sulfate de cuivre et de la poudre de zinc : - par contact direct ; - en réalisant une pile.	La notion de couples oxydo-réducteur est hors programme. **Thème de convergence** : énergie

A2 - SYNTHÈSE D'ESPÈCES CHIMIQUES

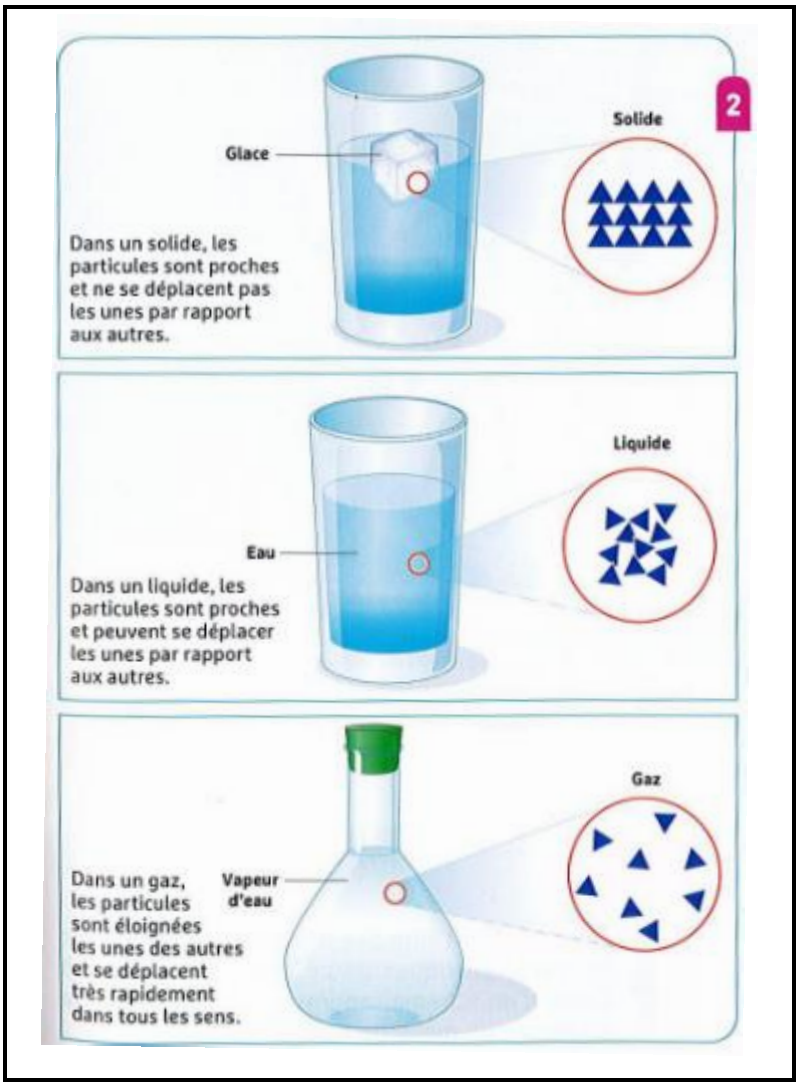
Un des objectifs premiers de la chimie est de produire de nouvelles espèces chimiques à partir d'autres ; les notions de corps pur, de transformation chimique, de réactifs et de produits sont ainsi réinvesties. Les élèves doivent avoir pris conscience, à la sortie du collège, que la chimie a aussi un caractère novateur qui consiste :

- soit à synthétiser des espèces chimiques déjà existantes dans la nature, afin d'en abaisser le coût et/ou d'en garantir la disponibilité ;
- soit à créer des espèces chimiques n'existant pas dans la nature, afin de répondre à des besoins.

Connaissances	Capacités	Commentaires
SYNTHÈSE D'UNE ESPÈCE CHIMIQUE EXISTANT DANS LA NATURE : comment synthétiser l'arôme de banane ?		
Il est possible de réaliser la synthèse d'espèces chimiques déjà existantes dans la nature.	Suivre le protocole de la synthèse, effectuée de manière élémentaire de l'acétate d'isoamyle. Identifier les risques correspondants, respecter les règles de sécurité.	La synthèse d'un arôme peut être réalisée de façon élémentaire par les élèves et de façon plus élaborée par l'enseignant.
CRÉATION D'UNE ESPÈCE CHIMIQUE N'EXISTANT PAS DANS LA NATURE : comment créer de nouvelles espèces chimiques ?		
Il est possible de réaliser la synthèse d'espèces chimiques n'existant pas dans la nature. *Le nylon® comme les matières plastiques sont constitués de macromolécules.*	*Suivre le protocole permettant de réaliser la synthèse du nylon® ou d'un savon.* Identifier les risques correspondants, respecter les règles de sécurité.	**Thèmes de convergence** : sécurité, santé

Annexes 2 : Extraits d'ouvrages scolaires

Annexe 2.1 : Trois noms pour l'eau

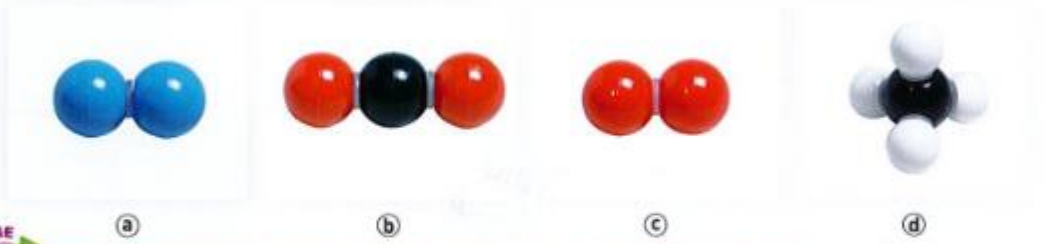


Trois noms pour l'espèce chimique « eau » en fonction de son état (É. Donadei, 2017, p. 17)

Annexe 2.2 : Introduction des symboles et des premières formules chimiques

Situation

La matière est constituée à partir d'une centaine d'atomes différents qui, très souvent, s'associent en petites structures appelées molécules. Yacine et Lou disposent de modèles moléculaires grâce auxquels ils représentent ces molécules. Ils construisent ainsi les quatre modèles suivants :



CONSIGNE **Retrouver la composition des molécules représentées par Yacine et Lou, et en déduire leur formule chimique.**

1 Modèles et symboles de 4 atomes très répandus dans la nature.

Nom	Modèle	Symbole
Hydrogène		H
Oxygène		O
Carbone		C
Azote		N

2 Exemples de modèles moléculaires.

a Molécule de dihydrogène composée de 2 atomes d'hydrogène.

b Molécule d'eau composée de 2 atomes d'hydrogène et d'1 atome d'oxygène.

3 Comment écrire une formule ?

La formule d'une molécule indique quels atomes constituent la molécule et précise leur nombre, écrit en indice à droite du symbole correspondant.

Symbole de l'hydrogène — H_2 — 2 atomes d'hydrogène

Symbole de l'hydrogène — H_2O — Symbole de l'oxygène; 2 atomes d'hydrogène; 1 atome d'oxygène (indice 1 non précisé)

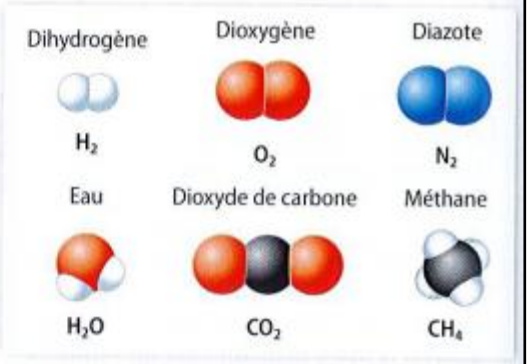
Activités : qu'est-ce qu'une molécule ? (Collectif & Meneret, 2017, p. 98)

Molécules et atomes

Voir activités 1 et 2

- Un **atome** est représenté par une sphère colorée. À chaque atome est également associé un **symbole chimique**.
- L'ensemble des atomes est répertorié dans un tableau appelé la **classification périodique des éléments**.
- Une **molécule** est constituée d'un **ensemble d'atomes** (au moins deux) **liés entre eux**. On la représente en tenant compte de sa composition, c'est-à-dire de la nature et du nombre d'atomes qui la composent.
- Une molécule possède une **formule chimique** qui renseigne sur sa composition.

Représentations et symboles chimiques des atomes.



Représentations et formules chimiques de quelques molécules.

Bilan : molécules et atomes (Daujean & Massa, 2017, p. 164)

Annexe 2.3 : Langage symbolique implicite dans les exercices

33 **Essence et combustions**

Quand on achète de l'essence pour remplir le réservoir de sa voiture, on a le choix entre plusieurs types d'essence.

Il est indiqué un indice d'octane : 95 ou bien 98.

L'octane est le constituant principal de l'essence, sa formule est C_8H_{18}.

Lors de la combustion complète de 2 molécules d'octane avec 25 molécules de dioxygène, les atomes des réactifs se réarrangent pour former 18 molécules d'eau et 16 molécules de dioxyde de carbone.

1. Quels sont les réactifs qui permettent au moteur automobile de fonctionner ?

2. Quels sont les produits qui sont alors formés ?

3. a. Parmi les équations de réaction suivantes, quelle est celle qui correspond à cette combustion ?

- $C_8H_{18} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$
- $2\ C_8H_{18} + 25\ O_2 \rightarrow 16\ CO_2 + 18\ H_2O$
- $2\ C_8H_{18} + 25\ O_2 \rightarrow 18\ CO_2 + 16\ H_2O$
- $2\ C_8H_{18} + 25\ N_2 \rightarrow 16\ CO_2 + 18\ H_2O$

b. Vérifier que l'équation est bien ajustée.

19 **Hilarant mais dangereux pour l'environnement**

Le gaz hilarant est un gaz incolore, à l'odeur et au goût un peu sucrés. Il est utilisé par les dentistes comme anesthésiant, mais aussi comme comburant pour augmenter la puissance des moteurs en compétition automobile. C'est aussi un gaz à effet de serre (GES). Il contient de l'azote.

1. Donner le symbole de l'azote.

2. Donner la formule du diazote.

3. Le diazote est-il un atome ou une molécule ?

4. Où peut-on trouver le diazote ?

5. Dessiner le modèle du dioxyde d'azote et donner sa formule.

6. Le gaz hilarant est une molécule qui a pour nom le protoxyde d'azote. Écrire sa formule d'après son modèle :

Un langage implicite : exemples d'exercices (Collectif & Meneret, 2017, p. 113 et 115)

16 **Avec ou sans sucre ?**
Extraire l'information utile

Pour limiter l'apport calorique du saccharose (sucre de table), on peut trouver d'autres sortes de sucre.

Sucre blanc	Sucre de synthèse	Sucre de bouleau
saccharose	*aspartame*	*xylithol*
$C_{12}H_{22}O_{11}$	$C_{14}H_{18}N_2O_5$	$C_5H_{12}O_5$

En justifiant, nomme la molécule qui possède :

a. le plus grand nombre d'atomes de carbone.

b. des atomes d'azote.

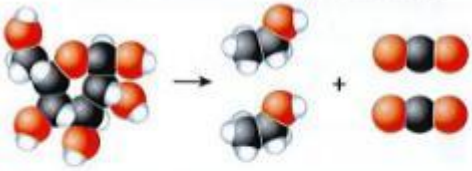
c. le plus petit nombre d'atomes.

14 **Une transformation enivrante**
Interpréter grâce à un modèle

Histoire des sciences

Depuis l'Antiquité, les boissons alcoolisées sont obtenues par fermentation des fruits. On sait aujourd'hui que la transformation chimique du glucose (sucre) permet d'obtenir l'éthanol (alcool de consommation). Le bilan est le suivant :

Glucose → Éthanol + Dioxyde de carbone



a. Quel est le réactif ? Écris sa formule chimique.

b. Identifie les produits. Écris leurs formules chimiques.

c. Combien de molécules d'éthanol sont obtenues à partir d'une molécule de glucose ?

d. Écris l'équation ajustée de la réaction.

Un langage implicite : exemples d'exercices (Daujean & Massa, 2017, p. 170 et 103)

Annexe 2.4 : L'équation chimique : macroscopique ou microscopique ?

4 Ajuster une équation de réaction

Au cours d'une transformation chimique, les atomes présents dans les réactifs se réorganisent pour former les produits.

▶ **Comment l'équation de la réaction rend-elle compte de la conservation des atomes ?**

Doc. 1

Objet 3D — La molécule de méthane — hatier-clic.fr/pca022

La combustion du méthane (CH_4)

Certaines chaudières utilisent la combustion du méthane (ou gaz de ville) pour obtenir de l'énergie thermique. Cette énergie permet de chauffer l'eau qui circule ensuite dans les radiateurs. Le méthane et le dioxygène (de l'air) sont consommés et de la vapeur d'eau et dioxyde de carbone sont formés.

Le bilan de la réaction s'écrit :

Méthane + Dioxygène ⟶ Dioxyde de carbone + Eau

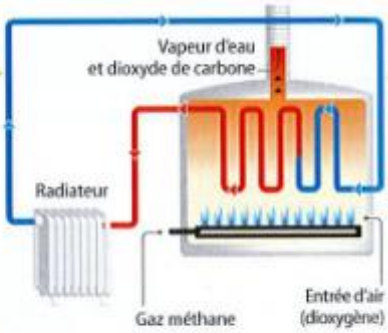


Fig. 1 : Principe d'une chaudière au méthane.

Doc. 2

Objet 3D — La combustion complète du méthane — hatier-clic.fr/pca023

L'équation de la réaction

On modélise une transformation chimique (Fig. 2).

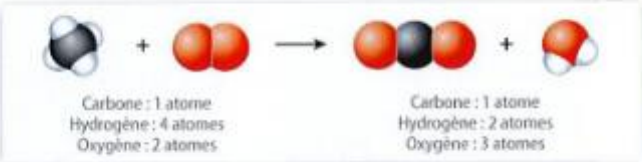


Fig. 2 : La conservation des atomes n'est pas respectée.

Il faut veiller à la conservation des atomes (Fig. 3) pour rendre compte de la conservation de la masse.

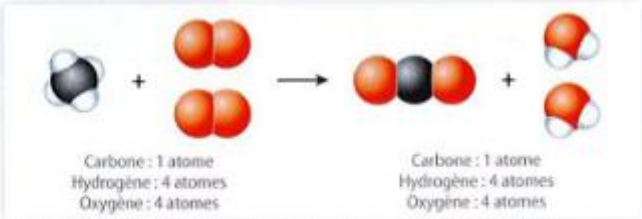


Fig. 3 : La conservation des atomes est respectée.

On ajuste l'équation de réaction en plaçant si nécessaire des coefficients devant les formules chimiques.

Réactifs				Produits		
CH_4	+	$2\,O_2$	⟶	CO_2	+	$2\,H_2O$

Questions

Comprendre

1. Nomme les réactifs et les produits de la combustion du méthane.

Raisonner

2. Pourquoi la modélisation de la figure 2 n'est-elle pas correcte ?
3. Lors de la combustion d'une molécule de méthane, combien de molécules de dioxygène disparaissent ? Combien de molécules d'eau sont produites ?
4. Quel coefficient est sous-entendu devant la formule chimique du dioxyde de carbone (CO_2) ?

Conclure

5. Pourquoi est-il parfois nécessaire de mettre des coefficients dans une équation de réaction ?

Un niveau implicite pour l'équation chimique (Daujean & Massa, 2017, p. 162)

8 Comment décrire une transformation chimique ?

D1.3 Passer d'une forme de langage scientifique à une autre.

Situation

Le carbone et l'hydrogène sont parmi les atomes les plus abondants sur la planète. On les retrouve dans de nombreuses transformations chimiques.

Le foyer d'un barbecue à charbon

Quand les beaux jours reviennent et qu'on allume son barbecue, le foyer du barbecue est le lieu de la transformation suivante : des molécules de dioxyde de carbone se forment après redistribution des atomes du carbone et des molécules de dioxygène.

Les dangers du monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est un gaz extrêmement dangereux qui se forme lors de combustions incomplètes. Deux molécules de monoxyde de carbone se forment après redistribution des atomes qui constituaient le carbone et des molécules de dioxygène.

Le lanceur Ariane et son moteur Vulcain

Le lanceur Ariane possède un moteur Vulcain. Le dihydrogène et le dioxygène stockés dans des réservoirs sont acheminés jusqu'au moteur Vulcain où les atomes de deux molécules de dihydrogène et d'une molécule de dioxygène se trouvent redistribués en deux molécules d'eau.

CONSIGNE **Associer chacune des expériences précédentes à l'équation de réaction qui lui correspond :**

- $2\,C + O_2 \rightarrow 2\,CO$
- $C + O_2 \rightarrow CO_2$
- $2\,H_2 + O_2 \rightarrow 2\,H_2O$
- $H_2 + 2\,O_2 \rightarrow 2\,H_2O$
- $C + O_2 \rightarrow 2\,CO$

ANI > Entrainez-vous à équilibrer des équations de réaction.

Un niveau implicite pour l'équation chimique (Collectif & Meneret, 2017, p. 103)103

Annexe 2.5 : Langage symbolique et histoire des sciences

Histoire des sciences

Air vital ?

Au XVIIIe siècle, des expressions formées à partir du mot « air » désignaient les gaz. Par exemple, « l'air vital », « l'air déphlogistiqué » ou « l'air du feu de Scheele » désignaient le dioxygène. Ces nombreux noms rendaient les comparaisons entre les écrits des savants très difficiles.

Dans un ouvrage paru en 1787, les chimistes français Antoine Lavoisier, Claude Bertholet, Antoine-François Foucroy et Louis-Bernard Guyton-Morveau ont proposé une nouvelle façon pour nommer les substances. Plusieurs de ces noms sont encore utilisés aujourd'hui. Voici par exemple une réaction chimique décrite au XVIIIe siècle : « Quand on a vu former l'air fixe par la combinaison du charbon pur et de l'air vital, à l'aide de la combustion, le nom de cet acide gazeux [...] dérive nécessairement de son radical, qui est la pure matière charbonneuse ; c'est donc l'acide carbonique. ».

	Noms nouveaux.	*Noms anciens correſpondans.*
Subſtances ſimples qui appartiennent aux trois règnes & qu'on peut regarder comme les élémens des corps.	Lumière.....	Lumière.
	Calorique.....	Chaleur. Principe de la chaleur. Fluide igné. Feu. Matière du feu & de la chaleur.
	Oxygène.....	Air déphlogiſtiqué. Air empiréal. Air vital. Baſe de l'air vital.
	Azote.....	Gaz phlogiſtiqué. Moſete. Baſe de la moſete.
	Hydrogène.....	Gaz inflammable. Baſe du gaz inflammable.

Les noms de quelques gaz proposés par les savants en 1787.

Questions

1. Au XVIIIe siècle quelles étaient les expressions employées pour désigner le dioxygène ?
2. Explique pourquoi il était difficile de comparer les écrits des savants au XVIIIe siècle.
3. Écris le bilan de la combustion donnée en exemple dans le texte, avec les noms utilisés au XVIIIe siècle, puis avec les noms actuels.

Un exercice en lien avec l'histoire des sciences (E. Donadei et al., 2011, p. 62)

Annexe 3 : Questionnaire élèves

Enquête sur les représentations utilisées en chimie

Ce questionnaire n'est pas un contrôle. Il est anonyme. Il s'agit d'une enquête dans le cadre d'un travail de recherche visant à mieux connaître ce que vous comprenez. Ne cherchez pas à donner la « bonne » réponse. Pour nous la « bonne » réponse est « ce que vous pensez » réellement !

Classe : Nom de l'établissement :

1- A partir de certains noms de la liste ci-dessous, pouvez-vous faire des catégories ? Si oui, nommez vos catégories et indiquez les noms de la liste que vous placez dedans.
Liste de noms : **air ; carbone ; cyclohexane ; charbon ; peroxyde d'hydrogène ; pétrole ; dioxyde de carbone ; lait ; méthane**

……

……

……

2- Indiquez ce que chaque nom représente pour vous (vous pouvez cocher une ou plusieurs réponses par ligne) :

Dioxygène :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Eau :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Cyclohexane :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Charbon :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Méthane :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Carbone :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Pétrole :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
Dioxyde de carbone :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐

3- Indiquez ce que chaque formule ou chaque symbole représente pour vous (vous pouvez cocher une ou plusieurs réponses par ligne) :

O_2 :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	ne sais pas ☐
H_2O :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	nsp ☐

C :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	nsp ☐
CO_2 :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	nsp ☐
C_2H_6O :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	nsp ☐
Fe :	Corps pur ☐	Mélange ☐	Molécule ☐	Atome ☐	nsp ☐

4- A votre avis, ces formules brutes correspondent-elles à la même molécule ?

H_2O et H_2O_2 oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : ……

……

O et O_2 oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : ……

……

CH_4 et C_2H_8 oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : ……

……

5- On vous propose plusieurs formules brutes pour la même molécule. A votre avis, les formules brutes proposées sont-elles correctes ?

Molécule d'eau :

H_2O oui ☐ non ☐ nsp☐ **OH_2** oui ☐ non ☐ nsp ☐ **HOH** oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : ……

……

……

Molécule d'éthanol : **C_2H_6O** oui ☐ non ☐ nsp ☐ **C_2H_5OH** oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : ……

……

……

6- L'eau peut se décomposer en dihydrogène et dioxygène. On interprète cela par une réaction chimique qu'on représente par deux équations. A votre avis, ces équations sont-elles correctes ?

$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ oui ☐ non ☐ nsp ☐

$H_2O \rightarrow H_2 + O$ oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : …….

…….

…….

Le méthane et le dioxygène peuvent réagir pour donner du dioxyde de carbone et de l'eau. On vous donne à nouveau deux équations. A votre avis, sont-elles correctes ?

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_4O_2$ oui ☐ non ☐ nsp ☐

$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$ oui ☐ non ☐ nsp ☐

Explication : …….

…….

…….

7- Savez-vous si les chimistes ont autrefois utilisé des symboles différents des lettres pour représenter les atomes ? Et si oui lesquels ? oui ☐ non ☐ nsp ☐

…….

…….

…….

Annexes 4 : Entretiens exploratoires : protocoles et transcriptions

Annexe 4.1 : Protocole des entretiens au lycée Paul Éluard

Première partie : autour de la signification de la formule brute

Sur feuille à donner aux deux élèves :

Que représente C pour vous ?		
l'atome de carbone ?	oui ☐	non ☐
la molécule de carbone ?	oui ☐	non ☐
du graphite ?	oui ☐	non ☐
les trois	oui ☐	non ☐

Faire échanger les élèves à partir de leurs réponses puis leur donner la question suivante sur feuille :

Que représente C pour vous dans l'équation suivante : $C + O_2 \rightarrow CO_2$?

Suivant leurs réponses poser la question pour O_2 et CO_2 et poser éventuellement la question ci-dessous en leur montrant l'équation :

Si la même réaction est notée comme ci-dessous, est-ce que cela change quelque chose pour vous ?
$C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$

Deuxième partie : compréhension du concept véhiculé par la formule brute

Montrer aux élèves la question sur feuille et les faire échanger à partir de leurs réponses.

L'eau peut se décomposer en dihydrogène et dioxygène. On vous propose ci-dessous deux équations représentant cette réaction. Quelle est à votre avis l'équation correcte et pourquoi ?
$H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2$ ou $H_2O \rightarrow O + H_2$

Troisième partie : capacité à décrypter une formule brute

Montrer aux élèves la question sur feuille et les faire échanger à partir de leurs réponses.

Ces formules de molécules sont-elles identiques ?		
H_2O et H_2O_2	oui ☐	non ☐

Montrer aux élèves la question sur feuille et les faire échanger à partir de leurs réponses.

- Pour quelle(s) raison(s) la formule de l'eau s'écrit H_2O et non OH_2 ou HOH ?

Montrer aux élèves la question sur feuille et les faire échanger à partir de leurs réponses.

Ces formules de molécules sont-elles identiques ?		
C_2H_6O et C_2H_5OH	oui ☐	non ☐

Quatrième partie : les règles

On pose aux élèves les deux questions-ci-dessous :

- A votre avis pour quelle(s) raison(s) utilise-t-on des lettres pour représenter les atomes ?

- Est-ce que l'on aurait pu utiliser d'autres symboles ? Auriez-vous des propositions ?

Annexe 4.2 : Modification de la première partie du protocole d'entretien pour le lycée Branly

Première partie : autour de la signification de la formule brute

Montrer aux élèves la question ci-dessous et les faire échanger les élèves sur leurs réponses

À partir de cette liste de 15 noms : le carbone, le butane, l'eau, la limonade, le dioxyde de carbone, le sucre, l'oxyde de fer, l'eau de chaux, le magnésium, le diazote, le fer, le lait, le dioxygène, le tartre, le méthane. Pouvez-vous faire des catégories avec ces noms et si oui lesquelles, comment et pourquoi ?

Puis donner aux deux élèves en même temps la question suivante sur une feuille

Que représente C pour vous dans l'équation suivante : $C + O_2 \rightarrow CO_2$?

Et suivant leurs réponses poser la question pour O_2 et CO_2 et poser éventuellement la question ci-dessous (écrite sur une feuille) :

Si la même équation est notée comme ci-dessous, est-ce que cela change quelque chose pour vous ? $C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$

Annexe 4.3 : Transcriptions des entretiens exploratoires : première série d'entretiens

Entretiens au Lycée Paul Éluard à Saint-Denis – Trois groupes de deux élèves

Questions	**Résumés des réponses des élèves et transcription de certaines réponses**[53]
Première partie	
Que représente C pour vous ?	Les élèves ne voient pas ce qu'ils doivent dire. Les réponses sont dans les trois entretiens : « *c'est le carbone* » ou ils indiquent la vitesse de la lumière qu'ils ont vu la veille.
Que représente C pour vous dans l'équation suivante : $C + O_2 \rightarrow CO_2$?	Réponse élèves pour les trois entretiens « *C c'est le carbone* ». Ils ont plus envie de s'exprimer sur le dioxyde de carbone ou le dioxygène que sur le symbole C
Si la même équation est notée comme ci-dessous, est-ce que cela change quelque chose pour vous ? $C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	Ils n'ont jamais vu les symboles (s) et (g) !
Deuxième partie	
L'eau peut se décomposer en dihydrogène et dioxygène. On vous propose ci-dessous deux équations représentant cette réaction. Ces équations sont-elles correctes $2\ H_2O \rightarrow O_2 + 2\ H_2$ ou $H_2O \rightarrow O + H_2$?	Pour cinq élèves sur six, seule la deuxième équation est la bonne. **Entretien 1** : Pour un des deux élèves la 1ère équation est correcte mais il propose une raison incorrecte. E1 : « *car **2**H_2O donne H_2* » Pour le deuxième élève, la deuxième partie de la réaction doit représenter ce qu'il y a dans la première partie. E2 : « *et là le O_2, il est à pas présent dans la molécule d'eau on a O* » **Entretien2** Pour E1 la 1ère équation est fausse car : E1 : « on a un atome d'oxygène dans H_2O et deux dans O_2. » Mais l'élève se rend compte que la molécule change entre les deux équations : E1 : « *O et O_2 cela change la composition de la molécule* » Mais elle garde quand même la deuxième équation comme correcte. E2 refuse le 2 devant le H_2O ou le H_2 E2 : « *parce que l'on dit H_2O et pas $2H_2O$* » **Entretien 3** Pour E1, il faut que les deux parties de l'équation coïncide parfaitement. E1 : « *La deuxième car c'est H_2O donc on a deux hydrogènes plus un oxygène. […] le truc c'est que H_2 deux hydrogène est inversé normalement. Pour moi cela serait $H_2 + O$* » Pour E2, comme on indique que l'eau peut se décomposer, la 1ère équation ne peut pas être la bonne et pour lui aussi il faut également que les deux parties coïncident parfaitement. E2 : « *La première au final c'est pas la même chose. H_2O ou $2H_2O$ c'est pas la même chose. H_2O c'est la formule initiale alors que*

[53] Dans la transcription des échanges, E représente un élève et C le chercheur.

	l'autre c'est comme si on avait deux fois H_2O […] le O_2 il est à l'envers car on les met dans le même ordre »
$H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2$ ou $H_2O \rightarrow O + H_2$	Les six élèves refusent l'écriture avec le 1/2 car cela revient à couper la molécule
Troisième partie	
Ces formules de molécules sont-elles identiques ? H_2O et H_2O_2	Pour l'ensemble des élèves, les molécules ne sont pas identiques.
Pour quelle(s) raison(s) la formule de la molécule d'eau s'écrit H_2O et non OH_2 ou HOH ?	**Entretien 1** E1 : *« d'habitude on écrit H_2O mais OH_2 c'est bizarre et HOH pas possible »* E2 : *« c'est comme dans les divisions quand on met un chiffre fort et un chiffre faible et que l'on inverse ce n'est pas pareil »* **Entretien 2** E1 : *« HOH OK on aurait pu le faire, OH_2 non je ne pense pas. H_2O c'est la formule initiale. OH_2 non sinon on aurait dit 2O et2H. dans OH_2 on a deux molécules d'oxygène et deux molécules d'hydrogène. »* **Entretien 3** E1 : *« On ne peut pas noter OH_2 pas possible parce que cela change la composition de la molécule parce qu'il y aurait eu deux hydrogène d'un côté" […] on va perdre le lien. […] dans OH_2 on met l'oxygène en premier et les deux hydrogènes ensuite donc ce n'est pas pareil »* E2 : *« C'est une question de poids"* E1 : *"c'est une question du nombre d'atomes. HOH est impossible car on n'a pas les nombres. Comme il n'y a pas de valeur on va penser que c'est 1 […] Si finalement c'est possible »*
Ces formules de molécules sont-elles identiques ? C_2H_6O et C_2H_5OH	Les réponses sont plus longues à venir et les avis sont partagés. **Entretien 1** E1 : *« la première écriture semble correct et pas la deuxième »* E2 : *« on dirait qu'il y a un H qui est séparé des autres »* **Entretien 2** E1 : *« je ne comprends pas. Dans la première molécule il y a 6 molécules d'hydrogène et dans la deuxième il y a OH à côté. […] Il n'y a qu'une façon d'écrire les formules »* E2 : *« Si on a OH cela veut dire qu'il y a une molécule d'hydrogène qui est rajouté en plus des 5 hydrogène. […] En fait cela revient à la même chose si on additionne les H »* **Entretien 3** : E1 : *« les molécules sont différentes »* E2 : *« il y a une notation que l'on a toujours utilisée en cours. Cela ne change pas la composition mais on l'a jamais utilisée. »*
Quatrième partie :	
- À votre avis pour quelle(s) raison(s) utilise-t-on des lettres pour représenter les atomes ?	**Entretien 1** E : *« C'est plus facile une lettre, plus facile à retenir au lieu d'un nombre »* **Entretien 2** E : *« c'est les lettres depuis toujours »* **Entretien 3**

- Est-ce que l'on aurait pu utiliser d'autres symboles ? Auriez-vous des propositions ?	E : « parce qu'il y en a beaucoup et c'est plus facile à retenir » **Entretien 1** E1 : *« C pour carbone et Ca pour calcium car on utilise plus le carbone »* **Entretien 2** E1 : *« On aurait pu utiliser des formes géométriques et cela aurait pu exister »* E2 : *« Ça fait directement référence à leur nom »* **Entretien 3** E1 : *« On peut mettre autre chose mais il faut que cela parle à tout le monde »* E2 : *« On pourrait utiliser un code couleur ou des chiffres »*

Annexe 4.4 : Transcriptions des entretiens exploratoires : deuxième série entretiens -

(Entretiens au Lycée Branly à Nogent sur Marne – Deux groupes de deux élèves)

Première partie	
Vous avez une liste de 15 noms : le carbone, le butane, l'eau, la limonade, le dioxyde de carbone, le sucre, l'oxyde de fer, l'eau de chaux, le magnésium, le diazote, le fer, le lait, le dioxygène, le tartre, le méthane. Pouvez-vous faire des catégories avec ces noms et si oui lesquelles, comment et pourquoi ?	**Entretien 1 :** E1 utilise le nom pour extraire des informations sur le composé. E2 propose une catégorisation solide, liquide ou gaz mais va reprendre les propositions de E1. E1 : *« d'abord carbone, dioxyde de carbone, diazote, dioxygène (réfléchi) puis l'eau, le lait, la limonade parce que c'est des boissons de tous les jours (il réfléchit) après je ne sais pas le sucre, le fer, le magnésium (il réfléchit) Certains mots sont composés d'autres mots. Par exemple dans le lait c'est composé du magnésium. Y a des mots, il y en a d'autres, il y a des mots ils sont plus global peut-être […] par exemple le dioxyde de carbone c'est vraiment un zoom sur le dioxyde de carbone alors que le lait il a plusieurs composants »* E2 : *« et la limonade pareil. On dit la limonade alors qu'il y a du gaz… »* C : « et si je prends le carbone et le magnésium ? » E2 : *« du coup c'est plus précis moins global »* C : « et l'eau c'est dans quelle catégorie ? » E2 : *« je sais pas. Il peut y avoir du magnésium dans l'eau ? »* E1 : *« il peut y avoir plusieurs eaux ; l'eau du robinet »* E2 : *« ça dépend des eaux »* E1 : *« oui il y a l'eau en bouteille ça dépend »* E2 : *« il y en a qui n'en n'ont pas eau minérale ou pas. On voit c'est global l'eau »* C : « et donc si je compare les noms limonade et dioxyde de carbone, est-ce du même niveau ? » E1 : *« quand on dit dioxyde de carbone on a vraiment l'impression de classer quelque chose de désigner un élément alors que quand on dit limonade (il réfléchit) »* C : « Et est-ce que le nom dioxyde de carbone cela vous apprend des choses sur ce gaz ? » E1 : *« il est composé de carbone »* E2 : *« c'est ce que j'allais dire il a une molécule précise »* E1 : *« si on s'y connaît un peu en décomposant les mots on voit leurs éléments alors que limonade je ne pense pas que l'on voit grand-chose »* E2 : *« la limonade par exemple elle a beaucoup de composants alors que le dioxyde de carbone son symbole c'est C alors que la limonade il y aura plusieurs atomes »* E1 : *« dans leur nom on voit plus ce qui les compose »* **Entretien 2** Les deux élèves proposent plusieurs classements possibles : un à partir des états de la matière ; un correspondant à « naturel » ou pas ; un classement en fonction de la composition et de la

	présence ou non de certains atomes (ceux qui ont un hydrogène par exemple) E1 parle de formule « *chimique chimique* » pour l'eau de chaux. E1 : *« eau de chaux également chimique chimique car pas naturel on ne le voit qu'en chimie ou en TP »* Les noms peuvent aussi donner des informations sur la composition. E2 : *« avec l'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone on connaît leur composition à partir du nom »*
Que représente C pour vous dans l'équation suivante : $C + O_2 \rightarrow CO_2$?	**Entretien 1 :** E2 : *« Cela représente le carbone à côté c'est l'oxygène mais le deux je ne sais pas ce que c'est […] O_2 en général c'est le dioxygène […] le deux ça fait du dioxygène »*
Si la même équation est notée comme ci-dessous, est-ce que cela change quelque chose pour vous ? $C(s) + O_2(g) \rightarrow CO_2(g)$	Cela leur semble à tous très compliqué. Spontanément ils ne font pas le lien avec gaz et solide. Puis quand on leur rappelle qu'ils ont proposé une catégorie « gaz, liquide, solide », les élèves associent alors les lettres aux états de la matière mais cela ne leur semble pas présenter d'intérêt car au final il n'y a plus que des molécules et des atomes. **Entretien 2** E1 : *« ah oui cela veut dire gaz, liquide et solide mais je ne le voyais pas comme ça. A l'oral, on les classe en gaz, solide liquide mais après quand c'est plus le cours comme cela on approfondit et au final c'est une notion qui sera un peu loin. Ce n'est plus que des molécules et des atomes »* C : « donc il n'y a plus de gaz, de solide et de liquide » E1 : *« Non ce n'est plus que des lettres que l'on assemble »*
Deuxième partie	
L'eau peut se décomposer en dihydrogène et dioxygène. On vous propose ci-dessous deux équations représentant cette réaction. Ces équations sont-elles correctes $2\ H_2O \rightarrow O_2 + 2\ H_2$ ou $H_2O \rightarrow O + H_2$	**Entretien 1 :** E1 hésite. Il pense que les équations sont équivalentes puis très vite ne conserve que la 2ème E1 : *« La première est fausse car on a un atome d'oxygène dans H_2O et ensuite deux dans O_2 »* Pour E2 les deux équations sont d'abord correctes puis il se rallie à l'avis de E1. **Entretien 2 :** ils acceptent bien les deux mais avec même une préférence pour la 2ème. E1 : *« les deux peut-être mais j'aurais mis plutôt H_4 que $2H_2$ »* E1 : *« Celle avec H_2O c'est la base et l'autre c'est deux fois »*
$H_2O \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + H_2$ ou $H_2O \rightarrow O + H_2$	**Entretien 1 :** La réponse est immédiate, les deux équations ne sont pas équivalentes. **Entretien 2 :** E1 a une vision très mathématique E1 : *« C'est juste inutile d'avoir mis O_2 divisé par 2, il suffisait de mettre O »*
Troisième partie :	
Ces formules de molécules sont-elles identiques ? H_2O et H_2O_2	**Entretien 1 et 2** : Les réponses sont correctes pour l'ensemble des élèves.
Pour quelle(s) raison(s) la formule de la molécule d'eau s'écrit H_2O et non OH_2 ou HOH ?	**Entretien 1 :** E2 : *« Si c'est H_2O c'est que c'est H_2O »* E1 : *« non je ne pense pas En fait dans la logique comme c'est que les initiales des éléments cela pourrait être correct mais*

	comme on ne le dit pas je ne sais pas si cela pourrait être correct » E2 : *« en fait dans H_2O on ne peut pas séparer le H et le 2 »* E1 : *« oui on ne peut pas séparer le H et le 2 mais par contre cela devrait pouvoir être possible de mettre le O et H_2 »* **Entretien 2 :** E1 et E2 ont toujours appris H_2O mais ne savent pas pourquoi c'est dans cet ordre. Ils font plusieurs propositions de règles : là où il y en a plus en premier et les O sont toujours derrière.
Ces formules de molécules sont-elles identiques ? C_2H_6O et C_2H_5OH	**Entretien 1 :** E1 : *« dans la logique, elles seraient bonnes mais est-ce que cela se dit. On a juste séparé. En fait on s'est donné des règles en physique et que l'on ne peut pas faire n'importe quoi »* E2 : *« en physique je pense pas que cela se dit »* I : « est-ce que l'on vous a donné ces règles ? » E1 : *« On nous donne des noms et puis on apprend, c'est pour cela que s'est compliqué de dire si c'est juste ou pas. »* **Entretien 2** Pour E1, ce sont les mêmes. E2 Hésite. Dans tous les deux préfèrent la notation de gauche.
Quatrième étape :	
- A votre avis pour quelle(s) raison(s) utilise-t-on des lettres pour représenter les atomes ? - Est-ce que l'on aurait pu utiliser d'autres symboles ? Auriez-vous des propositions ?	**Entretien 1** E1 : *« pour pas que cela soit super long »* E2 : *« parce que peut-être monsieur ou madame hydrogène l'ont inventé »* E1 : *« c'est plutôt pratique »* C : « est-ce que l'on aurait pu mettre d'autres symboles ? » E2 : *« comme quoi ? »* E1 : *« cela a été décidé comme ça donc on fait comme ça »* C : « et est-ce que l'on a utilisé d'autres symboles ? » E1 : *« peut-être »* E2 : *« non pas d'autres symboles ce serait bizarre que l'on ait changé en plein milieu Jamais vu d'autres symboles »* **Entretien 2** Pour les deux élèves, les lettres sont une représentation pratique pour les noms des formules. Ils pensent que d'autres symboles ont été utilisés mais cela fonctionne mieux avec les lettres. Un de leurs arguments est que, même en mathématique, on utilise des lettres. Cela laisse du choix. Et ils n'ont jamais vu d'autres symboles

Annexes 5 : Résultats questionnaire élèves

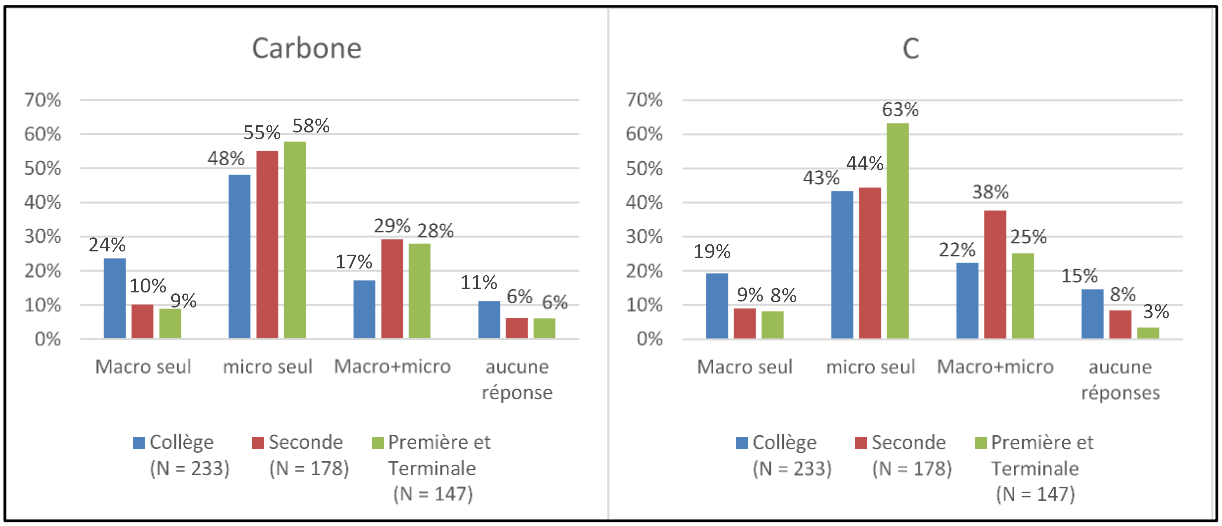
Annexe 5.1 : Résultats questions 2 et 3 : test du Khi2

Test du Khi2 entre les réponses du groupe Collège et du groupe Première – Terminale pour chaque nom et chaque formule.

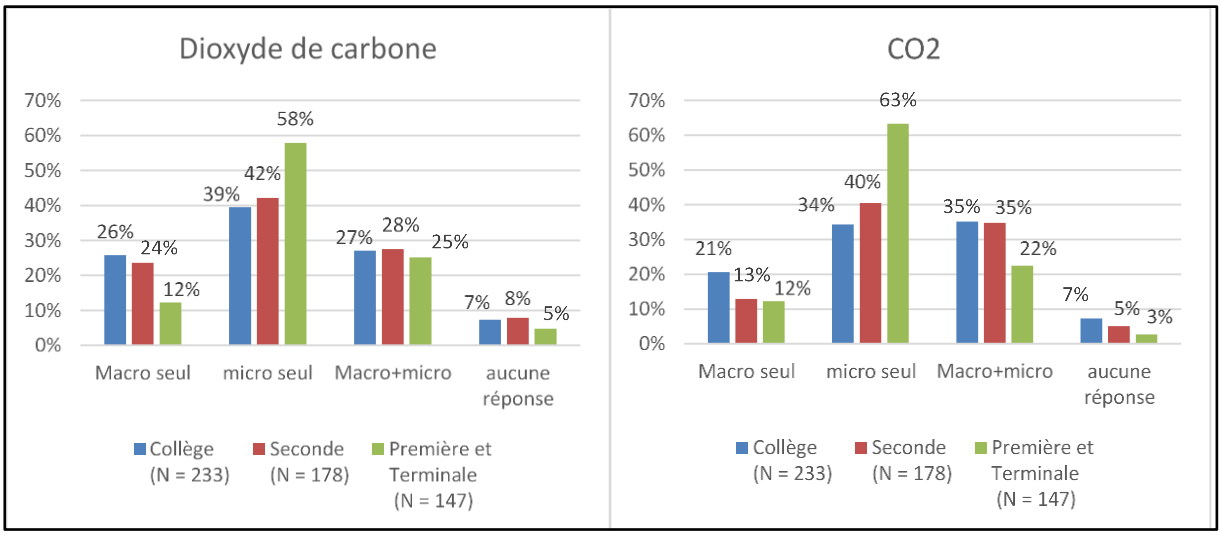
	carbone	C	eau	H_2O	dioxygène	O_2	dioxyde de carbone	CO_2	méthane	cyclohexane	charbon	pétrole	Fe	C_2H_6O
Khi2	12,6	5,30	5,85	4,25	0,759	0,0692	0,215	0,891	3,32	0,275	10,3	13,3	18,2	1,34
p- valeur	3,8 E-4	0,021	0,016	0,039	0,38	0,79	0,64	0,35	0,068	0,60	1,3 E-3	2,6 E-4	2,0 E-5	0,24
Évolution	oui	non	oui	oui	non	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	non

Pour rappel la valeur maximale du Khi2 au risque de 5% est de 5,99. Donc si la valeur calculée est supérieure à 5,99, ou si la p-valeur est supérieur à 0,05, nous pouvons considérer qu'il y a bien eu une évolution statistiquement significative entre le groupe collège et le groupe Première – Terminale, ce que nous notons par « oui » dans le tableau.

Annexe 5.2 : Résultats questions 2 et 3 : choix des critères macroscopique ou microscopique



Critères macroscopiques ou microscopiques choisis par les élèves pour le carbone (nom ou formule)



Critères macroscopiques ou microscopiques choisis par les élèves pour le dioxyde de carbone (nom ou formule)

Annexe 5.3 : Résultats questions 2 et 3 : Test de Mc Nemar : critères macroscopiques

Les tableaux rassemblent le nombre d'élèves qui ont des réponses exactes ou fausses pour les noms ou pour les formules.

Eau et H_2O :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	27	150
	Fausses	4	52

Khi2 = 136,53
p exacte
0,0000

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	26	68
	Fausses	5	79

Khi2 =52,66
p exacte
0,0000

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	22	22
	Fausses	5	98

Khi2 = 9,48
p exacte
0,0015

Dioxyde de carbone et CO_2 :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	9	18
	Fausses	19	187

Khi2 = 0
p exacte
1,0000

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	7	12
	Fausses	11	148

Khi2 =0
p exacte
1,0000

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	9	3
	Fausses	7	128

Khi2 = 0,9
p exacte
0,34375

Dioxygène et O_2 :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	45	18
	Fausses	31	139

Khi2 = 2,94
p exacte
0,0854

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	35	14
	Fausses	26	103

Khi2 =3,03
p exacte
0,0807

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	27	8
	Fausses	13	99

Khi2 = 0,76
p exacte
0,3833

Carbone et C :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	47	21
	Fausses	37	128

Khi2 = 3,88
p exacte
0,0479

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	45	10
	Fausses	31	92

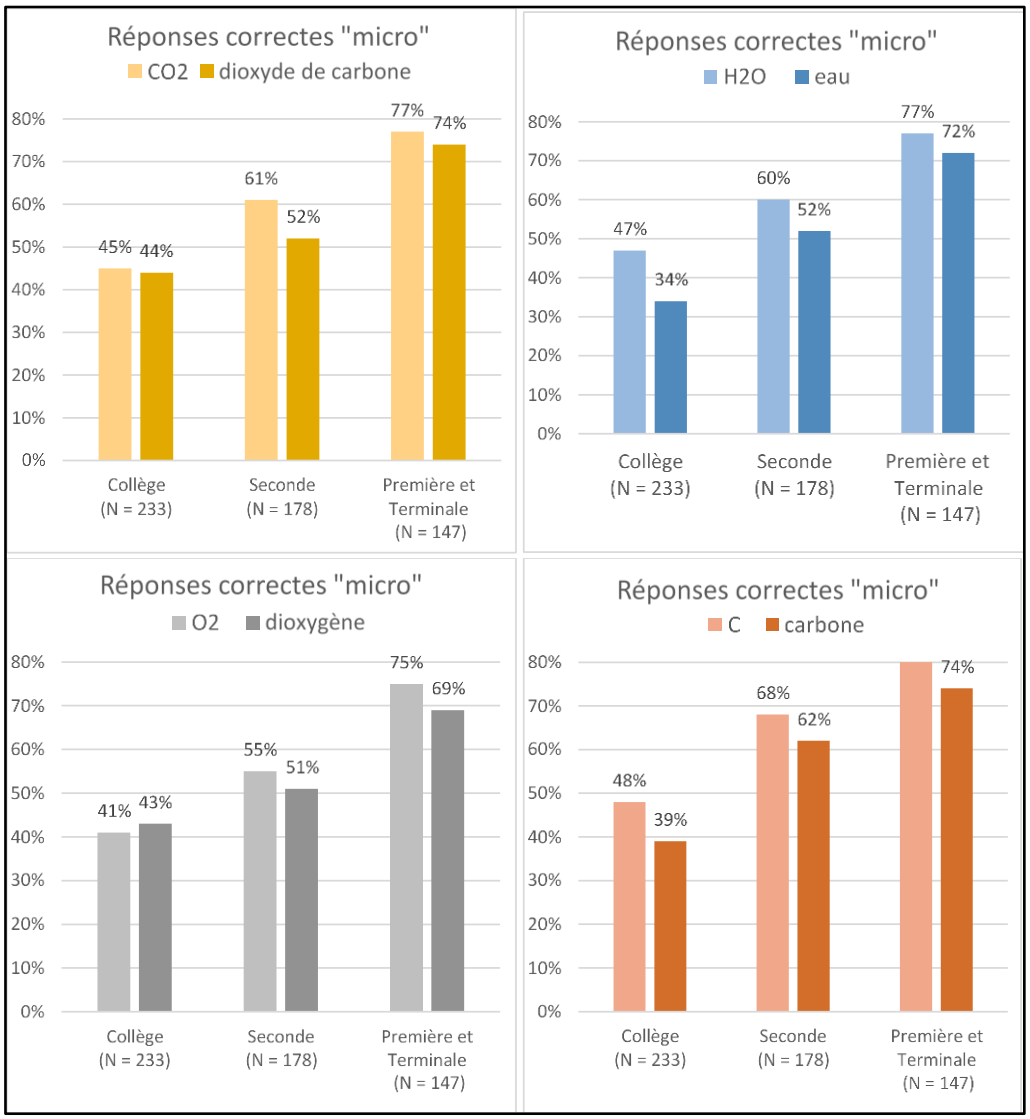
Khi2 =9,75
p exacte
0,0015

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	36	12
	Fausses	11	88

Khi2 = 0
p exacte
1,0000

Annexe 5.4 : Résultats questions 2 et 3 : réponses correctes aux critères macroscopique ou microscopique



Comparatif des réponses correctes aux critères macroscopiques entre le nom et la formule pour les quatre espèces chimiques

Annexe 5.5 : Résultats questions 2 et 3 : Test de Mc Nemar : critères microscopiques

Eau et H_2O :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	58	21
	Fausses	51	103

Khi2 = 11,68
p exacte
0,0005

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	73	19
	Fausses	34	52

Khi2 =3,7
p exacte
0,0534

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	94	12
	Fausses	19	22

Khi2 = 1,16
p exacte
0,2810

Dioxyde de carbone et CO_2 :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	69	34
	Fausses	35	95

Khi2 = 0
p exacte
1,0000

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	69	23
	Fausses	39	47

Khi2 =3,63
p exacte
0,0559

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	96	13
	Fausses	17	21

Khi2 = 0,3
p exacte
0,5847

Dioxygène et O_2 :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	64	37
	Fausses	32	100

Khi2 = 0,23
p exacte
0,6305

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	66	25
	Fausses	32	55

Khi2 =0,63
p exacte
0,4270

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	85	16
	Fausses	25	21

Khi2 = 1,56
p exacte
0,2110

Carbone et C :

Collège

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	68	24
	Fausses	43	98

Khi2 = 4,84
p exacte
0,0271

Seconde

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	91	20
	Fausses	31	36

Khi2 =1,96
p exacte
0,1608

Première et Terminale

		Réponses formules	
		Exactes	Fausses
Réponses noms	Exactes	102	8
	Fausses	18	20

Khi2 = 3,12
p exacte
0,0755

Annexe 5.6 : Résultats questions 4 et 6

Question 4

Argument principal donné par les étudiants qui répondent que CH_4 et C_2H_8 sont identiques

Nombre d'étudiants Groupe d'élèves ou d'étudiants	Réponse : CH_4 et C_2H_8 sont identiques	Avec justification	Justification : C_2H_8 est deux fois plus de CH_4
Collège (N = 233)	50	22	14
Seconde (N = 178)	42	20	17
Première et Terminale (N = 147)	37	29	26
Licence (N = 45)	11	10	10

Question 6

Pourcentage d'élèves qui donnent une justification à la question 5 (couples d'équations)

	Décomposition de l'eau		Combustion du méthane	
Groupe et l'âge des élèves	Justifications	Justifications correctes	Justifications	Justifications correctes
Collège (N = 233)	27 %	3 %	21 %	3 %
Seconde (N = 178)	44 %	6 %	31 %	6 %
Première et Terminale (N = 147)	46 %	17 %	19 %	17 %
Licence (N = 45)	82 %	51 %	78 %	53 %
Ensemble	41 %	11 %	28 %	11 %

Comparaison questions 4 et 6

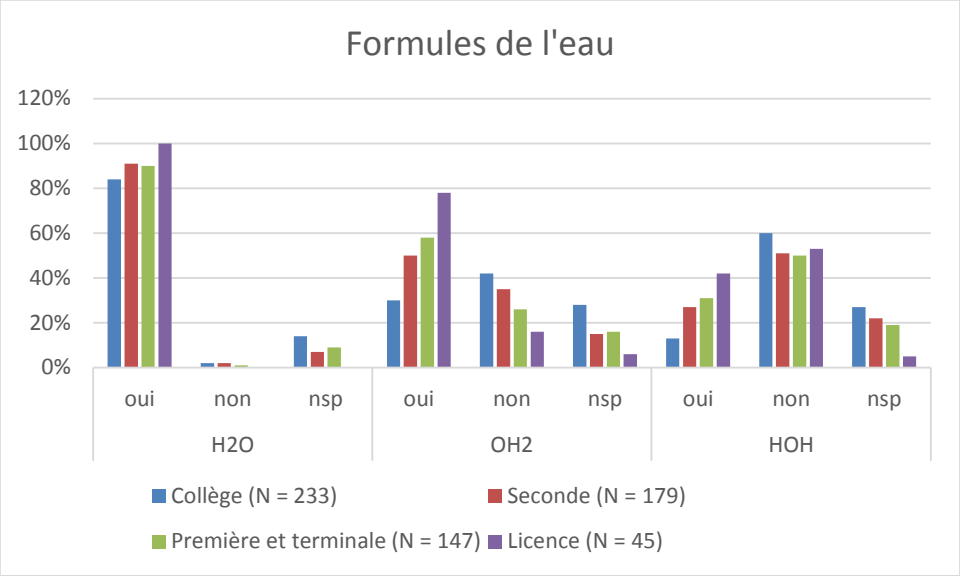
Réponses correctes à l'équation contenant la formule chimique H_4O_2 parmi les étudiants qui considèrent que le C_2H_8 et CH_4 sont différents

Réponses Groupe d'élèves ou d'étudiants qui répondent correctement à CH_4 /C_2H_8	« non » à l'équation avec H_4O_2	« non » à l'équation avec H_4O_2 et avec justification
Collège (N = 233)	27 %	5 %
Seconde (N = 178)	18 %	6 %
Première et Terminale (N = 147)	48 %	25 %
Licence (N = 45)	83 %	60 %

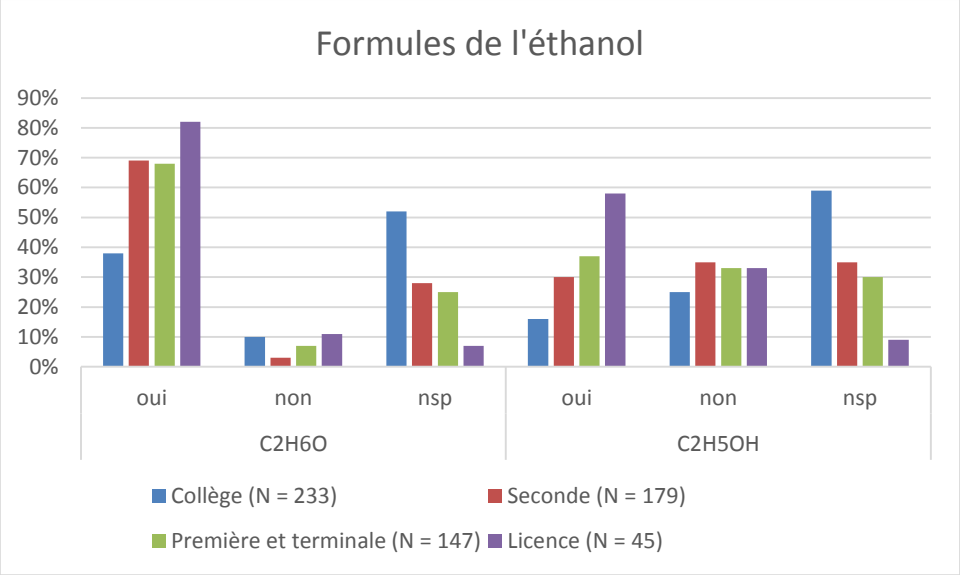
Réponses correctes aux équations contenant O et H_4O_2 parmi les étudiants qui répondent correctement à la question 4

Réponses Groupe d'élèves ou d'étudiants qui répondent correctement à la question 4	« non » aux équations avec O et H_4O_2
Collège (N = 233)	27 %
Seconde (N = 178)	18 %
Première et Terminale (N = 147)	48 %
Licence (N = 45)	83 %

Annexe 5.7 : Réponses question 5



Réponses détaillées à la question 5 pour l'eau



Réponses détaillées à la question 5 pour l'éthanol

Annexe 6 : Questionnaire enseignant

Ce questionnaire fait partie d'une recherche portant sur le "langage du chimiste et son apprentissage dans l'enseignement secondaire français". Vos réponses devront permettre un premier état des lieux de cet enseignement au collège dans les classes de quatrième et de troisième

Votre profil :

Êtes-vous plutôt chimiste ou physicien de formation ? …….

Depuis combien d'années enseignez-vous ? …….

Votre établissement : ……

1. On trouve l'exercice ci-dessous dans un livre de collège (Belin, 4ème, coll Parisi) en fin de programme de chimie de quatrième :

La combustion du méthane :

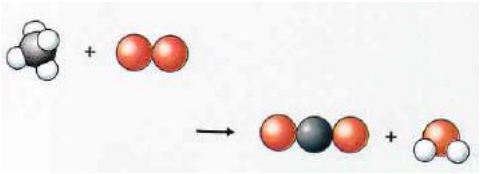
Noémie réalise la combustion du méthane dans une salle bien aérée.

a. Rappelle la formule du méthane. Indique le nom et le nombre de chaque atome présent dans cette molécule.

b. Un des produits formés est identifié grâce au sulfate de cuivre anhydre qui devient bleu. Quel produit Noémie a-t-elle identifié ? Donne le nom et la formule de ce produit ?

c. Quel est le nom et la formule de l'autre produit formé ? Décris un test qui permet de l'identifier.

d. La représentation incomplète de cette réaction à l'aide de modèles moléculaires est donnée ci-contre. Recopie et complète cette représentation pour quelle respecte la conservation des atomes.



e. Ecris l'équation de cette combustion.

f. Lors de cette combustion, Noémie utilise 960g de dioxygène ; il se forme 660g de dioxyde de carbone et 540 g d'eau. Calcule la masse de méthane qui a brûlé.

a- Pourriez-vous donner cet exercice en état à vos élèves ou sinon que changeriez-vous ?

Réponse : ……

b- Les recherches en didactique ont montré les difficultés des élèves à se repérer en chimie entre le registre microscopique et le registre macroscopique. Cet énoncé peut-il entraîner à votre avis ce type de confusion et si oui que proposeriez-vous pour l'améliorer ?

Réponse : ……..

2. Justifiez-vous aux élèves la position de l'atome d'hydrogène par rapport à l'atome de carbone dans la formule brute du méthane et par rapport à l'atome d'oxygène dans la formule brute de l'eau ?

□ oui □ non

Et si c'est le cas, quelle(s) justification(s) proposez-vous ?

Réponse : …….

3.a Utilisez-vous les modèles moléculaires compacts ou les logiciels présentant les modèles moléculaires compacts avec vos élèves ? □ oui □ non

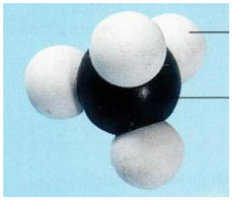
3.b si oui, quelle(s) explication(s) donnez-vous aux élèves pour justifier vous la position des atomes les uns par rapport aux autres dans le cas du modèle moléculaire :

- de la molécule de dioxyde de carbone ?

Réponse : …….

- de la molécule de méthane ?

Réponse : ……..



Annexe 7 : Présentation de la séance « ordinaire » 1 (Mathieu)

Séance au cours de laquelle vous introduisez et / ou utilisez les formules brutes en quatrième

Nom : Prénom :

Nom de l'établissement scolaire : Ville :

Si nécessaire, quelques éléments significatifs sur le contexte d'exercice, sur la classe…
Classe de 4ème avec quelques éléments perturbateurs qu'il faut canaliser juste après la récréation.
Ce lundi 08/06, les élèves ont une épreuve commune 4ème en Mathématiques à refaire de 8h30 à 10h30.

Place de la séance dans votre progression en chimie :	Dernier chapitre de la partie chimie du programme de 4ème
Quelles sont à votre avis les obstacles ou des blocages rencontrés par vos élèves sur les formules brutes ?	- Le nombre d'atomes présent dans la molécule indiqué en indice dans la formule chimique : Les élèves pensent que ce chiffre est associé à la lettre qui suit ce chiffre. - analyser le nom d'une molécule pour donner sa formule chimique
Objectifs de votre séance :	Suite à la présentation des atomes, l'objectif est de définir une molécule puis d'expliquer le principe et l'utilisation des formules chimiques.
Documents utilisés (comment utilisez-vous ces documents avec les élèves ? Pour quelles raisons avez-vous choisi ces documents, … ?)	Utilisation de modèles moléculaires simples par le professeur pour l'introduction. Utilisation d'exemples connus à l'aide d'un diaporama détaillé pour faciliter l'explication étape par étape.
Expériences réalisées (pour quelles raisons proposez-vous ces expériences ? A quel moment de la séance ? … .)	Suite à cette séance, les élèves utilisent les modèles moléculaires en TP pour s'y habituer et « jongler » entre formule chimique, nom et schéma d'une molécule.
Modèles moléculaires (les utilisez-vous ? qui les manipulent, à quel moment de la séance ? Pour quelles raisons les utilisez-vous ? et pour montrer quoi ? …)	
Quelles questions posez-vous aux élèves pendant la séance ?	Est-ce qu'ils ont bien compris la différence entre un atome et une molécule.

Les réactions des élèves (réponses à vos questions, questions et difficultés qu'ils semblent rencontrer ....)	Après un temps d'adaptation, c'est une notion qui semble correctement comprise.
Que faites-vous noter aux élèves dans leur cahier qu'ils doivent apprendre ?	Uniquement les définitions d'une molécule et de la formule chimique. Les exemples sont copiés mais ne sont pas à apprendre par cœur.

Annexe 8 : Présentation de la séance « ordinaire » 2 (Aude)

Séance au cours de laquelle vous introduisez et / ou utilisez les formules brutes en quatrième

Nom : Prénom :

Nom de l'établissement scolaire : Ville :

Si nécessaire, quelques éléments significatifs sur le contexte d'exercice, sur la classe...

Classe de 29 élèves avec 7 élèves dyslexiques.
Présence d'un AVS lors de la séance pour un élève de la classe.

Place de la séance dans votre progression en chimie :	Chap 2 : Comprendre les trois états de la matière II - Description et représentation des molécules.
Quelles sont à votre avis les obstacles ou des blocages rencontrés par vos élèves sur les formules brutes?	Comprendre que le chiffre en indice placé derrière le symbole d'un atome correspond au nombre d'atomes de ce type dans la molécule.
Objectifs de votre séance :	* Faire une distinction claire entre atome et molécule * Expliquer la compo d'une molécule à l'aide des formules brutes
Documents utilisés (comment utilisez-vous ces documents avec les élèves ? Pour quelles raisons avez-vous choisi ces documents, ... ?)	* Documents papier préparés par moi-même. 1 document "Histoire des Sciences" ⇒ Culture scientifique 1 document avec mise en situation "Actuelle" ⇒ Sensibilisations
Expériences réalisées (pour quelles raisons proposez-vous ces expériences ? A quel moment de la séance ? ... .)	
Modèles moléculaires (les utilisez-vous ? qui les manipulent, à quel moment de la séance ? Pour quelles raisons les utilisez-vous ? et pour montrer quoi ? ...)	Utilisation des modèles moléculaires ↳ Application directe du cours et de ce qui vient d'être mis en avant lors des activités précédentes.
Quelles questions posez-vous aux élèves pendant la séance ?	
Les réactions des élèves (réponses à vos questions, questions et difficultés qu'ils semblent rencontrer ....)	
Que faites-vous noter aux élèves dans leur cahier qu'ils doivent apprendre ?	cf cours joint...

Annexe 9 : Transcription de la séance « ordinaire » 1 (Mathieu)

1 - 00:00 > 02:34 [Transition]

(les élèves entrent dans la classe)

2 - 02:56 > 05:20 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique implicite] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", "symbole", "molécule", symbole atome, nom indéterminé, symbole indéterminé, couleur, modèle moléculaire

[>P] : vous pouvez vous asseoir, bonjour. Pour l'instant vous laissez votre cahier fermé on fait point ce que l'on a vu la fois dernière pour voir si vous avez soit appris votre leçon ou voir si vous avez encore quelques souvenirs de ce que l'on a vu. Allons-y je ne pense pas qu'avec l'épreuve de maths que vous ayez le temps d'apprendre votre leçon. On avait travaillé la semaine dernière sur les atomes. On avait indiqué qu'il fallait mettre en place des symboles concernant justement ces atomes donc le but c'est avant de passer au grand 2 avant donc à la suite aux molécules de voir si vous vous souvenez rapidement comment on avait mis en place les symboles des atomes. On va commencer par le premier le carbone. Oui ?

[>E] : c'était grand C

[>P] : oui d'accord. Donc je vous rappelle vous prenez la première lettre du mot en majuscule donc C pour carbone par contre je vous l'avais indiqué aussi que concernant la couleur vous ne l'apprenez pas par cœur vous avez juste besoin. Vous aurez votre cahier pour l'utiliser lorsque l'on fera les modèles moléculaires donc le noir vous l'avez noté ce n'est pas à apprendre par cœur.

[>P] : on passe au suivant hydrogène oui

[>E] : euh grand H

[>P] : oui H majuscule. La couleur tu t'en souviens ?

[>E] : blanc

[>P] : d'accord ce sera blanc. On passe au suivant l'oxygène

[>E] : O

[>P] : OK O. Lève la main Stéphane. O majuscule et la couleur Mathieu ?

[>P] : j'ai pas entendu

[>E] : rouge

[>P] : d'accord le soufre oui Sylvie

[>E] : grand S

[>P] : grand S après ça la couleur elle n'est pas à savoir là je vous l'avais donnée le jaune. Le suivant azote. Attendez avant de lever la main réfléchissez.

[>E] : grand N

[>P] : d'accord N majuscule on avait expliqué que c'était une exception donc N majuscule et on prendra le bleu pour les modèles moléculaires. Là le cuivre on l'avait donné en exemple pour essayer de faire la différence Chloé oui

[>E] : Cu

[>P] : d'accord et le u tu le notes comment ?

[>E] : ...

[>P] : Le C tu le mets en majuscule ou en minuscule

[>E] : majuscule

[>P] : majuscule et le u tu le mets en majuscule ou en minuscule

[>E] : minuscule

[>P] : d'accord donc faites attention C majuscule mais la deuxième lettre sera placée en minuscule là c'était aussi pour voir si vous aviez compris calcium ? Oui

[>E] : Ca

[>P] : Ca et le dernier que l'on va utiliser aussi de temps en temps le chlore oui Sylvie

[>E] : Cl

[>P] : Cl on est d'accord et après c'était la couleur verte. Est-ce que pour les symboles vous êtes au point ? oui c'est bon. OK.

3 - 05:20 > 06:39 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : empirique, nom indéterminé, "gaz", composé chimique, formule espèce chimique

[>P] : donc on continue par rapport à ça. Alors une situation ou justement on peut mettre en place des fois malheureusement certaines erreurs que vous devez un peu prendre de recul par rapport à ce qui est présenté. Vous supposez que vous travaillez dans le domaine médical milieu hospitalier par exemple et vous savez que pour aider à la respiration de certaines personnes vous êtes obligés d'acheter de l'oxygène médical ou médicinal c'est juste pour aider à la guérison donc on vous présente sur le catalogue, donc une société qui vous présente ce catalogue et vous présente cette publicité. Donc vous avez l'oxygène médicinal et on vous indique traitement respiratoire et réanimation vous avez également principalement utilisé dans différentes indications. Vous avez également une explication 100% O2 gaz pour inhalation disponible et sous forme liquide enfin différentes indications. Le but c'est d'essayer de vous montrer justement à partir de ça la différence entre ce que l'on avait parlé la semaine dernière les atomes et ce qu'on avait commencé à parler les molécules.

4 - 06:39 > 07:15 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", "molécule", symbole indéterminé, "symbole", chiffre, empirique

[>P] : si on part sur le titre principal : oxygène médicinal, oxygène on vient de le voir le symbole c'est quoi si vous pouvez

[>E] : c'est O

[>P] : d'accord donc en principe le symbole pour oxygène vous avez O majuscule. Est-ce que dans l'explication en dessous vous retrouvez le O majuscule ?

[>E] : O

[>P] : oui d'accord donc tu retrouves le O mais qu'est-ce que tu retrouves d'autre aussi ?

[>E] : un chiffre

5 – 07:15 > 07:34 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : empirique, formule indéterminée, nom indéterminé, composé chimique

[>P] : est-ce que vous vous rappelez aussi ce qu'on avait déjà un petit peu parlé lorsqu'un avait parlé de la composition de l'air ? Oui

[>E] : CO2

[>P] : alors CO2 on avait dit qu'il y avait ça on le verra un petit peu après c'est pour le dioxyde de carbone on avait dit qu'il y en avait dans l'air mais très très peu donc c'était pas dans la composition principale.

6 - 07:34 > 08:28 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, symbole atome, "atome", formule indéterminée, empirique, chiffre, composé chimique

[>P] : donc là l'objectif c'est de vous montrer qu'on vous parle oxygène donc O l'atome par contre dans l'explication on vous annonce O2. Est-ce que vous vous souvenez de ce que l'on avait parlé justement dans l'air entre lorsque que je vous ai demandé de faire la distinction entre Oxygène et Dioxygène ? (Au moment de la prononciation, l'enseignant insiste sur le « di » de dioxygène et sur le « O » d'oxygène.)

[>E] : oxygène parce qu'il y en un et dioxygène là il y en a deux

[>P] : d'accord, c'est ce que l'on avait indiqué parce que vous ce que vous respirez c'est du Dioxygène et non pas de l'Oxygène (Mathieu insiste dans sa prononciation sur le « di » de dioxygène et sur le « O » d'oxygène). Donc c'est là où entre guillemets c'est une erreur sur le catalogue. Dès le départ au lieu de marquer oxygène médicinal, il devrait marquer quoi plutôt par rapport à ce que tu m'as dit ou Mathieu oui ?

[>E] : dioxygène

[>P] : voilà ce que vous avez dans la bonbonne c'est du dioxygène médicinal et non pas de l'oxygène seul, pas l'atome.

7 - 08:28 > 11:03 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "atome", "molécule", nom atome, nom molécule, chiffre, modèle moléculaire, couleur, liaison

[>P] : et cela va être là toute la différence entre atome ce que l'on avait dit la semaine dernière. L'atome c'est quand vous avez la sphère seule, la bille seule alors qu'à partir où vous avez des molécules elles vont se mettre par plusieurs pour former justement une molécule donc c'est ce qu'on avait essayé d'expliquer un petit peu juste à l'oral à la fin de la séance fois dernière donc c'est ce qu'on va travailler aujourd'hui : la partie molécule. Donc quand vous avez l'atome seul on parle d'atomes. À partir du moment où ils vont se mettre par plusieurs par deux par trois par la quantité qui sera indiquée vous avez ce que l'on va appeler la molécule. D'accord. Donc si vous pouvez reprendre votre cahier s'il vous plaît. Il me semble que l'on avait noté le grand 2 c'était fait et le petit a. D'accord. (Les élèves sortent leur cahier) Donc avec ce que vous utiliserez un petit peu la fois dernière lorsque vous ferez la manipulation avec les modèles moléculaires, je vais essayer pendant cette séance de vous les expliquez au fur à mesure. (L'enseignant montre aux élèves les modèles moléculaires) Donc on vient de dire justement que lorsque vous prenez donc la sphère seule donc l'atome donc c'est l'oxygène. À partir du moment où vous en prenez deux très rarement elles vont rester seules elles vont toujours se regrouper par deux par trois etcetera. Donc là par exemple si vous prenez ces deux atomes d'oxygène ils vont avoir tendance à se regrouper ensemble pour former la molécule de dioxygène. Vous allez voir que quand vous allez travailler sur cette séance la fois prochaine sur les modèles moléculaires vous allez avoir deux types de modèles puisque je n'ai pas toutes les couleurs en stock donc forcément il y aura deux types de modèles soit il y a ce que l'on appelle le modèle compact, donc vous voyez que tout est bien serré vous avez également ce que l'on appelle le modèle un peu éclaté ou séparé si vous préférez ce que l'on appelle le modèle éclaté. Vous allez avoir vous principalement ce type de modèle vous allez avoir vos billes, donc les billes au départ vont être seules et vous allez avoir à disposition des petites tiges qui vont vous permettre de faire les liaisons entre les atomes donc tout simplement ce que vous aurez à faire si on reparle du dioxygène vous allez avoir bien sur votre tableau avec les couleurs. Vous prenez les deux avec une couleur rouge et tout simplement vous les mettez ensemble. Donc à partir du moment où vous les avez liées ensemble c'est ce que l'on appelle une molécule.

8- 11:03 > 11:17 [Modèle micro] [Empirique] [questions élèves]

Tag(s) : "transformation chimique", liaison

[>P] : oui ? J'ai pas entendu

[>E] : ils peuvent se détacher ?

[>P] : ils peuvent se détacher oui ça arrive dans les transformations chimiques elles se détachent. Elles se cassent pour après se reformer sous une autre forme, une autre façon.

9 - 11:17 > 13:12 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "molécule", nom molécule, modèle moléculaire, couleur, "atome",

[>P] : donc là la molécule de dioxygène vue sous deux formes différentes si vous prenez tel ou tel modèle (l'enseignant montre un modèle éclaté et un modèle compact de la molécule de dioxygène).

Donc je vous présente les deux puisque vous serez amenés à utiliser les deux. Vous verrez que dans votre boîte vous aurez principalement cela mais il y a certaines couleurs que je n'ai pas, donc vous avez certaines couleurs alors que j'ai seulement deux ou trois exemplaires que vous serez amenés à utiliser cela. Donc ne soyez pas surpris si de temps en temps vous utilisez celui-là et de temps en temps celui-là. C'est bon ? Donc on note cette définition de molécule et tout de suite après, ce sera en rouge oui. Donc si à la suite du petit a, on avait noté donc définition et formules chimiques, donc vous notez directement en rouge et à la suite, à la suite du petit a, c'est bon alors : une molécule une molécule est constituée de plusieurs atomes, une molécule est constituée de plusieurs atomes soit de même sorte soit de sorte différente (répétition) point. Ce que j'entends dans la définition soit de même sorte soit de sorte différente ?

10 - 13:12 > 14:04 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", couleur, nom atome, nom indéterminé, "molécule", chiffre

[>P] : (l'enseignant montre les modèles moléculaires) Là est-ce que j'ai pris des atomes identiques, c'est-à-dire est-ce que j'ai pris des atomes de la même sorte ?

[>E] : oui

[>P] : oui j'ai pris deux atomes d'oxygène. On avait parlé tout à l'heure, tu m'as parlé du dioxyde de carbone on en avait déjà vu un petit vu la fois dernière et même dans le chapitre précédent lorsque vous présentez le dioxyde de carbone déjà quelle est la première chose qui vous saute oui ?

[>E] : il y a du noir

[>P] : donc vous allez avoir du rouge et du noir. Automatiquement quand vous voyez qu'il y a deux couleurs différentes c'est que l'on a assemblé dans cette molécule des atomes de différentes sortes. Donc il y a du carbone et il y a de l'oxygène donc c'est ça dans la définition que j'indique soit deux sortes identiques si vous mettez que des atomes de même nature soit des atomes de nature différente. Ça va ?

11 - 14:04 > 18:17 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : nom indéterminé, formule indéterminée, "symbole", "formule chimique", "atome", symbole indéterminé, "molécule", empirique, "indice", chiffre, nom atome

[>P] : dernière chose à noter en rouge juste avant de noter je vous l'explique par rapport à ce qui est noté au tableau. Comme vous l'avez vu ils ont utilisé pour indiquer le dioxygène après 100 % O2. Ce qui va se passer c'est que vous allez réutiliser les symboles que l'on a rappelé tout à l'heure pour mettre en place ce que l'on appelle la formule chimique de la molécule donc la formule cela va permettre justement de noter de manière efficace le nom de la molécule donc dioxygène on va le noter O2. On verra par contre tout à l'heure qu'il y a une autre petite erreur sur leur prospectus on verra que le 2 est mal placé est mal noté d'accord donc cela on le voit juste après. Donc ce qui va se passer c'est un peu comme en électricité vous avez vu les symboles des atomes on va constituer ces symboles pour constituer la formule chimique. Comme vous lorsqu'en cinquième vous avez appris les symboles des différents composants électriques la lampe la pile, etc. ... avec tous ces symboles on faisait un circuit

électrique. Donc c'est exactement le même principe, les symboles vont nous permettre de mettre en place la formule chimique. Cela va être aussi comme en électricité. Si vous ne connaissez pas les symboles, vous ne pourrez pas comprendre les formules chimiques que l'on va mettre en place. D'accord. Donc honnêtement je pense que carbone C, hydrogène H oxygène O, c'est pas très compliqué donc je pense que, cela, vous devez les avoir en tête très rapidement. Il y a juste les deux petites exceptions : azote N et chlore pas Ch mais Cl à avoir en tête. Donc dernière chose à noter avant je vous explique la petite erreur, c'est que dans la formule O2 ils vont bien employer le O majuscule pour indiquer que vous prenez des atomes d'oxygène par contre le chiffre on va pas le noter en taille normale juste à côté du O, on va le mettre en indice en bas à droite. Donc déjà première chose on ne met pas en haut car cela pourrait faire penser au carré comme en mathématiques quand vous prenez trois au carré donc on prend le symbole de l'atome donc la lettre de l'atome O majuscule et on indique combien il y en a, donc deux atomes au total. Donc c'est la deuxième erreur sur cette indication. OK ? Alors vous pouvez noter en rouge en passant une ligne : chaque molécule, chaque molécule, possède une formule chimique, possède une formule chimique, possède une formule chimique, qui indique, qui indique, le nombre et la nature des atomes, le nombre et la nature des atomes, qui la constituent, qui la constituent, point. Chaque molécule possède une formule chimique qui indique le nombre et la nature des atomes qui la constituent.

12 - 18:17 > 19:10 [Transition]

[>P] : est-ce que pour l'instant vous avez des questions ? Ou est-ce qu'il y a quelque chose que vous n'avez pas compris. Donc si vous n'avez pas de question, on va tout de suite passer aux exemples et voir au fur et à mesure des exemples comment ça va se présenter et ce que l'on va vous demander ce que vous devez maîtriser. Donc si vous pouvez passer une ligne et noter le petit 2 s'il vous plaît. Donc ça c'est ce que l'on avait noté la fois dernière, donc vous notez que petit 2 exemple. Comme d'habitude, ce n'est pas la peine de faire le triangle, c'est le lien donc ça vous ne le faites pas vous notez que petit 2 exemple (les élèves notent). Je peux enlever ce qu'il y a au tableau ? Steven c'est bon ? (Les élèves notent).

13 - 19:10 > 20:01 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "atome", "molécule", nom molécule, couleur, chiffre

[>P] : On va faire par étape d'abord l'explication orale, après je vous laisse noter tranquillement après il y a des exemples où il n'y a rien à noter c'est juste l'explication orale donc on va tourner avec ça. Vous allez devoir utiliser plusieurs couleurs si ça vous aide à comprendre. Vous allez comprendre dans deux minutes donc j'ai utilisé des couleurs pour essayer de vous expliquer au mieux donc à partir d'atomes comment on constitue la molécule. Donc pour l'instant vous ne notez rien svp. On commence par le premier exemple, le numéro 1 ce que l'on appelle le dihydrogène. Vous allez voir que dans pas mal de molécules simples dans le nom même de la molécule vous allez pouvoir trouver seuls de quoi est constituée cette molécule. Donc avec des petits liens, des préfixes, très simples, cela va vous permettre de connaître plus ou moins ce que vous aurez dans cette molécule.

14 - 20:01 > 20:40 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", "molécule", nom molécule, couleur, chiffre, nom indéterminé

[>P] : Donc là vous avez dihydrogène. Donc là déjà dans le nom qu'est-ce qui vous tilte en premier par rapport à cette molécule ?

[>E] : di

[>P] : d'accord le di c'est pour quoi ?

[>E] : ben le di c'est deux molécules (inaudible)

[>P] : alors on va revenir donc on va faire attention à ce que tu es en train de dire d'un point de vue du vocabulaire. Donc di c'est 2. Ça veut dire que tu auras deux, par contre fais attention tu n'auras pas deux molécules mais deux atomes par rapport à hydrogène. Donc là encore une fois Nicolas, et ça je vais répéter plusieurs fois, la couleur tout à l'heure la couleur tu t'en souviens ?

[>E] : bleu

[>P] : bleu dommage c'est l'azote. L'hydrogène c'est blanc.

15 - 20:40 > 21:26 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "atome", nom atome, "molécule", nom molécule, chiffre

[>P] : (l'enseignant montre les modèles moléculaires) Là tu as un atome d'hydrogène. Là tu as un autre atome d'hydrogène. Donc quand ils sont pris séparément, c'est des atomes. À partir du moment où ils vont se mettre ensemble et créer une molécule, l'ensemble va s'appeler le dihydrogène. Donc quand tu m'as indiqué le "di" pour deux, c'est bien donc pas de souci. Mais après quand tu as dit qu'il y avait deux molécules d'hydrogène, c'est là où il y avait l'erreur, c'est deux atomes d'hydrogène. Donc c'est là où c'est dans votre esprit que cela va venir au fur et à mesure et que l'on va insister à chaque fois quand vous les prenez seul c'est des atomes, à partir du moment où vous les reliez ensemble et qu'ils sont scellés ensemble, c'est donc une molécule. (L'enseignant montre les modèles moléculaires) D'accord ?

16 - 21:26 > 21:50 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "symbole", "formule chimique", "atome", symbole atome, chiffre

[>P] : Samy, je vais continuer avec toi. Quelle est la lettre que l'on va utiliser en symbole ?

[>E] : H

[>P] : H on est d'accord donc on va prendre forcément le H. Après il faut forcément indiquer la quantité. Je vous l'ai indiqué dans la définition, chaque formule indique le nombre et la nature des atomes. Là la nature on sait que c'est de l'hydrogène par contre la quantité, oui ?

[>E] : il y en a deux

17 - 21:50 > 22:59 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur seul]

Tag(s) : nom indéterminé, "molécule", "atome", nom atome, "formule chimique", "symbole", symbole indéterminé, chiffre

[>P] : d'accord. On va faire exactement comme tout à l'heure pour le dioxygène. Vous allez avoir un deux qui va apparaître en bas à droite. Par contre vous allez voir que cela va avoir son importance après quand vous avez plusieurs atomes qui constituent la molécule. C'est qu'à chaque fois le chiffre correspond toujours à ce que vous avez devant lui c'est-à-dire qu'après si on ajoute d'autres lettres, le chiffre c'est uniquement par rapport à ce qu'il y a devant. Donc le 2 c'est pour l'hydrogène. Vous allez comprendre un peu mieux après. Donc lorsque l'on vous demandera dans les exercices de donner la composition de cette molécule, la composition ce que l'on attend de vous tout simplement c'est d'indiquer que vous avez deux atomes d'hydrogène. Donc vous verrez que des fois on fera l'inverse, on vous donnera la composition et il faudra trouver la formule. Tu ne sais pas parce que forcément dans le nom eau: hydrogène c'est H et vous savez qu'il y en a deux et que l'indice se place toujours en bas à droite pour indiquer qu'il y a deux atomes d'hydrogène.

18 - 22:59 > 23:29 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : "atome", nom atome

[>P] : Est-ce que jusque-là ça va ou est-ce qu'il y a des questions ?

[>E] : alors deux atomes d'hydrogène, ils sont pas collés alors ? (inaudible)

[>P] : quand tu notes dans composition justement tu fais bien de le signaler, c'est deux atomes "d" apostrophe hydrogène, c'est-à-dire on prend vraiment le nom de l'atome hydrogène et non pas comme faire l'erreur dire qu'il y a deux atomes de dihydrogène. Le di c'est juste pour indiquer qu'il y a deux atomes d'hydrogène.

19 - 23:29 > 25:53 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Travail individuel]

Tag(s) : "formule chimique", "atome", "molécule", "indice", chiffre

[>P] : Si les couleurs vous aident, vous faites de la même façon avec les couleurs si par contre vous avez compris et que les couleurs ne vous aident pas, vous notez tout de la même couleur. Comme vous voulez. Donc je vous laisse noter exemple a. Je vous laisse noter le nom de la molécule et la composition et la formule chimique. Je vous laisse faire ça. (Les élèves notent ce qu'il y a au tableau. Les formules indiquées ne sont pas explicitement reliées aux molécules). (L'enseignant en aparté) Tu fais un petit effort Stéphane si tu peux noter les exemples, merci (...) pas besoin de couleur Katalin ? C'est compris ?

[>E] : oui

[>P] : tu as besoin de quelque chose Chloé ?

[>E] : oui un crayon bleu

[>P] : crayon

[>E] : bleu

[>P] : bleu. C'est bon. (...) .

[>P] : Donc faites bien attention quand vous notez la formule chimique de toujours bien faire la majuscule et de toujours bien placer le chiffre en indice en bas à droite.

[>P] : (...) Nicolas est-ce que l'on est d'accord différence atomes pris seulement de chaque côté et molécules

[>E] : oui

[>P] : oui ? OK.

20 - 25:53 > 27:26 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : modèle moléculaire, "molécule", couleur, nom molécule, "représenter", couleur, "atome", nom atome, liaison

[>P] : Vous imaginez que vous avez votre petite boîte que vous aurez la semaine prochaine devant vous vous avez votre petite boîte vous devez piocher. Qu'est-ce que vous allez piocher concrètement dans la boîte si je vous demande de représenter la molécule de dihydrogène ? Oui Katalin

[>E] : deux billes blancs

[>P] : d'accord. Hydrogène c'est blanc. Vous allez simplement prendre deux billes blanches. (L'enseignant montre les modèles moléculaires). C'est deux atomes d'hydrogène seuls et tout simplement pour les mettre ensemble vous aurez à votre disposition des liaisons une fois que vous les liez ensemble vous avez une haltère plus ou moins pour faire de la musculation ainsi cela vous permettra d'être plus costaud ainsi vous avez cette molécule de dihydrogène qui est formée. Tout à l'heure, je vous l'ai montré en premier, vous aurez donc cette molécule de dihydrogène lorsque vous aurez le modèle compact, donc tout dépend lequel vous utilisez. Donc si vous devez, ça vous ne le notez pas svp, vous l'aurez la prochaine fois, si on vous demande de représenter le schéma de la molécule, on va représenter tout simplement au départ les deux atomes d'hydrogène pris seuls à partir du moment où vous les mettez ensemble vous formez la molécule de dihydrogène. Est-ce qu'il y a des questions ? Non. L'exemple suivant, vous ne le notez pas. On le fait à l'oral pour vous expliquer ce que vous devez faire attention quand vous allez noter justement les formules chimiques. Chloé est-ce que je peux l'enlever ou pas ?

[>E] : oui

[>P] : oui c'est bon.

21 - 27:26 > 30:27 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", nom molécule, "formule chimique", chiffre, "gaz", nom espèce chimique, empirique, "atome", nom atome, nom indéterminé, "espèce chimique"

[>P] : Alors donc celui-là vous ne le notez pas. Je vous présente donc en deuxième molécule le monoxyde de cuivre. Alors on va analyser un petit peu. Est-ce que dans le terme j'ai fait volontairement

mis en place certaines couleurs. Est-ce qu'il y a des choses qui vous paraissent naturelles à trouver ? Est-ce qu'il y a des mots qui ressortent pour essayer de trouver la formule chimique ? Oui Katalin

[>E] : c'est quoi le mono ?

[>P] : justement

[>E] : Bien il y en a qu'un

[>P] : voilà donc là on verra après que des fois on va le préciser et des fois on ne le précisera pas. C'est justement pour vous le présenter une première fois parce que la fois prochaine vous allez travailler sur un gaz dont nous avions déjà parlé dans les combustions dans le chapitre précédent, le monoxyde de carbone. Tu t'en souviens ou pas, donc ses dangers, etcetera, donc c'est pourquoi je vous présente le préfixe mono pour indiquer qu'il y en a qu'un seul. Par contre comme tu es dans cette partie-là "mono" un seul. Oxyde à ton avis c'est quoi dans le tableau que tu as des atomes, ça ressemble à quoi (....) ?

[>E] : oxygène

[>P] : oui pour j'ai entendu

[>E] :

[>P] : t'as rien dit non oui ?

[>E] : monoxyde de carbone

[>P] : non alors oui t'es en train de dire quelque chose ? Oui Katalin ?

[>E] : oxygène

[>P] : oxygène C’est-à-dire que pour éviter d'écrire les mots. C’est pas ce que tu avais dit en premier tout à l'heure ?

[>E] : ben si

[>P] : d'accord

[>E] : elle a rien dit

[>P] : elle a rien dit d'accord. Donc en fait pour éviter d'avoir un terme trop long le terme oxygène, vous allez voir, comme tu viens de le dire pour le dioxyde de carbone, oxyde en fait va représenter l'atome d'oxygène. Au lieu de noter monoxygène de cuivre ou monoxygène de carbone pour essayer de réduire un petit peu ça, on a employé le terme oxyde parce que tout simplement. Cela vient du verbe l'oxygène ou le dioxygène de l'air va oxyder certaines espèces chimiques. Donc au lieu d'employer le terme oxygène, on va employer le terme oxyde. Donc dès que vous voyez ce suffixe oxyde, cela signifie qu'on va prendre l'atome d'oxygène et on revient à la quantité, mono t'as dit qu'il y en avait combien ?

[>E] : un

[>P] : un seul. Donc déjà on va prendre un atome d'oxygène. On continue.

[>P] : Donc on passe au cuivre. Le cuivre à votre avis, cela va forcément être l'atome de cuivre qui va être présent, en quelle quantité ? Levez la main si vous avez une idée ?

[>E] : un

[>P] : un seul. Si on ne vous le précise pas il y en aura qu'un seul. Donc si on voulait encore allonger l'écriture on pourrait appeler cela le monoxygène de mono cuivre. Cela commence à faire un peu beaucoup. Donc on va dire monoxyde de cuivre ou oxyde de cuivre. On pourrait aussi très bien dire oxyde de cuivre.

22 - 30:27 > 31:09 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "symbole", symbole indéterminé, nom indéterminé, "atome", nom atome, chiffre, "molécule"

[>P] : donc là avec les symboles, je vais continuer avec toi, comme tu avais commencé. Le cuivre, le symbole c'est quoi Katalin ?

[>E] : Cu

[>P] : Cu d'accord et tu as dit qu'il y en avait combien ?

[>E] : un

[>P] : un seul voilà. Ensuite on continue, quel est l'autre atome qui est présent dans la formule ?

[>E] : l'oxygène

[>P] : l'oxygène en quelle quantité ?

[>E] : un seul

[>P] : un seul. Donc encore une fois les chiffres je vous précise bien c'est toujours par rapport à ce qu'il y a devant donc un atome de cuivre, un atome d'oxygène. Si on vous demande la composition de cette molécule vous allez avoir donc un atome de cuivre et un atome d'oxygène qui vont se mettre ensemble.

23 - 31:09 > 31:44 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, "atome", liaison, "espèce chimique", réaction, "solide", "solution", composé chimique

[>E] : et s'il y en a (?) cela fait monoxyde de cuivre ?

[>P] : voilà à partir du moment où ces deux atomes sont reliés ensemble, Nicolas, cela va te former le monoxyde de cuivre. Une petite, oui je vais enlever cela.

[>E] : c'est quoi du monoxyde de cuivre ?

[>P] : monoxyde de cuivre c'est une espèce chimique qui contient du cuivre et qui a réagi avec le dioxygène.

[>E] : mais du cuivre c'est pas du solide ?

[>P] : si bien sur mais après on peut le trouver dans d'autres espèces chimiques. Le cuivre tu peux le trouver, on l'étudiera l'année prochaine, vous l'avez aussi en solution. Et je vous signale que vous l'avez déjà utilisé en cinquième.

24 - 31:44 > 32:23 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, couleur, empirique, composé chimique

[>P] : à quel moment vous avez employé le terme cuivre l'an dernier en cinquième ? Tout début de l'année.

[>E] : le sulfate de cuivre

[>P] : voilà le sulfate de cuivre. Et la couleur de la poudre était de quelle couleur ?

[>E] : bleue

[>P] : bleue et ça servait à quoi ?

[>E] : à savoir s'il y a de l'eau ou pas

[>P] : d'accord et quel était le changement de couleur ?

[>E] : blanc

[>P] : d'accord donc en fait la poudre blanche était ce que l'on avait appelé le sulfate de cuivre ?

[>E] : anhydre

[>P] : anhydre c'est-à-dire sans eau. Vous quand vous vouliez le tester pour savoir s'il y avait de l'eau, vous mettiez sur tel ou tel échantillon, c'était des aliments que vous vouliez tester, c'était passé du blanc au bleu s'il y avait la présence d'eau. Et donc là encore une fois,

25 - 32:23 > 33:30 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : nom espèce chimique, "espèce chimique", empirique, couleur, "atome", nom atome, formule indéterminée, "formule chimique", composé chimique

[>P] : tu avais la présence du cuivre dans celle de l'espèce chimique cuivre dans cette poudre mais pourtant ce n'était pas la couleur orange que tu es en train de me parler. La couleur orange que tu es en train de me parler, c'est quand tu as le cuivre métallique. Que des atomes cuivre seul mis les uns à la suite des autres. D'accord. Ça va ? Je reviens à la dernière petite remarque. Quand le chiffre 1 si vous allez commencer à comprendre après au fur et à mesure, le 1 est facultatif. C'est-à-dire que si au départ c'est noté comme ça Cu1O1 vous avez le droit. Par contre si après au fur et à mesure pour éviter d'alourdir la formule chimique, vous savez qu'il y a le chiffre 1 mais qui est sous-entendu, vous pouvez très bien la noter comme ça CuO. Donc après au choix mais au fur à mesure à la fin on finira par cette formule en indiquant en sous entendant pardon les 1. Est-ce que c'est bon ?

26 - 33:30 > 35:28 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : formule indéterminée, "atome", nom atome, symbole atome

[>P] : Dernière petite remarque en sachant que c'est une autre petite réflexion par rapport à votre façon d'écrire pour ceux notamment qui n'ont pas une très belle écriture ou qui vont un petit peu trop vite. Si vous mettez et que vous ne faites pas attention avec l'histoire des majuscules minuscules si vous notez CuO de cette manière (l'enseignant écrit CUO au tableau). Est-ce que c'est bon ou pas ?

[>E] : non

[>P] : qu'est-ce qui va pas ?

[>E] : là le U il est à droite

[>P] : d'accord si vous montrez cela à un chimiste, il va comprendre dans CUO qu'il y a trois atomes qui se sont mis ensemble, en sachant, ça je vous le précise que ça ça n'existe pas c'est juste pour faire la transition avec ce que l'on a vu avant et cette partie-là. C'est juste pour vous montrer quelle différence on a si vous changez une minuscule avec une majuscule. Le C si vous laissez la lettre C seul, on avait dit que c'était quel atome ?

[>E] : le nucléon

[>P] : le C uniquement Mathieu ?

[>E] : le carbone

[>P] : le carbone Nicolas tu regardes dans le tableau C c'est le carbone

[>E] : ouais

[>P] : Si c'était Cu, c'est ce que je t'ai montré précédemment c’est-à-dire avec le u minuscule là pour l'instant au tableau le U est en minuscule ?

[>E] : oui

[>P] : au tableau pardon je parle sur mon tableau pas dans ton tableau sur mon tableau

[>E] : en majuscule

[>P] : en majuscule dans ton tableau on est d'accord que tu l'as mis en minuscule. Si tu le mets en majuscule, tu n'as que le C donc carbone. Le U c'est un atome dont vous avez peut-être entendu parler et dont on reparlera l'année prochaine c'est ce que l'on appelle de l'uranium. L'uranium commence par la lettre U donc on met U majuscule. Et le O cela reste l'atome que nous avons vu tout à l'heure

[>E] : l'oxygène

[>P] : l'oxygène donc si vous me mettez ça en écriture CUO tout en majuscule moi je vais comprendre que c'est ces trois atomes qui sont mis ensemble. En sachant que cela n'existe pas mais c'est ce que je vais comprendre.

27 - 35:28 > 35:52 [Modèle micro] [questions élèves]

Tag(s) : modèle moléculaire

[>E] : pourquoi ça n'existe pas ?

[>P] : parce que au point de vue structure, cela ne peut pas exister.

[>E] : mais pourquoi ça peut pas exister ?

[>P] : on expliquera après avec les modèles moléculaires.

[>E] : ah

[>P] : Tu verras. Donc comme cela ne peut pas exister, donc forcément vous aurez faux. D'où l'intérêt de faire attention lorsque vous allez écrire avec majuscule ou minuscule.

28 - 35:52 > 37:31 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", "atome", nom atome, "symbole", chiffre, nom molécule, symbole atome

[>P] : on passe à l'exemple suivant. Où là par contre vous notez. D'abord je l'explique et ensuite je vous laisse le noter.

[>E] : c'est deux ?

[>P] : on revient au deux. Je l'ai dit tout à l'heure l'exemple 2 tout à l'heure on le fait juste à l'oral Katalin. Je le répète il n'y a pas de souci. Le fameux dioxyde de carbone si maintenant avec de nouveau les couleurs, est-ce que quelqu'un est capable, avant de vous montrer la solution, d'interpréter. Vous avez le nom de la molécule. Est-ce que vous arrivez à me dire combien vous avez d'atomes de chaque espèce et en quelle quantité ? Que deux pour l'instant, trois Stephan tu dors. Allons-y. Et bien tu vas la relever Hugo (l'élève va écrire la formule au tableau). Allons-y tu commences par quelle partie dioxyde ou carbone ?

[>E] : dioxyde

[>P] : dioxyde alors tu peux détailler ?

[>E] :

[>P] : oui un petit peu plus fort s'il te plaît

[>E] : di donc il y en a deux

[>P] : d'accord. Allez Hugo ensuite. Oxyde c'est pour quoi ?

[>E] : oxygène

[>P] : d'accord, donc tu vas avoir combien d'atomes d'oxygène ?

[>E] : deux

[>P] : deux atomes d'oxygène. Ensuite après de carbone est-ce que l'on précise la quantité ?

[>E] : non

[>P] : donc il y en aura

[>E] : un

[>P] : un seul et quel type d'atome forcément ?

[>E] : carbone

[>P] : le carbone. Le carbone le symbole c'est ? Nicolas s'il te plaît. Le carbone le symbole ?

[>E] : C

29 - 37:31 > 38:17 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "formule chimique", nom indéterminé, "gaz", empirique, formule indéterminée, "atome", nom atome, composé chimique

[>P] : d'accord donc vous allez avoir le C et le dioxyde O2. Donc vous retrouvez la fameuse formule que vous m'aviez parlé depuis la cinquième que vous avez vue certainement en SVT à chaque fois que l'on parlait du dioxyde de carbone c'était le gaz qui était présent dans les boissons gazeuses vous me parliez à chaque fois de CO2. Le problème c'est qu'en cinquième on ne travaillait pas sur ça à partir de maintenant comme vous l'avez vu et que vous commencez à comprendre ce que veut dire CO2 vous avez le droit de l'utiliser même si quand vous parliez de CO2 on savait que c'était le dioxyde de carbone mais à partir de maintenant vous savez que le dioxyde de carbone c'est constitué d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène. À partir de maintenant vous comprenez à quoi correspond le CO2 : un atome de carbone, deux atomes d'oxygène

30 - 38:17 > 41:43 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : symbole indéterminé, formule indéterminée, "atome", nom atome, nom indéterminé, "formule chimique", chiffre, symbole atome, "équations", "formule chimique", symbole atome, "indice"

[>P] : non Katalin

[>E] : non

[>P] : tu ne m'as jamais entendu parler de CO2 tu m'as jamais

[>E] : non

[>P] : alors t'es une des rares

[>E] : ouais non

[>P] : en attendant qu'elle réfléchisse à ce qu'elle veut dire, vous pouvez noter svp l'exemple 2

[>E] : monsieur mais je comprends pas pourquoi le C il est avant ?

[>P] : alors

[>E] : ou sinon cela aurait été O2C ?

[>P] : alors si tu notes O2C je te compte bon pas de problème puisque oui Hugo

[>E] : .....

[>P] : tu notes ça, je te compte bon pas de problème puisque dans O2C je retrouve mes deux atomes d'oxygène et le 1 qui est sous-entendu un atome de carbone il va y avoir tout simplement une convention, un choix qui va être mis en place concernant l'ordre des lettres. Comme les atomes de carbone sont très importants et on les utilise très souvent on va tout simplement mettre en premier

le carbone après on mettra l'hydrogène et après on mettra l'oxygène en fait on va suivre l'ordre que je t'ai mis dans le tableau. On commencera par le carbone après l'hydrogène et après l'oxygène

[>E] : et calcium c'est plus important que d'autres ?

[>P] : alors on verra après que suivant la façon de noter tu peux des fois mettre le calcium et après l'oxygène. Donc ça après je vous détaillerai cela au fur et à mesure pourquoi on met en premier celui-là et pas l'autre. Mais quand tu as en premier les trois atomes on va dire les principaux, C, H, O tu suis cet ordre-là . C'est exactement comme on a vu le sens du courant électrique. On a vu que l'on partait du + vers le - c'est un choix qui a été fait une convention donc on fait ce choix-là donc si tu me notes ça je te mets les points il n'y pas de problème on te comprend c'est après au fur et à mesure des formules chimiques que l'on notera plus de cette manière-là

[>E] : c'est comme H2O

[>P] : voilà donc en fait et tu verras aussi pourquoi lorsque l'on attaquera la dernière partie de ce chapitre-là lorsque l'on va revenir sur les équations de réaction. On verra que quand il faudra ajuster ces équations, je vous expliquerai à quoi correspond ajuster les équations de réaction, on verra qu'on finira toujours par l'oxygène. Donc c'est pour ça aussi qu'on met en dernier. Donc je répondrai à tes questions au fur et à mesure t'inquiète pas j'y reviendrai sans problème c'est bon

[>E] : oui oui

[>P] : donc je vous laisse noter la composition si c'est pas déjà fait (Les élèves notent sur leur feuille). Donc mettez bien à chaque fois l'indice en bas et mettez bien le O en majuscule. (En aparté avec un élève) Ça tu l'as noté aussi ? Par contre faudra que je te le remonte si tu veux noter la réponse. D'accord je te le remontrerai la prochaine fois.

31 - 41:43 > 43:21 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : modèle moléculaire, "molécule", nom molécule, couleur, "atome", nom atome, formule molécule, chiffre

[>P] : de nouveau si vous avez la semaine prochaine votre petite boîte avec les modèles moléculaires, est-ce que vous pourriez me dire ce que vous allez piocher dans votre boîte pour constituer, faire le schéma de la molécule de dioxyde de carbone. Alors oui Yohann (l'enseignant montre les modèles moléculaires aux élèves)

[>E] : rouge

[>P] : alors rouge combien ?

[>E] : (parle trop doucement)

[>P] : j'ai pas entendu

[>E] : deux

[>P] : deux et ensuite que des rouges ?

[>E] : et un blanc, blanc un

[>P] : alors blanc un attend pour le rouge c'est par rapport au fait que ce soit noté atome d'oxygène ou pas Romane ? Oui.

[>P] : oui alors nous sommes d'accord. Est-ce que par contre, comme je vois que tu n'as pas ton cahier, est-ce que Sylvie tu peux montrer, est-ce que tu as ton tableau de la fois dernière ?

[>E] : oui

[>P] : oui est-ce que tu es d'accord qu'oxygène à côté dans la troisième colonne c'est la couleur c'est rouge ? est-ce que tu es d'accord ou pas Romane ?

[>E] : oui

[>P] : oui donc si tu en prends deux c'est pour les deux atomes d'oxygène. Par contre tu es d'accord qu'après on va devoir assembler un atome de carbone. Est-ce que carbone dans la couleur c'est blanc ?

[>E] : noir

[>P] : noir si tu avais mis du blanc ce serait pour l'atome d'hydrogène. Comme là l'atome d'hydrogène on en parle pas on va pas mettre de blanc forcément c'est par rapport aux couleurs que tu prends. Donc si après lorsque vous ferez là le modèle moléculaire de la molécule de dioxyde de carbone vous obtiendrez ça donc ça (l'enseignant montre le modèle moléculaire) après vous le ferez la fois prochaine. Je peux enlever ce qu'il y a au tableau ou pas ? Oui

32 - 43:21 > 43:57 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : modèle moléculaire, chiffre, liaison, "atome", nom atome, "molécule", formule molécule

[>P] : oui soit vous faites avec le modèle que je vous ai indiqué avec les liaisons donc séparées donc deux atomes d'oxygène un atome de carbone soit le modèle compact où vous allez regrouper cette molécule là CO2 celle qui est présente ici.

[>E] : c'est les mêmes monsieur ?

[>P] : comment

[>E] : c'est les mêmes ?

[>P] : tu représentes celle-là ou celle-là c'est la même chose. La seule différence c'est que là tu détailles dans le schéma éclaté tu détailles plus les liaisons c'est tout. D'accord.

33 - 43:57 > 46:01 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : empirique, nom indéterminé, "atome", "molécule", formule indéterminée, "mélange", nom atome, nom molécule, "formule chimique", composé chimique

[>P] : On attaque le dernier. Celui qui vous est indispensable à la vie en plus du dioxygène c'est l'eau. Première chose qui en principe doit vous tilter ou si je vous pose la question comme tout à l'heure. Est-ce qu'à partir du mot eau vous arrivez à trouver les atomes qui constituent cette molécule ? Oui

[>E] : hydrogène

[>P] : est-ce que c'est marqué hydrogène ?

[>E] : ben non mais oui mais comme on parle de hydro cela vient d'hydrogène

[>P] : d'accord c'est très bien c'est ce qu'on avait parlé la dernière fois hydro cela vient de hydro en grec. Donc l'eau d'accord donc forcément dans l'eau tu auras de l'hydrogène par rapport à ce que tu dis. Donc est-ce qu'il y aura que de l'hydrogène ?

[>E] : je ne sais pas

[>P] : tu ne sais pas parce que forcément dans le nom eau, il n'y a pas d'autres indications. Est-ce que quelqu'un a en tête ce qu'il y a aussi dans l'eau ? (L'enseignant attend un peu) En général c'est aussi pourquoi je vous la présente parce c'est une formule comme vous avez vu en sixième en SVT le dioxyde de carbone CO2, l'eau c'est une molécule qu'on vous parle assez régulièrement. Oui Hugo

[>E] : calcium

[>P] : il n'y aura pas de calcium.

[>E] : chlore

[>P] : pas de chlore ça après ce sera lorsque l'eau est mélangée après tu peux avoir dans un récipient de l'eau avec du calcium c'est comme une eau minérale que tu bois il y a de l'eau et des ions, du calcium dedans d'accord. il y a du ?

[>E] : oxygène

[>P] : oxygène

[>P] : Tout à fait pour arriver à quelle formule ? Est-ce que tu connais la formule de l'eau ?

[>E] : H2O

[>P] : merci Mathieu H2O est la formule donc chimique de l'eau. Si forcément vous ne la connaissez pas à partir du mot eau, à part la remarque de Katalin, le fait que dans hydrogène vous retrouvez hydro où il y a de l'eau, sinon après c'est une des rares molécules que vous allez rencontrer où malheureusement dans le nom vous ne pouvez pas retrouver les atomes qui constituent la molécule.

34 - 46:01 > 47:52 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "formule chimique", formule indéterminée, "atome", symbole atome, "molécule", chiffre, "indice", formule molécule

[>P] : Donc là si par contre je vous donne la formule directement H2O, est-ce que Estéban tu peux m'indiquer combien j'ai d'atomes de chaque sorte ?

[>E] : (inaudible)

[>P] : les H c'est quel atome H ?

[>E] : : (inaudible)

[>P] : t'en souviens plus H

[>E] : oxygène

[>P] : non, Léa

[>E] : hydrogène

[>P] : hydrogène H pour hydrogène j'en ai combien d'hydrogène ?

[>E] : 2

[>P] : d'accord donc première chose deux atomes d'hydrogène Ensuite O c'est pour ?

[>E] : oxygène

[>P] : oxygène il y en a combien oui ?

[>E] : un

[>P] : un seul, un atome d'oxygène. Donc votre molécule d'eau est constituée de deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. Celui-là vous me le notez l'exemple 3 est à noter. Est-ce qu'à part Mathieu vous n'aviez jamais entendu parler de H2O ?

[>E] : si dans les émissions

[>P] : oui en général dans les émissions scientifiques ils en parlent souvent

[>E] : non

[>P] : non pas ça

[>E] : dessins animés

[>P] : dessins animés pas de problème c'est très bien. S'il parle d'H2O dans les dessins animés c'est très bien. Apparemment ça t'a pas perturbé parfait (Les élèves notent sur leur feuille) Je vous laisse aussi noter à côté pour vous habituer comme quoi le 1 est sous-entendu. Si après vous voulez noter directement de cette manière-là sans mettre le chiffre 1 en indice vous notez directement H2O (...) Kevin des questions non tout est compris oui

35 - 47:52 > 48:38 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Modèles moléculaires] [Symbolique (nom)] [Travail individuel]

Tag(s) : "atome", modèle moléculaire, "molécule", couleur, nom indéterminé, nom atome

[>P] : (en aparté avec un élève) tu essaies de me réfléchir un petit peu pendant que les derniers finissent de noter si jamais dans ta petite boîte tu dois aller chercher les atomes de différentes sortes pour construire cette molécule, à ton avis, est-ce que tu as le tableau encore devant toi pour les couleurs ?

[>E] : ben il y a deux blancs pour hydrogène

[>P] : ouais

[>E] : et une boule rouge

[>P] : d'accord après dans ta façon d'expliquer c'est très bien après au fur à mesure d'essayer d'utiliser le vocabulaire plutôt que d'utiliser le terme boule même si moi aussi je l'ai utilisé tout à l'heure deux atomes d'hydrogène un atome d'oxygène même si dans ta boîte forcément ce sera des boules, y a pas de problème.

36 - 48:38 > 49:30 [Travail individuel]

[>P] : (les élèves notent dans leur cahier et l'enseignant circule dans la classe) Reste concentré Hugo (en aparté) Tu préfères que j'emploie le terme bille, non ? ça va aller ? (En aparté) Nicolas c'est bon ? (L'enseignant circule dans la classe et vérifie ce que notent les élèves).

37 - 49:30 > 50:19 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : modèle moléculaire, "molécule", nom molécule, "représenter"

[>P] : on en avait déjà parlé un petit peu de cette molécule qui a une configuration un peu bizarre mais qui après soit vous rappellera certains dessins animés comme Nicolas. Là aussi vous la reconstruirez de nouveau donc cette molécule d'eau lorsque vous la construirez vous verrez qu'elle a cette forme-là (l'enseignant montre le modèle éclaté et le modèle compact de la molécule d'eau) Donc encore une fois soit vous l'avez en modèle compact ou après si vous la représentez en modèle éclaté ce sera quelque chose comme ça. Donc soit l'une soit l'autre lorsque vous la construirez. Steven est-ce que c'est bon ou pas ?

[>E] : oui

[>P] : oui donc là c'est ce que je viens de vous expliquer avec soit le modèle éclaté soit le modèle compact. Une dernière chose à faire

38 - 50:19 > 52:20 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", "formule chimique", nom indéterminé, empirique, "atome", dimension, nom atome, chiffre, "indice", "symbole", symbole indéterminé, formule indéterminée, composé chimique

[>P] : on le fait à l'oral et on voit si on a le temps de noter. Ça peut vous arriver de dans les exercices dans le sens inverse. C'est-à-dire qu'on va vous donner la composition de la molécule et il faudra trouver la formule chimique. Là notre ami Maxime n'est pas là puisque c'était pour lui donc je vais partir sur l'exemple dont il m'avait parlé. Il s'agit du THC, je sais pas si vous vous souvenez. Le THC qui est donc présent dans les feuilles de cannabis, vous allez justement trouver le cannabinol donc tétra hydro cannabinol on vous donnera donc dans cette molécule. On vous indique que pour la composition de cette molécule vous trouvez 21 atomes de carbone, 30 atomes d'hydrogène et deux atomes d'oxygène. Donc si vous marquez déjà, je vois qu'Hugo il fait des grands yeux, déjà beaucoup plus d'atomes que celles qu'on a vu précédemment. Donc c'est déjà une plus grosse molécule. Ce que l'on vous demandera juste, c'est à partir de la composition que l'on vous donne d'indiquer la formule chimique. C'est-à-dire en utilisant les indices, les nombres, et les atomes les symboles des atomes. D'accord Katalin en essayant de respecter cette règle que je t'ai expliquée de suivre l'ordre qui est dans ton tableau, carbone, hydrogène, oxygène en sachant que si tu inverses c'est pas faux. Est-ce que quelqu'un aurait en tête la formule chimique du THC ? Je t'écoute

[>E] : C21

[>P] : oui

[>E] : H30

[>P] : oui

[>E] : O2

[>P] : d’accord ; ce que vous allez avoir comme formule chimique tout simplement C 21 H 30 O 2 c'est l'inverse de ce que l'on a travaillé jusqu'à présent. On vous donne la composition et vous revenez à la formule chimique.

39 - 52:20 > 52:54 [Langage symbolique non défini] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, "molécule", nom molécule

[>P] : Est-ce que sur l'ensemble vous avez des questions. Oui

[>E] : Pourquoi il y a de l'eau ?

[>P] : Pourquoi il y a de l'eau ?

[>E] : hydro

[>P] : alors hydro ce sera pas forcément toujours l'eau, c'est hydro qui fait partie donc l'hydrogène c’est-à-dire que comme tu l'as dit tout à l'heure dans la molécule (inaudible) dans la molécule d'eau tu as l'hydrogène mais tu peux retrouver de l'hydrogène dans d'autres molécules autres que l'eau d'accord.

40 - 52:54 > 53:17 [Transition]

[>P] : Vous revoyez ça bien pour lundi prochain pour qu'on puisse attaquer le TP sur les modèles moléculaires svp et vous rangez les tabourets en sortant.

Annexe 10 : transcription de la séance « ordinaire » 2 (Aude)

1 - 00:00 > 01:48 [Transition]

2 - 01:48 > 03:41 [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", "modèle", "particule", "gaz", "atome", "représenter", dimension

[>P] : la semaine dernière on a commencé à s'intéresser à définir ce qu'était une molécule. Première chose. Et on avait commencé, donc ceux qui étaient absents, vous reprendrez évidemment, à s'intéresser à comment représenter une molécule. Je vous avais dit qu'après dans un second temps nous allons même les modéliser, un petit peu parce qu'on peut pas forcément voir, d'accord, à l'œil nu, parce que je vous avais dit qu'une particule c'était une particule invisible à l'œil nu. D'accord. Donc tout simplement, on avait vu une première activité. Quelqu'un peut me dire. C'était une activité d'histoire des sciences. C'était une activité historique. Qu'est-ce qu'on avait pu tirer de cette activité ? Alors cette activité était à terminer. On l'avait faite sauf la dernière question. Alors qu'est-ce que l'on avait pu voir. On avait deux scientifiques qui étaient en jeu. Alors premier nom du scientifique qui était important ? Matthieu

[>E] : Avogadro

[>P] : alors qu'est-ce qu'il avait dit Avogadro ? Alors on l'avait fait dans la troisième question, pour t'aider, troisième question, on avait essayé de mettre en évidence, alors vous aviez une formule un petit peu ancienne je vous l'avais mise au goût du jour alors je vous avais mis la définition actuelle. Alors selon Avogadro de quoi est constituée ce que l'on appelle une molécule. Kylian ?

[>E] : les molécules constituantes d'un gaz quelconque ne sont pas formées d'une seule molécule élémentaire. Elles résultent d'un certain nombre de ces molécules réunis en une seule.

[>P] : alors ça c'est une partie du texte. Mais on avait résumé, on n'avait pas dit aussi compliqué. C'était la question 3 de l'activité. On avait plus que la question 4 à faire. Oui Matthieu

[>E] : une molécule est composée d'un certain nombre d'atomes

[>P] : très bien on va reprendre tous ensemble le texte. On va surtout reprendre la partie qui était intéressante. On va reprendre tous ensemble le document

3 - 03:41 > 05:17 [Modèle micro] [Professeur seul]

Tag(s) : "molécule", "gaz", "atome", "particule", dimension

[>P] : normalement ceux qui étaient absents, est-ce que je vous ai donné la photocopie ? Alors au milieu du texte on vous dit, l'extrait ci-dessus, donc l'extrait ci-dessus c'était assez ancien. On vous disait selon Avogadro, donc Avogadro c'est le XIXe siècle, Avogadro fait l'hypothèse suivante : les molécules constituantes d'un gaz quelconque ne sont pas formées d'une seule molécule élémentaire mais résultent d'un certain nombre de ces molécules réunies en une seule. Donc ça Kylian c'est ce que tu m'as cité mais c'est un petit peu complexe donc justement j'avais cherché à vous la simplifier et à vous la dire d'une certaine façon qui est celle correcte aujourd'hui. Donc là cette phrase qui est un petit peu compliquée aujourd'hui on peut la comprendre beaucoup plus simplement en disant les

molécules d'un gaz quelconque ne sont pas formées d'un seul atome mais résultent d'un certain nombre d'atomes réunis en une seule molécule. Donc on avait vu que les molécules c'est ce qui constitue un gaz. On avait fait, rappelez-vous on avait l'animation. On avait vu que les molécules étaient en mouvement, vous vous en rappelez de ça. Donc ces petites particules qui sont en mouvement donc elles sont elles-mêmes constituées de particules encore plus petites et les particules encore plus petites on les appelle des ?

[>E] : atomes

[>P] : des atomes. Donc ça c'est la question 3. On avait bien tous corrigé la question 3. D'accord ?

[>E] : la quatre ?

[>P] : la quatre on en avait parlé mais je n'avais pas posé une correction globale ensemble. Donc on va la refaire.

4 - 05:17 > 05:55 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : "atome", nom indéterminé, "modèle", "gaz", empirique, "particule", dimension, couleur, modèle moléculaire, composé chimique

[>E] : on avait vu une image avec les atomes

[>P] : on avait vu on avait juste parlé de l'oxygène et du dioxygène. C'est la question 4 (question 4 : tu as vu dans le premier chapitre que l'air était composé de dioxygène et de diazote : en t'aidant du texte ci-dessus, explique ce qui différencie l'oxygène du dioxygène). Donc on va y revenir

[>E] : et c'est l'ensemble qui bouge ?

[>P] : alors oui ça c'est ce qui permettait d'expliquer, quand on fait tout simplement, quand on a modélisé les gaz dans la seringue, on a modélisé les petites particules qui bougeaient et je vous avais expliqué que les deux petites particules réunies, cela faisait deux petits cercles rouges et tout simplement on allait l'expliquer c'est ce qu'on va expliquer maintenant, enfin dans quelque temps

[>E] : et vous allez expliquer pourquoi elles sont rouges ?

[>P] : ben bien sûr. Donc question 4

5 - 05:55 > 06:38 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : empirique, nom indéterminé, "gaz", nom espèce chimique, nom atome, "atome"

[>P] : donc vous reprenez l'activité. Donc avec tout ce que l'on vient de redire, vous reprenez l'activité. Avec tout ce qu'on vient de redire, on vous dit : « tu as vu dans le premier chapitre que l'air était composé de dioxygène et de diazote. En t'aidant du texte ci-dessus, explique ce qui différencie l'oxygène du dioxygène ». Alors rappelez-vous petit rappel du chapitre 1. C'est les deux gaz, le dioxygène et le diazote, c'est les deux gaz présents majoritairement dans l'air qu'on respire. Alors Solène je t'écoute ?

[>E] : on l'avait déjà fait

[>P] : alors on l'avait fait mais on n'avait pas posé la correction. On va le refaire pour tout le monde sachant qu'il y avait eu trois absents la semaine dernière.

[>E] : l'oxygène est un atome alors que le dioxygène est constitué d'atomes d'oxygène

[>P] : donc très bien

6 - 06:38 > 09:13 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", nom atome, nom molécule, "molécule", formule molécule, "formule chimique", "indice", chiffre

[>P] : donc l'oxygène qui est l'atome, d'accord alors que le dioxygène, on vous le dit dans le texte, le dioxygène, alors pour ceux qui n'ont pas encore trouvé la partie, c'est le dernier paragraphe. Donc on vous dit "grâce à ses travaux de recherche, Avogadro avait réussi à expliquer quelle était la différence entre l'atome d'oxygène et la molécule de dioxygène". Donc on vous le dit dans le texte, le dioxygène c'est une molécule. Donc si on va un petit peu plus loin, on vous donne la formule chimique du dioxygène. Alors c'est quoi, Matthieu ?

[>E] : c'est deux atomes d'oxygène

[>P] : alors parce que la formule chimique c'est quoi ? C'est écrit dans le texte. Comment tu l'écris ?

[>E] : O2

[>P] : O2. Donc O, le deux je vous ai dit, faites attention, il sera toujours en bas. Pas question de le faire aussi grand que le O, pas question de le mettre en haut. D'accord. On dit qu'il est en indice. Ça vous avez déjà entendu en math. Non ? Donc je vous le dis, un indice c'est quand on a un chiffre placé en plus petit en bas à droite. D'accord, donc le deux cela signifie qu'on a deux quoi ? Clément

[>E] : atomes d'oxygène

[>P] : alors deux atomes d'oxygène. Donc le 2 signifie que le dioxygène, je vais prendre le stylo noir vous continuez d'écrire normalement, est constitué de deux, et vous soulignez, atomes d'oxygène. Alors quand on a deux atomes d'oxygène, on aura toujours, le fait de mettre un deux ça se traduit par di. D'accord.

7 - 09:13 > 10:07 [Langage symbolique implicite] [Symbolique (formule)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : nom molécule, "molécule", "atome", nom atome, nom indéterminé, symbole indéterminé, chiffre

[>P] : donc on a parlé du dioxygène, le diazote c'est le même principe ou pas, à votre avis ? Le diazote, si on dit la molécule de diazote, si je vous demande de quoi elle est composée ? Normalement, si on raisonne sur le même principe, Yannick ?

[>E] : de deux atomes de de d'azote ?

[>P] : très bien. Est-ce que vous connaissez la formule de la molécule de diazote ? Je ne sais plus si je l'ai donnée. Vous ne la connaissez pas ?

[>E] : c'est euh A2

[>P] : alors est-ce que c'est A2 ?

[>E] : pour l'azote, en fait, c'est le A tout seul

[>P] : alors l'azote c'est A tout seul. Alors pourquoi vous dites A déjà ?

[>E] : Azote

[>P] : Azote parce que vous avez fait la logique simple, c'est normal, O pour oxygène, C pour, à votre avis, quoi ? C vous le connaissez aussi.

[>E] : carbone

[>P] : carbone. Donc A, vous avez pensé que c'est l'azote. Si je vous ai demandé pourquoi, c'est parce qu'il y a une petite exception. En fait azote, c'est pas la lettre A, c'est la lettre N. Tout ça on va le noter après. La lettre N pourquoi ? Tout ça parce qu'en anglais l'azote on l'appelle nitrogène. Donc on va prendre la langue anglaise de référence. D'accord ? Tout simplement. Mais il me semble que je l'avais dit déjà à l'oral. D'accord ? Donc est-ce que cela va pour cette partie-là ? Donc ça c'était le retour sur l'activité.

8 - 10:07 > 11:13 [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", "atome"

[>P] : donc on va noter en bilan. Donc si on doit répondre à notre question : de quoi est constituée une molécule ? Normalement tout le monde est capable de répondre avec ce que l'on a fait la semaine dernière et ce que l'on vient de revoir là pendant quelques minutes. Nicola s'il te plaît. Tu te tais. D'accord. Alors Camille, de quoi est constituée une molécule ? Il faut t'aider de la question 3. Donc prenez votre stylo rouge, ce sera une notion.

[>E] : de plusieurs euh atomes.

[>P] : donc une molécule c'est constitué de plusieurs atomes, d'accord, soit de même nature soit de natures différentes. (L'enseignant écrit au tableau) on va noter tout simplement une molécule, une molécule est un assemblage d'atomes.

9 - 11:13 > 11:46 [Transition]

(L'enseignant fait l'appel)

10 - 11:46 > 12:55 [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", "gaz", "molécule", "liquide", "solide", dimension

[>P] : donc une molécule est un assemblage d'atomes. Donc on ne s'est pas arrêté sur le terme d'atomes. Donc atome c'est quand même un nom assez particulier dont vous avez peut-être entendu mais vous ne pouvez pas forcément expliquer. Donc atome pourquoi on a donné ce nom à votre avis ? À moins que quelqu'un l'ait vu dans une revue ou lu par curiosité.

[>E] : ben moi ça me fait penser, comme ça bouge tout le temps, moi ça me fait penser à atomique

[>P] : alors pourquoi ça bouge tout le temps ? Attention. On a dit que dans un gaz les molécules bougeaient mais j'ai pas dit que ça bougeait tout le temps. Dans un gaz oui mais peut-être que dans les autres états, les liquides ou les solides, ça bouge peut-être pas, je n'en sais rien. On l'a fait ou pas ?

[>E] : non

[>P] : non on l'a pas encore fait donc on va. Donc non. Mais bon, voilà on est là pour se tromper, pour essayer. Oui ?

[>E] : atome parce que c'est petit. C'est encore plus petit.

[>P] : alors c'est sûr que c'est petit mais ça n'a pas de rapport. Alors dernier essai parce qu'après je vous le dit parce que vous ne pouvez pas le deviner tout seul. Donc personne n'a d'autres idées ? Personne ne l'a entendu déjà ? Non ? Vu dans un magazine ?

11 - 12:55 > 14:47 [Modèle micro] [Professeur seul]

Tag(s) : "atome", "particule"

[>P] : alors atome cela vient du grec "atomos". C'est pour votre culture générale ça. On ne l'apprend pas par cœur. Alors "atomos", cela voulait dire que l'on ne pouvait pas couper, qu'on ne pouvait pas diviser. Alors l'atome, on l'appelle aussi particule élémentaire de la matière. C'est-à-dire, c'est comme si on avait un élément de base, d'accord, à partir duquel on va pouvoir construire. Donc cet élément, donc qui porte le nom d'atome, qui vient du grec ancien, qui signifie indivisible, qu'on ne peut pas couper. D'accord. Donc ça on va quand même le noter. Ce n'est pas une notion donc on va le noter en noir. D'accord. Mais vous le retenez parce que l'atome on va le revoir. Pas cette année mais l'an prochain. Donc atome vient du grec "atomos" qui signifie qui ne peut pas être coupé, qui ne peut pas être coupé, alors quand on peut pas couper on dit indivisible. Ça va le terme, ça va pour tout le monde le terme indivisible ?

[>E] : non

[>P] : indivisible ça veut dire que l'on ne peut pas diviser, Antoine. On ne peut pas diviser, on peut pas le séparer, on peut pas le couper. On peut pas prendre un atome et le couper. D'accord. C'est bon. Donc il ne peut pas être coupé. Je mets les deux significations. Tu notes les deux. (L'enseignant note au tableau)

12 - 14:47 > 16:25 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", nom atome, "molécule", formule molécule, chiffre, nom indéterminé

[>P] : alors justement les atomes. Alors on a parlé de l'oxygène. L'oxygène on l'a vu dans le premier chapitre, donc cela ne vous est pas inconnu. L'azote, on l'a fait également dans le premier chapitre, le carbone j'en ai parlé également. On le connaît aussi. Alors est-ce que vous en connaissez d'autres ?

[>E] : l'eau, H2O

[>P] : alors H2O, tu penses que c'est un atome ?

[>E] : ah non

[>P] : alors ce serait quoi ?

[>E] : c'est une molécule

[>P] : alors

[>E] : de trois atomes, un atome d'hydrogène et deux atomes d'oxygène

[>P] : non pas tout à fait mais tu n'es pas loin. En fait c'est au niveau des chiffres que c'est pas correct mais au niveau du nom des atomes c'est correct. D'accord, on va y revenir de toute façon sur l'eau. Alors je repose ma question, est-ce que vous connaissez d'autres atomes ? Oui alors. On a dit ceux que l'on a déjà vus pour le moment : oxygène, carbone, azote. Clément ?

[>E] : l'hydrocarbure

[>P] : hydrocarbure, non. Hydrocarbure c'est une famille, c'est à part. C'est constitué d'atomes mais ce n'est pas un atome.

[>E] : comment il s'appelle déjà celui qui vient de la (inaudible)

[>P] : l'hélium

[>E] : ah voilà

[>P] : D'accord OK. A part ça vous n'en connaissez pas d'autres. Dans ce qu'il a dit Yannick, il en y a un autre très très connu normalement

[>E] : dihydrogène

[>P] : l'hydrogène

13 - 16:25 > 17:33 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : nom indéterminé, "élément chimique", "atome", composé chimique

[>P] : alors tout ça carbone, hydrogène, oxygène, etc. Alors on va quand même un petit peu préciser alors en fait tout ce que l'on a dit là depuis le départ alors en fait c'est des éléments chimiques. Alors la notion d'élément chimique, c'est une notion pas simple à transmettre, pas simple forcément à comprendre alors on ne va pas vraiment en parler dans le détail. Mais clairement à votre niveau, ce qu'il faut retenir c'est ce qu'est un élément chimique. Donc le carbone c'en est un, l'hydrogène, l'oxygène. Qu'est-ce que vous m'avez dit d'autre, l'azote. Il y a également tous les métaux. Le cuivre, c'est un élément chimique, le fer, l'or, l'argent. Vous en connaissez d'autres ? Aluminium, zinc, d'accord. Donc tout ça c'est des éléments chimiques et à un élément chimique on associe souvent l'atome. Alors pour faire simple, à votre niveau, vous retenez juste qu'un atome en fait, c'est la plus petite quantité d'un élément chimique. En réalité la notion d'élément chimique, elle est un peu plus complexe que ça. Elle demande un petit peu plus de développement mais on s'en limitera là.

14 - 17:33 > 19:28 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "élément chimique", empirique, nom indéterminé, "atome", nom atome, "molécule", nom molécule, composé chimique

[>P] : Donc vous savez combien, environ, il y a d'éléments chimiques sur Terre ? Environ de sortes d'atomes différents ? Oui

[>E] : l'aluminium, ça en fait partie ou pas ?

[>P] : l'aluminium, c'est un élément chimique. Il y a les atomes d'aluminium, pas de problème. Oui ?

[>E] : j'imagine qu'il y en a des milliards.

[>P] : alors des éléments chimiques, il y en a beaucoup moins en réalité

[>E] : il y en a trois

[>P] : non, non pas trois. On en a déjà cité plus que trois, Aymeric. Donc en fait, il faut compter une bonne centaine. Le dernier chiffre que j'ai entendu est 118. Mais il faut savoir qu'on en découvre, des fois. La science avance donc on peut découvrir de nouveaux éléments chimiques. Donc cela voudrait dire qu'il y aurait 118 atomes différents. Vous imaginez toutes les combinaisons que l'on pourrait faire. C'est énorme en fait toutes les molécules qui pourraient découler de tous ces éléments, tous ces atomes. C'est énorme. Malgré tout, on a toujours, donc en fait il y a énormément de molécules qui sont faits d'atomes principaux. Donc on va trouver à votre avis souvent lesquels ? Ben souvent ceux que vous m'avez cité en premier. Oui ?

[>E] : ben le plastique

[>P] : non souvent quel atome on va retrouver ? Attention

[>E] : l'oxygène

[>P] : alors on va retrouver l'oxygène qui est très présent sur Terre

[>E] : dioxygène

[>P] : le dioxygène c'est la molécule. Attention. Oui ?

[>E] : l'azote

[>P] : l'azote oui on le retrouvera assez régulièrement. Le carbone c'est vraiment on va dire le nombre de molécules qui sont faites à base de carbone, c'est énorme sur Terre. D'accord. L'hydrogène également. D'accord. Alors nous on ne s'intéressera pas à toutes les possibilités. On s'intéressera aux molécules que l'on retrouve très régulièrement, faites notamment à partir de carbone, d'oxygène, d'hydrogène, d'azote. D'accord. Voilà on se limitera quasiment qu'à ça cette année. Après vous en découvrirez dans la suite de vos études. Rassurez-vous.

15 - 19:28 > 20:33 [Modèle micro] [Professeur seul]

Tag(s) : "atome", liaison, "molécule"

[>P] : OK donc vous notez à la suite, alors est-ce que j'avais tout fini de noter. Donc vous notez juste la dernière phrase (note au tableau). Donc plusieurs atomes peuvent donc se lier entre eux, peuvent donc se lier entre eux, et former des molécules. Donc là on a posé la définition de ce qu'est une molécule. On a brièvement parlé de ce qu'est un atome. C'est quand même important parce que c'est quand même ce qui constitue une molécule. Je vous rappelle que l'année prochaine normalement vous verrez ce qu'est un atome plus dans le détail mais ça, ce sera l'an prochain. Donc là on a posé la définition donc maintenant on va s'intéresser à la représentation d'une molécule.

16 - 20:33 > 21:39 [Professeur seul] [Transition]

[>P] : donc petit a définition. Vous marquez petit b représentation et modélisation. Alors représentation, cela nous concernera plus la semaine prochaine (note au tableau). Donc pour commencer cette partie b, je vais vous distribuer une petite activité. Je vais vous laisser deux trois minutes même plus s'il faut pour la lire et pour essayer d'y répondre. Alors pas de panique. Si vous ne vous en rappelez plus, c'est pas grave. On va le faire ensemble. Ce n'est pas une activité qui est notée. Elle n'est pas évaluée par compétences. Donc il n'y a aucun problème sur ça. D'accord. Donc vous la collez, vous prenez le temps de la lire. Après on la fera la lecture ensemble et on en discute.

17 - 21:39 > 23:09 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, "élément chimique", "atome", "mélange", empirique, "molécule", dimension, composé chimique

[>E] : madame il y a aussi le laiton

[>P] : alors non parce que .... Alors bonne question. Ça c'est comme le bronze. Alors pourquoi par exemple le bronze c'est pas un élément chimique ? Est-ce que quelqu'un le sait ? Pourquoi c'est pas. Il n'y a pas d'atomes de bronze, ça c'est sûr. Pourquoi ? Oui

[>E] : euh parce que, je sais pas, mais en fait j'ai une question

[>P] : oui attend, je peux pas prendre deux questions à la suite. Je réponds d'abord à la question d'Aymeric. Alors pour faire simple, le bronze, comme ce que tu m'as dit, c'est tout simplement un mélange. D'accord. Donc c'est ce que l'on appelle un alliage. C'est donc soit le mélange de deux métaux, soit un métal avec un autre composé. Donc quand tu fais un mélange, ce n'est pas un élément chimique pur, c'est pas un. Voilà. C'est juste la différence. Donc c'était quoi ta question Matthieu

[>E] : ben le plastique

[>P] : oui

[>E] : c'est une molécule ou c'est un alliage ?

[>P] : alors dans le plastique. Quand on parle d'alliage c'est qu'il y a au moins un élément métallique. D'accord ? Avec soit un autre métal soit avec un autre composé. D'accord ? Pour les plastiques, y a pas de métal qui rentre en compte. Alors c'est un mélange de plusieurs atomes, en général, le plastique c'est des assez grandes molécules et il y a en général des sous-catégories de plastiques. D'accord, il y a des familles. Cela n'a pas de rapport avec les alliages. D'accord, c'est bon ?

18 - 23:09 > 25:09 [Travail individuel]

[>P] : je vais vous distribuer la suite. Donc allez-vous collez (distribution de la suite du texte)

[>E] : madame. On va avoir autre chose à faire après ?

[>P] : non après celle-là tu verras le temps ça passe vite

[>E] : là c'est quoi des matières euh assez liquides, je ne sais pas ce que c'est en fait. C'est pas

[>P] : je ne sais pas de quoi tu parles Aymeric

[>E] : on a montré en fait une sorte de liquide, comme un peu du sirop ou je sais pas quoi mais en fait c'est (inaudible) enfin ça se

[>P] : ben il faudrait me retrouver le nom mais là cela n'a pas de rapport direct avec ce que l'on fait. Tu me diras la semaine prochaine. Oui. Donc allez, prenez le temps de lire. Je vous laisse un petit moment (lecture individuelle élève)

19 - 25:09 > 26:56 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", nom molécule, empirique, "gaz", nom indéterminé, nom mélange, nom espèce chimique, composé chimique

[>P] : alors si vous avez déjà la réponse à la question 1 vous la notez évidemment. Vous participerez quand on sera arrivé là alors. Pour vous mettre sur la voie, on vous parle de quelle molécule dans le texte ? Cette molécule. On parle de quelle molécule dans le texte ? Antoine, tu (inaudible) un petit peu. Donc le dioxyde de

[>E] : (inaudible)

[>P] : parle plus fort. Donc de carbone. Donc dioxyde de carbone. Donc cette molécule-là rappelez-vous, vous l'avez vue au programme de cinquième l'an passé. Alors on l'avait vu dans quoi ? Alors là je fais appel à vos souvenirs. Il faut retrouver la petite case dans le cerveau. Oui

[>E] : (inaudible)

[>P] : alors on va dire après. Alors dans quoi, dans quel contexte on l'avait, vous pouvez me dire les deux ?

[>E] : la respiration

[>P] : alors la respiration, c'est plus en SVT. Alors ici on l'a fait. Oui

[>E] : c'est toujours en SVT.

[>P] : donc c'était toujours dans la respiration.

[>E] : les échanges euh

[>P] : donc ça c'était toujours en SVT

[>E] : de gaz dissous

[>P] : gaz dissous. Alors oui alors on avait pris quel exemple on avait vu que le CO2 donc le dioxyde de carbone c'était un gaz dissous dans quel type de chose ? Dans quoi on l'avait étudié nous ?

[>E] : dans l'eau

[>P] : plus précisément ? On avait fait l'eau ...

[>E] : gaz

[>P] : l'eau gazeuse. L’eau pétillante d'accord. On avait fait également le coca. On avait pris l'exemple du coca. D’accord. On avait dit tout simplement que le gaz qui était, qui faisait la boisson pétillante,

c'était du dioxyde de carbone. OK donc rappelez-vous, cette molécule, elle ne vous est pas inconnue. C'est pour cela que je l'ai choisie. Oui. Terminé ?

20 - 26:56 > 28:58 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Travail individuel]

Tag(s) : "molécule", nom molécule, "formule chimique", "atome", nom atome, symbole atome

[>P] : (Les élèves travaillent individuellement. Le professeur circule dans la classe pour corriger les élèves individuellement. Les questions posées aux élèves portent sur le nom et la formule de la molécule de dioxyde de carbone.) OK alors oxyde. Oxyde tu penses que ça existe ? Tu penses que ça existe l'atome d'oxyde ou l'on n'aurait pas fait une abréviation. C'est la seule erreur sinon c'est parfait. Alors ici, je regarde Séverine, c'est correct. Maintenant on essaie de réfléchir sur la suite. (Échanges avec un autre élève) Tu ne te rappelles plus de la formule (échanges avec un autre élève) Alors ici c'est fait. Alors il y a de l'idée. Ce n'est pas complet. Là tu m'as expliqué deux termes sur les trois.

[>E] : il faut faire quoi à la deuxième question.

[>P] : alors ici la première déjà c'est correct. Alors la deuxième question. En utilisant le nom, dioxyde de carbone OK, quelle relation tu pourrais faire entre les différents termes qui font le nom de la molécule et la formule chimique de la molécule ? Est-ce que tu ne pourrais pas associer, décomposer le nom comme pour donner un sens à la formule chimique. D'accord ? Oui. (Échanges avec un autre élève) Parfait ça marche. Alors tu vois ici on te dit oxyde et pas

[>E] : dioxyde

[>P] : alors en fait ici on avait oxyde alors que l'on vient de voir que O, normalement c'est pour

[>E] : oxygène

[>P] : oxygène. Donc là on fait juste un raccourci mais c'est bien pour l'atome d'oxygène. D’accord. Très bien.

21 - 28:58 > 33:45 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : empirique, "gaz", "molécule", nom molécule, "formule chimique", nom espèce chimique, nom indéterminé, formule indéterminée

[>P] : Bon alors globalement vous êtes la moitié à avoir trouvé la formule. Certains font la question 2 plus ou moins correctement. Si vous vous trompez, ce n’est pas grave on est là pour ça. Je le répète. Oui Matthieu

[>E] : pour la deux ?

[>P] : pour la deux, attends on va le faire ensemble. Donc première étape, on va lire le texte. Alors qui veut lire le texte. Aymeric. Tu lis bien fort les autres vous vous taisez. (Lecture du texte)

[>E] : D'ici un peu moins d'un mois maintenant, Paris va accueillir la conférence sur le climat (COP 21).

[>P] : alors c'est la COP 21. Si vous regardez le journal télévisé le soir ou le week-end vous en entendez nécessairement parler. On en entend parler tous les jours. Je vous en parlerai plus une fois qu'Aymeric aura lu tout le texte.

[>E] : Cette conférence va réunir 195 pays et aura lieu du 30 novembre au 11 décembre 2015 au parc des expositions de Paris Le Bourget. Cette conférence aura pour objectif d'aboutir à un accord international afin de limiter le réchauffement climatique. Les différents représentants (scientifiques et politiques) discuteront donc évidemment des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane.

[>P] : Solène, tu prends la suite

[>E] : Nous allons nous intéresser à la molécule de dioxyde de carbone que tu as déjà étudiée en SVT et en chimie l'an passé. Sur Terre, la molécule de dioxyde de carbone est présente sous forme de gaz qui contribue au réchauffement climatique : son nom sera donc souvent cité lors de la conférence. Voici une liste de traductions du nom de cette molécule dans différentes langues.

[>P] : alors vous avez en français, en français tout le monde connaît ici dioxyde de carbone. Alors anglais, anglais cela ressemble sauf le carbone est mis avant le dioxyde et on enlève le e. Ensuite en chinois, je ne vais pas vous le faire j'ai jamais parlé un mot de chinois. On voit tout de suite pour nous que c'est incompréhensible. D'accord. Cela ressemble à des dessins pour nous. Alors en espagnol, donc ça ressemble assez fort au français, d'accord mais bon c'est quand même un petit peu différent, dioxydo carbono. En allemand, n'ayant pas fait d'allemand, je m'excuse si je traduis mal. Donc kohlendioxid. Heureusement et là vous voyez que je n'ai pris qu'un échantillon de langue. Donc heureusement une molécule ne se reconnaît pas seulement par son nom mais elle se représente également par sa formule chimique. D’accord. Donc première question : connais-tu la formule chimique du dioxyde de carbone ? Donc le dioxyde de carbone, soit vous l'appelez comme ça, soit vous l'appelez gaz carbonique, ça c'est surtout en SVT, je l'admets. Il n'y a pas de problème mais nous on parlera peut-être ou en termes de gaz carbonique. La formule chimique vous l'avez vue l'an passé en SVT et également dans mon cours. Donc qui peut me la rappeler cette formule ? Noémie

[>E] : CO2

[>P] : CO2, alors très bien. Première question donc la formule chimique. Vous faites une phrase et vous écrivez noir ou bleu peu importe. Donc la formule chimique (écris au tableau), la formule chimique du dioxyde de carbone

22 - 33:45 > 34:53 [Langage symbolique non défini] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, formule indéterminée, "atome", "indice", chiffre

[>E] : du coup Madame, le 2 on le met en tout petit ?

[>P] : alors on met en tout petit ben justement attends deux minutes. Donc CO donc le deux je le mets en tout petit en haut en bas de quel côté ?

[>E] : en haut

[>E] : et non en bas

[>P] : rappelez-vous O2, dioxygène. Je l'avais mis en bas ou

[>E] : en bas

[>P] : je l'avais mis en bas. Donc c'est toujours en indice, en bas à droite, à côté de la lettre, à côté de la lettre qui correspond à l'atome

[>E] : et quand c'est en haut ça s'appelle comment ?

[>P] : ça s'appelle un exposant mais là en science on n'en aura pas besoin, tu le verras plus tard. Ce sera d'autres termes

[>E] : (inaudible)

[>P] : oui ça ça peut être en exposant mais ça c'est un tout autre exemple. D'accord

23 - 34:53 > 37:41 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : nom molécule, "molécule", formule molécule, "formule chimique", symbole indéterminé, nom indéterminé, "atome", nom atome, symbole atome, chiffre

[>P] : deuxième question qui demande un peu plus de réflexion. Compare la formule chimique au nom dioxyde de carbone de la molécule et propose une explication logique qui permet de relier simplement la formule au nom officiel. Donc ici vous avez le nom de la molécule. Ici vous avez la formule. Il faut réfléchir deux minutes. Se poser aussi bien sur la constitution du nom ou la constitution de la formule, on peut essayer de dégager quelque chose de logique de ça. Alors deuxième question, je réécris le nom de la molécule et en dessous je vais écrire la formule. À partir de là je vais écouter vos propositions. Donc ici on a dit CO2 (L'enseignant écrit au tableau). Yannick, donne-moi un élément de réponse. Je vais interroger plusieurs personnes.

[>E] : euh en me basant sur l'anglais, avec déjà le C pour le carbone et ensuite

[>P] : alors C pour carbone car c'est la première lettre du nom en effet c'est correct. (L'enseignant écrit la réponse au tableau) OK. C ça peut correspondre à carbone. Au niveau logique, je ne trouve pas d'autres logiques plus simples. Vous êtes tous d'accord. Voilà jusque-là c'est pas compliqué, on a pris le plus simple. Ensuite on complique un peu Maël

[>E] : le O pour euh le oxyde

[>P] : alors oxyde. Alors en réalité, est-ce que c'est l'atome d'oxyde. Ça existe ça ? Dans O2 c'était deux atomes d'oxyde ? C'était deux atomes de quoi ?

[>E] : d'oxygène

[>P] : d'oxygène. Donc là on va juste contracter le nom. On ne dit pas le dioxygène de carbone. Cela ne se dit pas, on remplace par dioxyde. Mais vous avez quand même la racine oxy de oxyde. Donc O pour oxyde, oxygène et ensuite il nous reste un troisième élément, Antoine ?

[>E] : le deux c'est euh le di

[>P] : di très bien. Donc di ça signifie ?

[>E] : le chiffre

[>P] : ça indique le chiffre 2. Si c'était trois on aurait mis quoi ? Vous savez ?

[>E] : tri

[>P] : tri. Très bien. D'accord. Donc là c'est pas le cas.

[>P] : donc on peut décomposer simplement, di pour deux, oxyde pour oxygène, carbone pour la lettre C. Oui Matthieu.

[>E] : c'est parce qu'il y aurait deux atomes de dioxyde et de carbone ou deux atomes de dioxyde ?

[>P] : alors justement on va y venir et on va prendre cet exemple-là, on note tout ce qu'il y a à savoir et après on fera un autre exemple.

[>P] : donc à votre avis, si je devais me poser la question, le CO2, le dioxyde de carbone. Si je devais faire un petit peu l'inventaire de quels atomes le composent et en quels nombres ? Alors comment je pourrais faire ? Alors Aymeric.

24 - 37:41 > 39:17 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [questions élèves]

Tag(s) : formule indéterminée, "atome", nom atome, "molécule", nom molécule, "indice", nom indéterminé, chiffre

[>E] : euh c'est pour vous dire pourquoi on dit pas 2OC ?

[>P] : 2OC

[>E] : ben oui parce que le di à la fin

[>P] : 2OC comme ça (écris au tableau). C'est ça

[>E] : oui

[>P] : tout simplement parce que par convention. Pour que les chimistes se comprennent entre eux, il fallait bien trouver des conventions, c'est-à-dire, des codes applicables à tout le monde. Donc on s'est dit le nombre d'atomes il sera toujours placé en indice en bas à droite de l'atome considéré. D'accord, donc déjà le 2 ici si tu le places devant, tu ne la respectes plus cette convention. D'accord. Donc après si par exemple on avait mis O2C, (L'enseignant écrit au tableau) là c'est correct parce que j'ai bien indiqué le bon nombre d'atomes de carbone. Alors quelle est la différence entre CO2 et O2C ? Alors on va dire que le carbone en général, ce que l'on va retenir à notre niveau, c'est que le carbone comme on l'utilise souvent on va le mettre en premier. Là aussi c'est des conventions, c'est des règles que les chimistes ont en généralité pour but de respecter. D'accord ? Donc évidemment si tu me mets la molécule de dioxyde de carbone et que tu me dis sa composition d'un point de vue parfaitement logique on ne peut pas te compter faux. D'accord, parce qu'il y a toujours les bons nombres d'atomes et les bons atomes mais par convention on mettra toujours le carbone avant. D'accord, mais en fait c'est une question d'habitude aussi. Tu verras jamais écrit dans n'importe quel ouvrage de chimie O2C. Ce sera toujours CO2. Le carbone est toujours placé devant. D'accord.

25 - 39:17 > 41:26 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", nom atome, formule indéterminée, "formule chimique", chiffre

[>P] : alors je repose ma question. Si on doit énumérer. Donc d'abord, quels sont les atomes présents ? On s'intéressera aux nombres après. Alors Clément

[>E] : le carbone et l'oxygène

[>P] : donc on a atome de carbone (note au tableau). Alors je ne note pas encore le chiffre et atome d'oxygène. (L'enseignant note au tableau) Alors on a atome de carbone et atome d'oxygène. Maintenant, combien on a d'atomes de carbone et combien on a d'oxygène ? À votre avis ? Matthieu ?

[>E] : je pense qu'il y a un atome de carbone et deux d'oxygène

[>P] : alors pourquoi tu dis un ?

[>E] : parce que sinon on aurait mis

[>P] : s'il n'y en avait pas, est-ce qu'on l'aurait mis déjà ?

[>E] : ben non

[>P] : ben s'il n'y en avait pas de carbone, il ne serait même pas là

[>E] : et s'il y en avait deux, on aurait peut-être dit dioxyde de dicarbone ?

[>P] : alors oui on aurait pu et surtout au niveau de la formule cela n'aurait pas été correct et puis déjà là on aurait eu quoi en plus

[>E] : un deux

[>P] : un deux. En fait c'est comme si on marquait C1O2. Il faut savoir que par convention le 1 ne s'écrit jamais. C'est-à-dire que si vous avez ici le C correspondant au carbone. Si vous n'avez rien à côté, cela veut forcément dire par défaut qu'il y a un seul atome de carbone. Le 1 ne s'écrit pas. C'est une convention. C'est comme cela. Donc on a 1 atome de carbone et on a donc combien d'atomes d'oxygène. Clément ?

[>E] : deux

[>P] : on en a deux. D'accord ?

26 - 41:26 > 41:56 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [questions élèves]

Tag(s) : nom indéterminé, "atome", nom atome, empirique

[>P] : oui ?

[>E] : alors on a plus d'oxygène parce que l'on en a besoin pour vivre ?

[>P] : alors on a plus d'oxygène, on en a besoin pour vivre. Alors c'est pas aussi simple que ça. Ce n'est pas parce qu'on a deux atomes d'oxygène qu'on en a besoin, c'est pas parce qu'on en a besoin pour vivre. Tu comprendras bien plus tard pourquoi il y a deux atomes d'oxygène. Mais ce n'est pas cette raison-là. Mais je suis d'accord avec toi on a besoin d'oxygène pour vivre, plus précisément de dioxygène déjà pour respirer.

27 - 41:56 > 45:56 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s) : "molécule", "représenter", "atome", nom atome, "symbole", "formule chimique", "indice", chiffre

[>P] : est-ce que cela va jusque-là oui ou non ? Surtout ne répondez pas tous en même temps.

[>E] : Oui, oui

[>P] : donc on va noter le bilan de tout ce que l'on a dit. Donc on va tout poser et si l'on a le temps on fera un second exemple sur une molécule que vous connaissez aussi. Et à partir de la semaine prochaine on compliquera un petit peu tout en restant compréhensible, rassurez-vous. Alors on va noter donc en rouge. D'accord. (Le professeur dicte aux élèves et note en même temps au tableau). Donc une molécule peut se représenter, une molécule peut se représenter par sa formule chimique. Alors qu'est-ce qu'elle nous indique cette formule ? Elle nous indique beaucoup de choses. Cette formule nous indique le nom de chaque atome présent, le nom de chaque atome présent. Donc comment elle nous indique ça. Tout simplement, vous avez chaque fois une lettre qui va correspondre à un atome particulier. On complétera un petit tableau d'accord avec les atomes qu'on utilisera au moins cette année et qui sont le plus souvent utilisés. Donc première chose. De plus le nombre d'atomes, de plus le nombre d'atomes de chaque type, donc c'est-à-dire atome de carbone, atome d'hydrogène, c'est un second type d'atomes, oxygène, etcetera, d'accord. Donc le nom, le nombre d'atomes de chaque type est indiqué en indice, donc c'est-à-dire, je le reprécise, en bas à droite du symbole de l'atome.

[>E] : ce que vous venez de mettre entre parenthèse, cela veut dire quoi ?

[>P] : en indice ? Je l'ai déjà mis

[>E] : d'accord

[>P] : et vous notez dernière chose qui est importante, vous retenez que le 1 cela ne s'écrit pas. Est-ce que je peux effacer le tableau du centre. Oui ? OK (efface tableau et écris) vous retenez, le chiffre 1, le chiffre 1 ne s'écrit pas. Donc je vous laisse noter cela et justement après on va s'entraîner sur une molécule que vous connaissez et si on a le temps on en fera une deuxième que vous connaissez également mais qui est un petit peu plus, on va dire conséquente. Donc deuxièmement la molécule d'eau et je vous attends ne vous inquiétez pas.

28 - 45:56 > 47:23 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : "atome", nom indéterminé, formule indéterminée, empirique, "atome", "transformation chimique", "molécule", composé chimique

[>P] : oui ?

[>E] : Euh est-ce que maintenant les scientifiques sont capables d'assembler eux-mêmes les atomes ? Par exemple trioxygène

[>P] : alors trioxygène O3 tu veux dire ? Ça ça existe mais ça ça existe dans la nature déjà. C'est ce que l'on appelle l'ozone. D'accord ? Alors est-ce que les scientifiques sont capables d'associer des atomes, alors en fait c'est ce que l'on appelle des réactions chimiques, des transformations chimiques. D'accord

? Donc est-ce que les hommes sont capables de faire des transformations chimiques ? Ben oui, d'accord. Après est-ce qu'ils sont capables de former, de créer de nouvelles molécules qui n'existent pas dans la nature ? Alors oui c'est ce qu'on appelle des produits de synthèse, des matières synthétiques, c'est des matières qui n'existaient pas dans la nature et l'on a réussi à les créer. On a un but en général. Soit elles sont plus résistantes, d'accord, soit c'est une couleur qui n'existait pas. Enfin, c'est un détail. OK. En général si l'homme crée une nouvelle chose, c'est qu'il y a un intérêt. Oui ?

[>E] : et si c'est justement en en faisant certaines combinaisons telles qu'on a fait qu'on a fait les bombes atomiques, c'était à part ?

[>P] : alors non (est amusée par la question), c'était à part Gaëlle. D'accord.

29 - 47:23 > 49:37 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", nom molécule, formule molécule, symbole atome, nom atome, "formule chimique", chiffre

[>P] : alors est-ce que c'est écrit ou pas ? Oui ? Alors la molécule d'eau, je n'ai pas mis la formule chimique volontairement parce que je pense que vous la connaissez. Emilie ?

[>E] : H2O

[>P] : H2O. Alors le deux je le place comment déjà ? Rémy

[>E] : en bas à droite

[>P] : très bien. Alors si on devait décomposer ? Alors là je travaille sur les plus simples. H, O maintenant vous savez ce que c'est. Je vous donnerai un petit tableau je pense la semaine prochaine mais ça, vous le savez. Cela sera juste un rappel. Alors Fanny. Quels sont les deux types d'atomes présents ? Leur nom déjà, dans cette molécule d'eau

[>E] : euh oxygène

[>P] : alors premier atome on a l'atome d'oxygène. Je ne dis pas encore son nombre hein, en quel nombre. Atome d'oxygène. OK. Ensuite, tu ne sais pas. Noémie

[>E] : hydrogène

[>P] : Hydrogène, très bien. H c'est pour hydrogène. OK. Alors maintenant deuxième temps, en quel nombre sont présents chacun des atomes ? Alors Jessica, à ton avis combien il y a d'atomes d'oxygène et d'hydrogène. Si on compare, si on fait le même raisonnement qu'on vient de faire avec le CO2. Combien on aurait d'atomes ? Allez, on va commencer par l'oxygène. Est-ce que l'on aura un chiffre à côté de l'oxygène en bas à droite, en bas à droite de O ? Pour oxygène est-ce que l'on a un chiffre, en bas à droite, c'est-à-dire ici (L'enseignant montre au tableau).

[>E] : non

[>P] : s'il n'y a pas de chiffre, cela veut dire que ça correspond à ? Aymeric

[>E] : à 1

[>P] : à 1 atome d'oxygène. Donc tu vas me faire le deuxième pour voir si c'est compris. Maintenant pour l'hydrogène, toujours Jessica. Combien on a d'hydrogène ? On regarde toujours le chiffre qui est en bas à droite de la lettre.

[>E] : 2

[>P] : 2 et on met donc un s. ça va ou pas ? Oui ? Alors la molécule d'eau, elle est simple.

30 - 49:37 > 50:35 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "molécule", empirique, nom indéterminé, nom molécule

[>P] : alors maintenant, on va parler d'une molécule que vous utilisez quand on a mal à la tête. Quand on a mal à la tête on utilise quoi des fois ?

[>E] : le doliprane

[>P] : (L'enseignant rigole un peu pour signaler que ce n'est pas tout à fait cela) alors il y a quoi dans le doliprane. On parle de doliprane, là c'est la marque en fait du produit.

[>E] : (inaudible)

[>P] : alors plus simple. Cela commence par un a

[>E] : atome

[>P] : L'aspirine, l'aspirine, d'accord. Donc deuxième exemple, la molécule d'aspirine.

31 - 50:35 > 52:17 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur-Élèves]

Tag(s) : "atome", nom atome, symbole atome, chiffre, "molécule", formule molécule

[>P] : Alors justement, elle va peut-être vous donner mal à la tête en la voyant. (L'enseignant écrit au tableau) Alors molécule d'aspirine donc C9H8O4.

[>E] : (les élèves s'agitent en voyant la formule)

[>P] : J'avais dit qu'elle allait vous donner mal à la tête. J'en étais sûre. Alors on recommence. Même s'il y a des chiffres un peu plus gros, on ne panique pas, c'est le même principe. Alors quels sont les atomes présents, Fanny ?

[>E] : euh du carbone

[>P] : alors je ne dis toujours pas leur nombre. J'écoute juste. Alors atome de carbone. Eliot ? Ensuite. Ben C c'est pour carbone, H c'est pour combien ? On vient de le faire juste en haut. H c'est pour, regarde pas ton voisin, ce n’est pas écrit sur son front. Ben regarde ici ce que l'on vient de faire. H c'est pour hydrogène. Donc on a des atomes d'hydrogène. Le dernier Théo ?

[>E] : euh oxygène

[>P] : très bien alors maintenant en quelles proportions sont présents chacun des atomes ? Alors Antoine. Alors combien il y a d'atomes. On va commencer par carbone. Combien on en a ?

[>E] : 9

[>P] : alors 9. Ensuite Kylian, combien on a d'atomes d'hydrogène ?

[>E] : 8

[>P] : 8. Combien on a donc d'atomes d'oxygène, Fabio ?

[>E] : 4

32 - 52:17 > 52:40 [Modèle micro] [questions élèves]

Tag(s) : "molécule", dimension

[>E] : pourquoi Madame il y en a autant ?

[>P] : C'est comme ça, c'est une molécule qui est assez grande, d'accord. Et encore celle-ci c'est loin d'être la plus grosse.

[>E] : il peut y en avoir plus ?

[>P] : mais évidemment. Mais cela change des molécules qui sont simples, enfin qui sont simples, qui ne sont pas très très grandes d'accord. Que vous connaissez jusqu'à présent. Oui.

33 - 52:40 > 53:15 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [questions élèves]

Tag(s) : "solide", "molécule", "gaz", nom indéterminé

[>E] : l'autre fois, on a vu qu'il y a deux, qu'il y a deux en mouvement. Là il est solide ?

[>P] : alors les molécules étaient en mouvement

[>E] : ah oui, les molécules. Là la molécule elle est à l'état solide, est-ce que ça peut être un état gazeux?

[>P] : euh, je n’ai pas compris

[>E] : est-ce que ça peut être un état gazeux ?

[>P] : les molécules peuvent être à ?

[>E] : l'aspirine

[>P] : l'aspirine ? Alors l'aspirine euh (réfléchie) non. Non non ça peut dégager un gaz mais non.

34 - 53:15 > 54:11 [Langage symbolique explicite] [Symbolique (formule)] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [questions élèves]

Tag(s) : "atome", "molécule", nom molécule, nom atome, "transformation chimique", chiffre

[>P] : Oui ?

[>E] : en fait, c'est le même atome mais ils mettent 9 fois ?

[>P] : en fait pour faire une molécule d'aspirine, on va aller chercher 9 atomes de carbone, 8 atomes d'hydrogène, 4 atomes d'oxygène. On va essayer de combiner le tout. Alors comment ça se combine.

Ça, c'est pas simple à comprendre quand on est élève de quatrième. On explique cela bien plus tard. Les atomes peuvent se combiner d'une certaine façon entre eux. D'accord. Et pour former, pour former une association on va dire cohérente, ayant une bonne cohésion, d'accord. Chaque atome est bien placé et a envie, entre guillemet, de rester là où il est. OK. Sauf si on le met évidemment avec un produit chimique et qui le fait réagir et c'est ce que l'on appelle une transformation chimique. Mais chaque atome va s'associer avec un atome particulier pour former ici la molécule d'aspirine. D'accord?

35 - 54:11 > 54:41 [Langage symbolique non défini] [Symbolique (nom)] [Symbolique (formule)] [Professeur seul]

Tag(s) : nom indéterminé, formule indéterminée, "nom"

[>P] : alors si je vous avais dit aspirine par rapport à dioxyde de carbone, dioxyde de carbone CO2, on peut le décomposer. Aspirine, est-ce qu'on pouvait décomposer ?

[>E] : non

[>P] : alors déjà l'aspirine, c'est le nom courant. Le nom précis, c’est-à-dire le nom officiel en chimie c'est pas l'aspirine (ça sonne) alors deux minutes. C'est un nom assez compliqué mais même ce nom-là ne permettrait pas d'expliquer aussi simplement qu'on l’a fait pour le dioxyde de carbone. Donc la semaine prochaine, on reprendra dessus.

36 - 54:41 > 55:27 [Modèles moléculaires] [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Symbolique (formule)] [questions élèves]

Tag(s) : modèle moléculaire, couleur, "molécule", "atome", nom atome, "modèle", "gaz", "solide", chiffre, nom espèce chimique, nom molécule

(Les élèves sortent)

[>P] : c'est compliqué, tu peux venir me le demander si tu souhaites.

[>E] : l'année dernière on voyait deux boules rouges qui représentaient une molécule ?

[>P] : et ben les deux boules rouges c'était un atome d'oxygène avec un autre. Mais les couleurs, on les voit la semaine prochaine. On va les modéliser.

[>E] : ça veut dire que là par exemple, il y a trois atomes différents dans la molécule d'aspirine ?

[>P] : oui

[>E] : il y aurait eu trois

[>P] : il y aurait eu trois, trois boules différentes

[>E] : d'accord

[>P] : mais là il n'y en a pas trois différentes, il y en aurait 9, 17, 21, 21 petites boules mais c'est pas sous forme gaz là d'accord, c'est un solide. C’est l'acide acétylsalicylique. C'est compliqué.

37 - 55:27 > 55:50 [Transition]

Annexe 11 : Documents données aux élèves (Séance 2 Aude)

C2	Un peu d'Histoire des Sciences ....

Compétences travaillées : **O1/ E1/ D5**

Avogadro (1776-1856) était un scientifique italien très peu connu qui ne connaissait aucun des grands savants de l'époque.
Ses ouvrages ne furent pas tout de suite pris au sérieux et pourtant, il avait mis en avant de nouvelles notions très importantes.
Ses travaux étaient purement théoriques, il ne faisait pas d'expériences lui-même et utilisait les résultats publiés par d'autres comme ceux de Dalton ou de Gay-Lussac (scientifiques britannique et français de l'époque).

En 1811, il fait l'hypothèse suivante :

« les molécules constituantes d'un gaz quelconque ne sont pas formées d'une seule molécule élémentaire, mais résultent d'un certain nombre de ces molécules réunies en une seule ».

A l'époque, les termes de molécules et atomes n'étaient pas encore parfaitement maîtrisés : il faut donc comprendre dans cet extrait que le terme « molécule constituante » correspondait simplement au terme « molécules » que l'on connaît aujourd'hui et le terme « molécule élémentaire » faisait référence à l'atome.

L'extrait ci-dessus, une fois corrigé, donne lieu à cette définition qui est celle actuelle:

« les molécules d'un gaz quelconque ne sont pas formées d'un seul atome , mais résultent d'un certain nombre d'atomes réunis en une seule molécule ».

Grâce à ses travaux de recherche, Avogadro avait réussi à expliquer quelle était la différence entre l'atome d'oxygène (O) et la molécule de dioxygène (O_2).
Il faudra néanmoins attendre une cinquantaine d'années avant que l'idée exposée par Avogadro soit admise par une majorité de scientifiques.

1) Quelle était la nationalité d'Avogadro ?

.....

2) A-t-il prouvé ses idées par des expériences ?

.....

3) Pour Avogadro, de quoi se compose une molécule ?

.....

4) Tu as vu dans le premier chapitre que l'air était composé de dioxygène et de diazote : en t'aidant du texte ci-dessus, explique ce qui différencie l'oxygène du dioxygène.

.....
.....
.....

C2	Une molécule responsable de l'effet de serre

Compétences travaillées : **D2**

D'ici un peu moins d'un mois maintenant, Paris va accueillir la conférence sur le climat (COP21).
Cette conférence va réunir 195 pays et aura lieu du 30 Novembre au 11 Décembre 2015 au parc des Expositions de Paris Le Bourget.
Cette conférence aura pour objectif d'aboutir à un accord international afin de limiter le réchauffement climatique.
Les différents représentants (scientifiques, politiques) discuteront donc évidemment des émissions de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone, le méthane ...

Nous allons nous intéresser à la molécule de dioxyde de carbone que tu as déjà étudiée en SVT et en chimie l'an passé...

Sur Terre, la molécule de dioxyde de carbone est présente sous forme de gaz qui contribue au réchauffement climatique : son nom sera donc souvent cité lors de la conférence.

Voici une liste de traductions du nom de cette molécule en différentes langues :

Français :Dioxyde de carbone
Anglais : carbon dioxide
Chinois : 二氧化碳
Espagnol : dióxido de carbono
Allemand : *Kohlendioxid*

Heureusement, une molécule ne se reconnait pas seulement par son nom, elle se représente également par sa formule chimique.

1) Connais-tu la formule chimique du dioxyde de carbone ? Si oui, note la formule.

.....

2) Compare la formule chimique au nom « dioxyde de carbone » de la molécule et propose une explication logique permettant de relier simplement la formule au nom officiel.

Aide : Le nom « dioxyde de carbone » peut être découpé en trois parties bien distinctes.

Annexe 12 : Entretien 1 avec Mathieu

[>P] : l'année prochaine au brevet, si nous avons 60%, ce sera bien.

[>I] : en niveau de classe, ils vont donner quoi, pour situer un peu le niveau des élèves.

[>P] : par rapport à l'orientation après la troisième. Là dans cette classe, il y en aura beaucoup qui seront plus seconde pro CAP et seconde générale. Donc il y en certain qui partiront en seconde GT mais en pourcentage je dirai 30% de seconde GT et le reste en seconde pro CAP. Si on arrive à leur trouver des places en seconde pro.

[…]

[>I] : quel type d'exercices tu vas demander par la suite ?

[>P] : là c'est des exercices simples du livre. Un exercice c'est sur l'ozone. Il pose la question tout simplement. Ils indiquent que c'est la molécule triatomique d'ox euh constitué d'atomes d'oxygène, de trouver la formule. Mais je donne très rarement des exercices car je n'ai que 10% de la classe qui les cherchent. Donc je préfère faire les exercices en cours que le demander.

[….]

[>I] : qu'est-ce que tu veux que les élèves sachent faire et y compris sur la formule brute en fin de quatrième ?

[>P] : donc c'est ce que je t'avais noté, donc c'est surtout d'essayer de voir principalement séparer entre atome et molécule. Quand c'est séparé atome, quand c'est regroupé, c'est molécule et après de faire de noter la formule de la molécule chimique.

[>I] : et alors pour prolonger ce que tu as mis dans la fiche, quelles difficultés dans ce que font les élèves autour de la formule brute, dans ce qu'ils peuvent comprendre ou ne pas comprendre

[>P] : ce que je vois, c’est pourquoi j'ai insisté avec CuO, la lettre minuscule ou majuscule, même si c'est hors cadre, cela me permet ainsi de faire la transition pour bien insister minuscule majuscule. Après ce sera plus le fait qu'on va leur demander après deux séances s'ils revoient pas leur cours et si je leur redemande la formule du dioxygène, ils vont mettre des majuscules. Voilà c'est en général ce qui arrive. C'est les erreurs. Soit ils ne mettent pas en minuscule ou ils prennent directement l'eau en majuscule. C'est ça qui arrive quand on fait une interro sur des rappels par exemple l'année prochaine quand je demande pour certains la formule de l'eau ils vont mettre E majuscule. Monoxyde de carbone ils vont mettre MC par exemple.

[…]

[>I] : par rapport aux questionnaires élèves où on a repéré quelques erreurs qui se prolongent jusqu'en terminale. Nous avons pu constater une énorme confusion entre corps pur et corps simple. Est-ce que c'est quelque chose que tu fais travailler à un moment ?

[>P] : Je vais y revenir. C'est quelque chose que je fais travailler à partir des exemples, ben déjà en reparlant de l'air puisque cela fait partie du programme de quatrième en parlant de l'air qui est un mélange après prendre l'exemple pour un corps pur. Après est-ce que tu fais une différence entre corps pur simple et corps pur composé, entre O2, dioxygène et H2O, de l'eau pur, est-ce que toi tu dis

que c'est un corps pur composé pour l'eau pur ou un corps pur simple quand c'est une bouteille qui contient que du dioxygène ? Est-ce que tu fais une différence entre corps pur simple et corps pur composé ou est-ce que tu t'arrêtes à corps pur ?

[>I] : oui il y a un moment où il va falloir faire la différence. Parce que les erreurs que nous remarquons nous les retrouvons aussi dans les élèves de terminale sur cette confusion corps pur et corps simple.

[>P] : D'accord je vais en parler soit à la séance prochaine soit dans deux séances. On en parle aussi un peu en quatrième une première fois lors du modèle de la matière. On commence à utiliser les modèles moléculaires. On parle déjà corps pur mélange et en cinquième aussi. J'essaie d'en parler à chaque niveau.

[>I] : tu as refait le modèle de la matière ?

[>P] : je l'ai fait un petit peu, oui. Mais c'est un chapitre que je fais très rapidement car après quand je passe plus de temps dans le chapitre que je suis en train de faire c'est plus rapide. Le fait que l'on peut représenter la matière avec un modèle. On fait un petit point rapide sur la conservation de la masse et les trois états de la matière : solide, liquide gazeux. Voilà, c'est assez rapide comme chapitre.

[>I] : parce qu'il y a eu une confusion quand tu étais sur l'eau et que tu as demandé la composition de l'eau et eux ils étaient dans ce que l'on pouvait trouver dans l'eau

[>P] : oui avec le calcium ils étaient partis sur le mélange

[>I] : mais tu ne passes pas un temps important ?

[>P] : là je vais essayer d'en passer un petit peu plus. Après une fois que les modèles sont mis en place avec la molécule d'eau et la molécule de dioxygène on fera quelques exemples dans un récipient. Tiens si on met quatre molécules de diazote et une molécule de dioxygène, est-ce que pour eux c'est un corps pur ou un mélange. Voilà des choses comme ça.

[…]

[>I] : et là la symbolique, tu dis bien que c'est pour les atomes et pour les molécules, quand tu vas passer sur la transformation chimique, tu vas de nouveau utiliser la symbolique.

[>P] : oui

[>I] : Je suppose que tu vas faire des exercices sur la conservation de la masse

[>P] : oui

[>I] : donc ces symboles vont être associés à l'espèce chimique au niveau macroscopique

[>P] : oui

[>I] : est-ce que ce passage-là tu travailles

[>P] : du micro

[>I] : oui là tu utilises vraiment les symboles pour du micro

[>P] : non

[>I] : et est-ce qu'il y a un moment une étape où on peut leur montrer que cela

[>P] : non j'en parle pas. C'est vrai que je ne parle pas que l'on est en train de travailler au micro et ensuite au niveau macroscopique. Non ça je n'en parle pas. C'est quelque chose dont je ne parle pas.

[…]

[>I] : dans la suite des erreurs repérées dans le questionnaire la confusion entre CH4 et C2H8.

[>P] : ah oui le fait que. Pour eux ils pensent que c'est deux molécules de méthane. Celle - là, CH4, c'est vrai qu'il la modélise avec le TP que je vais faire et c'est vrai que C2H8 je ne la fais pas modéliser. Après est-ce que ce serait bien de changer, de la mettre en place pour bien leur montrer la différence. Après il y a certaines molécules qui font bien dans le modèle moléculaire et après j'essaie de leur faire pour faire une séance variée, je vais sur un site ostrlo.net avec les molécules en 3D, avec les lunettes cela rend bien donc ça permet de faire quelques molécules d'hydrocarbures donc là je fais la famille du méthane jusqu'au butane et donc là j'en reparle mais c'est vrai que c'est la seule fois où je leur montre visuellement ce que c'est que la molécule d'éthane et après de propane. Mais c'est vrai qu'eux en modèle moléculaire ils ne la construisent pas l'éthane.

[>I] : alors est-ce qu'un moment tu travailles le fait que le nombre d'atomes, on n'est pas dans quelque chose de proportionnel mais que l'on a bien un nombre fixe et déterminé. L'une des visions que l'on peut trouver dans l'histoire des sciences est que les nombres représentaient des proportions. Est-ce que ça à un moment tu le travailles avec les élèves ?

[>P] : Non. Je ne le travaille pas ça.

[>I] : est-ce que tu le fais en troisième ?

[>P] : non c'est quelque chose dont je ne parle pas. Ça n'est pas dans les programmes. Oui mais après c'est vrai que même de moi-même c'est quelque chose que je n'avais pas en tête. Cela pourra après être modifié mais je n'en parle pas, le fait que cela doit être bien fixé. Je n'en parle pas du tout et que c'est pas du tout proportionnel. Non ça je n'en parle pas.

[…]

[>I] : on avait des questions portant sur les réactions chimiques. Seulement 10% des élèves sont capables d'indiquer dans les équations que O et O2 sont différents.

[>P] : 10% seulement

[>I] : pratiquement aucun élève n'est capable de justifier correctement que l'équation avec O ou l'équation avec H4O2 ne sont pas correctes.

[>P] : ça c'est quelque chose sur lequel j'insiste bien quand on commence à ajuster des équations de réaction, c'est que lorsque justement on fait avec les nombres impairs. Lorsque l'on doit équilibrer des réactions, je leur dis qu'en intermédiaire, on peut mettre un chiffre à virgule, 1,5 ; 3,5 et après on multiplie tout par 2. Mais après je leur fais bien préciser que ce que l'on multiplie par deux c'est bien le nombre de molécule et pas l'entité pour dire d'avoir 2 H2O on passe à H4O2. Donc ça par contre j'insiste bien que l'on ne multiplie que les coefficients devant chaque molécule et non pas les coefficients de la formule chimique. Donc ça oui j'en parle bien. Mais après est-ce que cela passe ?

[>I] : oui mais ce qui semble poser problème c'est pas la façon d'ajuster. C'est vraiment le fait que pour eux H2O et H4O2 il n'y a pas de différence, tout au moins on peut le penser.

[>P] : après c'est vrai que la seule façon de leur montrer, c'est en leur donnant les modèles moléculaires. De voir qu'ils ne peuvent pas la construire. Peut-être des méthodes pour leur indiquer

que ce n'est pas possible. Moi par exemple l'exemple avec de pas indiquer un nombre décimal dans l'équation de réaction, je leur parle tout simplement un troupeau de mouton qu'on peut pas avoir 10,5 moutons. C'est pour ça qu'après j'insiste pour passer aux nombres entiers. Mais on peut aussi voir sous forme de fraction. On peut leur laisser les fractions. Mais moi je ne suis pas partisan de laisser la fraction, je mets toujours des nombres entiers.

[…]

[>I] : alors toujours dans le questionnaire, entre H2O, OH2 et HOH l'ensemble des réponses correctes est inférieure à 20% en lycée.

[>P] : d'accord

[>I] : et surtout la troisième qui pose problème mais malgré tout les deux premières, cela donne moins de 50% de réponses correctes.

[>P] : après pour l'explication, là c'est encore moi qui pose une question. Est-ce que pour l'explication ce que j'ai indiqué c'était correct ou ?

[>I] : moi ça ne m’a pas gêné. Tu as dit une convention mais aussi le plus important et certains élèves ont retenu le plus important. Ils ont demandé si le chlore est plus important que le calcium.

[>P] : oui c'est mais c'est vrai que là ce n’était pas évident donc c'est vrai qu'il faudrait que je me mette bien sur l'histoire de convention. Que c'est un choix tout simplement.

[>I] : là où cela peut poser des problèmes c'est en chimie organique quand on utilise des formules plus ou moins développées. Sur l'alcool par exemple cela peut poser problème. Donc pour les élèves cela ne semble pas si évident que toutes les notations cela représente la même molécule. Dans toi dans ce que tu fais travailler au collège, est-ce que cela t'arrive de développer un peu la formule ou est-ce que tu restes toujours dans la règle de la formule brute

[>P] : je reste dans la règle. Après j'en parle plus à l'oral, très rarement le fait que dans un alcool c'est le groupement OH mais après je ne vais pas la sortir pour montrer que c'est dû à ça. Donc je reste dans la règle à regrouper. C'est vrai qu'au collège après c'est rare de l'alcool. Après ce serait plus quand on commence à faire le nylon dans les synthèses chimiques, on pourrait sortir le groupe amine ou quelque chose comme ça mais c'est vrai que comme je fais la chimie en fin d'année avec le brevet cela se finit ainsi cela me permet de bien alterner cours TP. Ils ont envie d'arrêter assez rapidement donc cela me permet de les maintenir ainsi avec la fin de la chimie. Donc c'est vrai qu'au point de vue de programme il y a peut-être des fois le dernier chapitre que je n'ai pas le temps de faire avec ces synthèses. Donc c'est vrai que je n'en parle pas tout le temps.

[>I] : mais avec HOH par exemple

[>P] : non ça je ne le fais jamais

[>I] : mais si un élève te propose HOH, est-ce que tu considères que c'est faux ? Dans un contrôle, ils mettent HOH, qu'est-ce que tu fais ?

[>P] : je mettrais faux parce que soit j'accepterais OH2 au lieu de H2O parce que ça au départ l'ordre. Mais comme j'ai insisté avec le fait de mettre cet indice en bas, avec cette idée de regrouper les atomes dans la composition, ça je pense que je ne mettrais pas les points.

[>I] : et pourtant c'est l’écriture traduction du modèle moléculaire.

[>P] : c'est vrai. Après quand tu regardes, c'est vrai. Je vais me remettre en question. Non mais c'est vrai ce que tu dis !

[>I] : mais d'un autre côté cela va à l'encontre de la règle que tu leur donnes.

[>P] : Voilà

[>I] : donc c'est un dilemme

[>P] : voilà. Donc je resterais sur l'indice. Parce qu'après si tu les mets comme cela ils sont alignés. Donc après ils vont me les aligner.

[>I] : mais dans une formule, tu n'as pas à respecter la géométrie. Ce n'est pas une structure de Lewis.

[>P] : je resterais sur mon indice.

[…]

[>I] : alors est-ce que tu vois d'autres pistes. Est-ce que cela te donne des idées ?

[>P] : en discutant, rien que sur ça ou CH4 et C2H8, ça c'est vrai que maintenant je pourrais insister un peu plus de dessus. C'est vrai que c'est des choses où je n'insiste pas et je pourrais insister plus dessus. Maintenant pour trouver des choses, des solutions pour améliorer, comme cela brut pour point, je n'ai pas de solution à te donner mais il faut y réfléchir.

[…]

[>I] : finalement qu'est-ce que tu leur proposes pour justifier que O c'est pas O2. Parce qu'à un moment tu vas faire aussi le carbone, je suppose

[>P] : oui, le carbone par rapport à

[>I] : le graphite

[>P] : qui est constitué nécessairement que d'atomes de carbone. Après on est soit toujours au niveau microscopique

[>I] : mais le C est-ce que cela va être l'atome de carbone, le graphite ?

[>P] : ah oui d'accord. Je vois ce que tu veux dire. Au départ, je pars sur l'atome de carbone. Un seul atome de carbone pour le microscopique qui réagit avec la molécule de dioxygène pour donner le CO2. C'est ce que tu veux parler

[>I] : oui mais après comment tu veux justifier que finalement tu n'as pas aussi un atome d'oxygène. Pourquoi l'atome d'oxygène est forcément associé à un autre atome ?

[>P] : ah oui d'accord ! J'avoue que

[>I] : Tu as dit à un moment, j'ai noté, la molécule c'est nécessairement plusieurs atomes. Tu as les atomes seuls et quand ils se regroupent cela donne la molécule. Ce qui fait que tu ne peux pas avoir de molécules avec un seul atome en symbolique.

[>P] : oui après forcément

[>I] : alors le graphite, ce n'est pas nécessairement une molécule mais c'est plus compliqué

[>P] : oui alors c'est une question que j'allais poser. Dans le graphite qui est constitué de plusieurs atomes de carbone

[>I] : ils sont liés

[>P] : qui sont liés

[>I] : c'est le problème de la symbolisation qui ne respecte pas le. On devrait mettre C infini en fait.

[>P] : et donc le graphite qui est constitué que d'atomes de carbone, on le met en tant que molécule ? C'est là encore une fois c'est

[>I] : ah ben ce n’est pas facile

[>P] : voilà comme corps pur mélange là par contre tu le mets en corps pur ?

[>I] : oui

[>P] : comme dans ton questionnaire, le charbon ? Est-ce que là tu considères que c'est que des atomes de carbone ou est-ce qu'il y a des impuretés ?

[>I] : charbon il y a des impuretés

[>P] : oui on est d'accord. Mais quand j'explique carbone plus dioxygène donne dioxyde de carbone, je fais avec un seul atome et je ne justifie pas après avec plusieurs atomes comment cela se passe. je reste simple. Et là honnêtement je ne cherche pas la difficulté et après j'ai jamais la question. Là comme ça l'explication ou comment je ferais, je ne sais pas.

[>I] : et par quelle réaction tu commences ?

[>P] : je fais celle-là justement.

[>I] : en premier

[>P] : ou car comme elle est déjà ajustée, j'utilise celle-là. (Question de l'enseignant sur le mot équilibre ou ajuster)

[…]

[>I] : quand tu as donné la définition de la molécule, j'ai trouvé cela intéressant parce que tu as utilisé le mot sorte

[>P] : c'est parce que je n'arrivais plus à retrouver le mot nature.

[>I] : et alors par moment, tu as employé le mot liaison ou lié. Alors est-ce que c'est la première fois que tu en parles ?

[>P] : oui

[>I] : et j'ai remarqué qu'aucun d'entre eux n'a posé de question, qu'est-ce que vous voulez dire Monsieur. Alors tu as dit aussi "relier", "lier" ou "liaison" et s'il te pose la question qu'est-ce que tu vas dire ?

[>P] : et s'il pose est-ce qu'il y a vraiment une tige entre les deux atomes.

[>I] : que veut dire ce terme lié pour toi à ce moment-là ? S'il y en a un qui dit mais monsieur ça veut dire quoi lier ?

[>P] : en quatrième j'aurais dû mal à répondre. En troisième on a commencé à faire la structure de l'atome avec les électrons, etcetera euh ce serait plus facile à expliquer en troisième avec euh mise en

commun de commencer à parler un petit peu de Lewis. Donc là je parlerais plus en troisième. Donc je ferai la position de l'autruche en quatrième et je dirais je vous en parlerai en troisième

[>I] : et donc là les mots "liés" et "liaisons" tu les as dits non intentionnellement finalement ?

[>P] : oui

[>I] : oui parce que je trouvais que quand tu disais "grouper" ou "regrouper"

[>P] : ça suffisait

[>I] : ben oui.

[>P] : non mais c'est des fois du vocabulaire au lieu de commencer à leur donner plein de mots de vocabulaire, essayer de rester

[>I] : oui

[>P] : donc plutôt rester sur "grouper"

[>I] : oui, je crois

[>P] : d'accord

[>I] : et donc pour rebondir, le trait de liaison, il apparaît en 1860 à peu près, Lewis on en est loin. Donc on peut là aussi travailler sur ce trait de liaison sans aller nécessairement sur l'interprétation sur les électrons ni sur Lewis

[>P] : et l'explication à cette époque-là ?

[>I] : l'explication, c'est qu’ils s'aperçoivent, notamment en chimie organique, qu'il y a des espèces chimiques différentes mais avec une même formule brute. Donc l'interprétation est que ce qui caractérise une molécule, il y a les atomes bien sûr, le nombre d'atomes, et puis aussi la position des atomes les uns par rapport aux autres. Ils vont alors symboliser cette position par le trait Mais cela n'a rien à voir avec la mise en commun d'électrons. Il n'y a même pas encore d'électrons. Mais c'est vrai que le trait, on n'est pas censé le présenter au collège. Normalement, on ne devrait pas faire les modèles éclatés.

[…]

[>I] : est-ce qu'il y a des élèves les autres années qui te demandent ce que c'est que la tige ?

[>P] : non

[>I] : non, ah ils ne sont pas curieux. Et s'il y en avait un qui te le demandait, qu'est-ce que tu dirais ?

[>P] : (il réfléchit) là c'est sûr que c'est délicat. Ben toujours par rapport à cette idée de liaison en fait ?

[>I] : Faut-il dire liaison en quatrième ? Est-ce que tu ne peux pas dire simplement que cela sert à maintenir les billes entre elles ?

[>P] : oui, c'est vrai. Oui il faut bien qu'il y ait une cohésion.

[>I] : mais même si on ne fait pas le modèle éclaté, avec le modèle compact, la position des atomes, elle est quand même déterminée. Tu ne fais pas OHH

[>P] : on est d'accord

[>I] : et tu n’écris pas COO. C'est OCO

[>P] : On est d'accord.

[>I] : au départ, les tiges, ce sont bien des liens matériels pour aider à construire la représentation. Mais cela ne correspond pas absolument pas à la symbolisation de quoi que ce soit. Il n'y a rien derrière

[>P] : c'est une aide

[>I] : voilà. Historiquement, c'est la position des atomes qui est importante. Mais c'est avant de connaître la constitution de l'atome.

[>P] : D'accord. Donc je vais rectifier et essayer d'utiliser plus le terme grouper que lier. Et tout simplement permet plus d'expliquer la cohésion et de maintenir les atomes dans la molécule.

[>I] : Parce que H2O2, tu le fais le modèle moléculaire de H2O2 ?

[>P] : ben comme je le fais en exemple, je leur fais justement montrer la différence entre l'eau et l'eau oxygénée.

[>I] : donc ils vont avoir les deux atomes d'oxygène l'un à côté de l'autre. Est-ce que tu fais travailler ces différences ?

[>P] : moi mon premier travail, c'est qu'ils arrivent à jongler entre composition et formule chimique. Ça c'est mon premier travail. Et nom

[>I] : alors oui j'ai vu que tu travaillais effectivement à partir de la nomenclature

[>P] : le schéma, c'est pour eux que ce soit un peu plus ludique. À la rigueur, je pourrais ne travailler que sur ces trois colonnes-là. Certes c'est le modèle éclaté, même si c'est mieux le modèle compact mais c'est plus pour que ce soit plus ludique pour eux. Pour changer des séances de cours classiques.

[>I] : parce que c'est compliqué aussi la nomenclature. Tu as des noms qui sont aussi spécifiques et tu les as amenés à aller sur la formule. Mais si tu donnes méthane

[>P] : voilà c'est pour cela que la formule est donnée

[>I] : mais méthane, on ne va pas être au même niveau que l'eau

[>P] : oui

[>I] : l'eau est un nom courant

[>P] : oui mais l'eau, ils savent que c'est H2O. C'est comme le dioxyde de carbone. C'est ancré.

Annexe 13 : Entretien 2 avec Aude

[>I] : qu'est-ce que tu penses qu'un élève doit avoir compris dans la formule brute ?

[>P] : dans la formule brute pour moi l'élève doit avoir compris deux choses : les lettres qui symbolisent un atome particulier et ensuite surtout les chiffres placés en indice qui correspondent au nombre d'atomes présents dans la molécule.

[>I] : et donc qu'est-ce que tu fais comme type d'exercices. On a vu des exemples mais qu'est-ce que tu proposes d'autres ?

[>P] : alors en fait ce que je vais faire à la prochaine séance, je vais faire un petit tableau pour dire vraiment que le carbone c'est C, hydrogène H, etcetera. Je vais faire carbone, hydrogène, oxygène, chlore, azote et ensuite je partirai sur la modélisation. Donc c'est-à-dire avec les modèles moléculaires. Je pense que les élèves comprennent mieux en comptant. Alors une fois qu'ils ont les couleurs associées, ça c'est le prochain cours. Je pense qu'ils vont mieux comprendre en comptant par rapport à une formule chimique en essayant d'associer. Pour moi c'est euh. Après je fais des exercices d'application qui sont dans le livre comme j'ai pu faire ici en fait dans un contexte particulier. Des fois je prends dans le livre, des fois je fais moi-même. Mais en général, je prends toujours quelque chose qui a un rapport avec l'actualité. Je vais pas aller leur sortir une énorme molécule avec un nom incompréhensible. Je prends toujours quelque chose avec la vie quotidienne. Là j'ai pris l'aspirine. Après voilà cela leur donne quelque chose et ils sont conscients que quand ils prendront de l'aspirine la prochaine fois c'est des molécules, c'est constitué d'atomes. Voilà. C'est pour toujours leur mettre quelque chose en rapport avec la vie quotidienne. Je fais essentiellement mes cours toujours avec un rapport à leur vie en fait.

[…]

[>I] : Alors si je te propose c'est deux molécules. Je te les écris, c'est plus facile (Les deux formules écrites sont : CH_4 et C_3H_{12}). Qu'est-ce que les élèves peuvent, à ton avis, penser de ces deux molécules ?

[>P] : elles sont constituées des mêmes atomes. Donc carbone et hydrogène mais elles ne sont pas constituées euh enfin elles ont pas autant de carbone et d'hydrogène l'une et l'autre. (Pause). Voilà. Je pense qu'un élève pense cela

[>I] : alors tu te rappelles du questionnaire avec la question entre CH4 et C2H8.

[>P] : oui

[>I] : et donc en collège 43% des élèves répondent correctement, ce n'est pas la même molécule. Et en première et terminale, il y a encore 42% des élèves qui répondent que c'est bien la même molécule.

[>P] : d'accord

[>I] : et dans les explications, c'est la même parce que c'est le double. Et là dans l'exemple, c'est le triple.

[>P] : Donc il y a une majorité des élèves qui pensent que c'est la même ?

[>I] : en collège, oui. Donc est-ce que tu fais travailler cela ?

[>P] : Non je ne fais pas travailler cette partie-là. J'ai du mal à comprendre pourquoi ils répondent que c'est la même. Que cela puisse être la même.

[>I] : Pourquoi tu as du mal ?

[>P] : (silence) Ben comme moi je leur parle que les atomes. Enfin quand je leur pose cette formule-là, enfin une formule brute, je leur explique qu'une formule brute égale une certaine association. Donc si on propose des chiffres différents ben forcément, j'ai, pour moi dans ma tête j'espère qu'ils comprennent que c'est une autre association. Et donc qui dit autre association dit autre molécule. (Silence) En fait, moi je, je fais peut-être la distinction mais euh un peu plus tard quand je parle des transformations chimiques et quand j'ajoute les coefficients. Alors par contre ça c'est très compliqué avec des élèves de quatrième, entre mettre CO2 ou 2CO2. Là il me pose la question, alors pourquoi on met pas C2O4. Ça j'ai déjà eu la question. Alors là je leur dis mais non, c'est pas la même chose. Parce que C2O4 c'est, c'est enfin j'ai dit que ce n'est pas réalisable. CO2 ça s'associe d'une certaine façon. Les atomes vont s'associer et vont être bien dans cet état-là. Dans cette configuration-là. Dans cette association-là. Donc on peut en mettre, on peut mettre deux molécules côte à côte mais associer deux atomes de carbone avec quatre atomes d'oxygène, c'est pas aussi simple.

[>I] : A quel moment tu parles de cette association ?

[>I] : alors oui je parle de ça au prochain chapitre. En fait je fais dans les combustions et j'associe donc transformation chimique.

[>I] : oui mais l'association entre atomes dont tu parles ? (Silence). Qu'est-ce que l'élève peut mettre derrière ce terme association d'atomes ? À la limite, là si je sors les atomes et que je les représente, je vais avoir C, C, C (écris sur le papier). Voilà tu vois ce que je veux dire ?

[>P] : oui

[>I] : et puis H, H, H. Toi effectivement tu mets les liaisons.

[>P] : oui. Oui oui. Mais là quand ils modélisent, je leur fais faire. Enfin mais déjà sur certaines modélisations, quand je vais prendre les petits modèles, en fait j'ai des petites, j'ai des petites boules noires, avec par exemple pour le carbone, j'ai quatre trous. Pas un de plus. Donc je leur montre que des fois c'est pas possible d'associer exemple, je vais prendre une bêtise, exemple, je vais prendre un carbone avec cinq hydrogènes, c'est pas possible. Par exemple, je leur dis, il y a un problème. Par exemple, quand on fait l'association, c'est vrai que je note pas clairement dans le cours mais, enfin quand je passe dans les groupes lors des modélisations, je leur fais comprendre. Je leur fais comprendre qu'il y a des associations possibles. On voit clairement que c'est possible et il y a des moments non.

[>I] : Donc en fait tu fais la liaison chimique

[>P] : oui mais je leur en, enfin je leur en parle pas de liaisons

[>I] : mais c'est bien cela qu'il y a là

[>P] : oui, oui

[>I] : parce que tant que tu n'as pas de liaison chimique finalement

[>P] : oui, oui

[>I] : là c'est proportionnel et historiquement il y a eu cette façon de penser

[>P] : d'accord.

[>P] : c'est vrai que je ne parle pas de liaison

[>I] : alors si je reprends dans le questionnaire, dans les équations chimiques, les résultats sont pires. Tu n'as que la moitié des élèves de terminale qui disent que l'équation avec O n'est pas correcte. Et seulement 17% capables de justifier pourquoi elle n'est pas correcte

[>P] : en terminale ?

[>I] : oui. (Silence)

[>P] : en fait quand je me pose la question, je me dis en même temps comment expliquer euh autrement. Voilà. En fait j'essaye toujours, surtout au collège, j'essaye d'expliquer le plus simplement possible mais c'est vrai en fait on ne peut pas tout dire. Enfin le principe de liaison, je ne me vois pas expliquer le principe de liaison. Alors je leur montre qu'il y a un lien avec le petit morceau en plastique qui relie ma petite boule noire à ma petite boule rouge ou ma petite boule blanche mais euh. Je parle d'un ensemble cohérent. (Elle rigole) Ouais mais ouais mais c'est, enfin c'est quand même en première, terminale, là cela me choque qu'il y ait autant de

[>I] : ah oui cela résiste bien sur toutes les questions que l'on a posées. On a même posé les questions en licence.

[>P] : d'accord

[…]

[>I] : On a aussi de très mauvais résultats sur les questions corps pur, mélange, atomes et molécules

[>P] : mélange. Alors ça moi je le vois plutôt en cinquième, le programme de cinquième. Et je me rappelle plus ce que les élèves avaient fait en fait l'année dernière. Mais corps pur et mélange. J'avais regardé quelques résultats de l'établissement au questionnaire mais je me rappelle plus ce qui était ressorti mais là aussi corps pur et mélange c'est un peu le, au niveau des résultats

[>I] : c'est catastrophique. Molécule et atome c'est pas excellent mais cela augmente avec le niveau scolaire. Corps pur et mélange, les résultats sont du même niveau en collège et en terminale. Il n'y a pas d'amélioration avec le niveau scolaire et il y a une confusion corps pur corps simple, déjà.

[>P] : D'accord

[>I] : CO2, c'est forcément un mélange

[>P] : D'accord.

[>I] : Donc au niveau macroscopique, les termes ne sont pas du tout maîtrisés.

[>P] : C'est vrai que corps pur corps simple c'est vrai que, enfin moi je n’en parle pas. Enfin à part la notion de corps pur en cinquième, je ne parle pas de corps simple. Pour moi, la notion de corps simple, c'est une molécule, c'est la molécule, voilà. Donc je ne parle pas de corps simple du tout.

[>I] : molécule avec un atome, un constituant

[>P] : oui

[>I] : c'est nous qui disons qu'ils font une confusion qui nous amène à penser que le corps pur est un corps simple. Eux ne disent pas corps simple.

[>P] : D'accord

[>I] : mais ils ne parlent de corps pur que pour des formules avec un seul type d'atome

[>P] : D'accord

[…]

[>I] : Si on a la réponse à pourquoi tel nombre d'atomes dans telle molécule, ça on ne peut pas donner de réponse au collège

[>P] : Ben c'est assez

[>I] : qu'est-ce que tu veux donner comme réponse ? Quelle réponse tu voudrais fournir toi ? (Silence) Moi ça me paraît difficile. C'est l'analyse qui montre que l'on a tant. Ce n'est pas certain que l'élève se rende compte que la molécule c'est un nombre déterminé d'atomes et que cela ne peut pas bouger. C'est cet aspect-là sur lequel il faut insister mais là cela transparaissait quand même mais il faut le faire tout le temps

[>P] : moi je réinsiste surtout quand je fais l'équilibre des équations et là je vois une vingtaine de bouches grandes ouvertes : "je ne comprends plus rien " et là je sors mes petits modèles mais bon. Ça je fais avec les modèles mais bon

[>I] : cela donne au moins une interprétation imagée. C’est difficile de

[>P] : c'est vrai qu'en collège

[>I] : même après

[…]

[>P] : c'est comme, enfin là j'ai parlé atomes d'hydrogène et d'oxygène mais je ne me voyais pas parler d'atomes sans parler d'éléments mais en même temps définir un élément chimique euh j'ai pas envie de me mettre sur ce terrain, sur cette pente très raide. Donc c'est pour cela que j'en parle, je leur dis quand même qu'il y a des éléments chimiques, c'est des éléments présents sur Terre. J'en cite quelques-uns. Certains me citent un alliage, je dis non.

[>I] : et oui c'est là où le macro et le micro se sont mélangés si on veut parler de mélange.

[>P] : il y a beaucoup de choses où on leur dit, ah oui et puis des fois ils me posent des questions euh

[>I] : ah mais ils sont curieux

[>P] : oui en général, ils sont curieux. C'est ça que j'aime beaucoup.

[…]

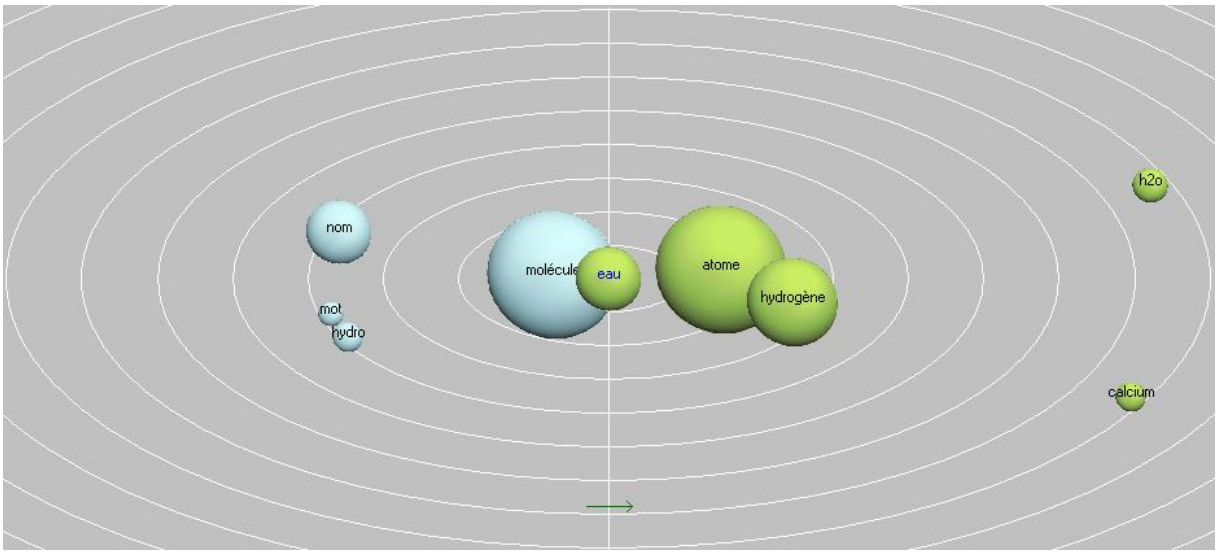
[>I] : et là au collège, les élèves vont majoritairement au lycée général ?

[>P] : alors ils vont au lycée général en majorité. Enfin le Principal veut envoyer une majorité et veut respecter les chiffres après il y en quand même qui veulent aller en professionnel.

[>I] : là dans la classe, ils sont de quel niveau ?

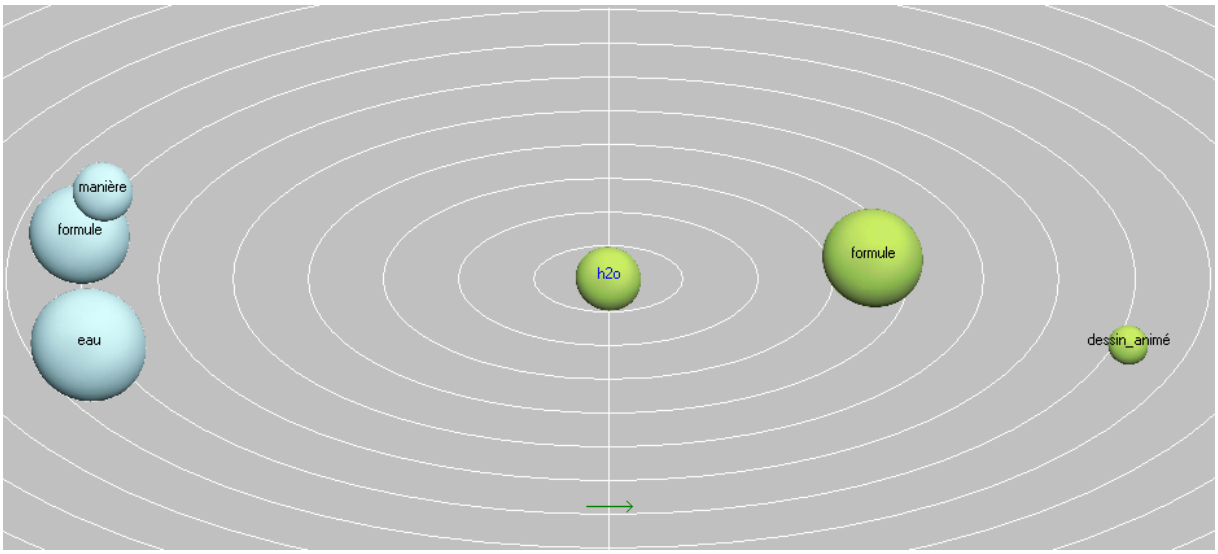
[>P] : ici je pense qu'une ma, il faut voir au cas par cas quand même, mais ils sont une majorité à pouvoir aller en lycée général. Aussi je dirai 60 / 40, 70 / 30

Annexe 14 : Graphes en aire pour l'analyse des séances



Graphe en aires de la classe d'équivalent eau

La classe d'équivalent eau regroupe



Graphe en aires de la classe d'équivalent H_2O

Annexes de 15 à 19 : Partie 3

Annexes 15 : Élaboration historique du langage — Avant Lavoisier

Annexe 15.1 : La chimie en tant que science

Jusqu'au XVIIe siècle inclus, la chimie est un enchevêtrement de doctrines rivales et, à « *l'épaisseur énigmatique des choses, l'alchimie répond en brouillant l'épaisseur sémantique des signes et des symboles* » (Bimbot & Guillerme, s. d.). Ce qui peut s'apparenter à ce que nous appelons la chimie (en latin médiéval : art de transformer les métaux) est pratiqué par de nombreuses catégories :

> *[…] les mages alchimistes héritiers de traditions mystérieuses, les alchimistes conquérants tournés vers le futur, les chimistes « rationalistes », aristotéliciens, les chimistes techniciens, artistes et artisans, les médecins, pharmaciens et métallurgistes (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 39).*

Pour les « *mages alchimistes* », l'ésotérisme est de rigueur. Les connaissances ne doivent pas être dévoilées au commun des mortels sous peine de s'exposer à la colère céleste. « *C'était à eux (les alchimistes), et non à d'autres, que Dieu avait dispensé une part de Vérité.* » (Massain, 1966, p. 28). Il en ressort l'emploi d'un langage fermé utilisant abusivement les anagrammes, cryptogrammes, allégories et les énigmes de toutes sortes. Les philosophes déplorent la manière dont s'expriment les chimistes.

> *Descartes, dans une lettre au marquis de Newcastle, en 1646, les accuse, on l'a vu, « de dire des mots hors de l'usage commun, pour faire semblant de savoir ce qu'ils ignorent [54] ». Arnauld et Nicole, de même, en 1662, trouvent ridicules les raisonnements des chimistes « qui ont pris plaisir de changer les noms à la plupart des choses dont ils parlent, sans aucune utilité, et de leur en donner qui signifient déjà d'autres choses qui n'ont nul véritable rapport avec les nouvelles idées auxquelles ils les lient[55]. ». (Laszlo, 1993, p. 30).*

Au début du XVIIe siècle, aucune théorie, admise et reconnue par tous, n'émerge. Il n'y a pas d'accord entre les chimistes sur les principes qu'il conviendrait de tenir pour essentiels. Pour Massain, la science est construite à leur « *convenance personnelle* » (1966, p. 71).

Avec le XVIIe siècle, l'expérience change de statut, notamment avec Boyle (1627 – 1691) qui plaide pour la confrontation de la théorie avec le fait expérimental, alors que ces

[54] Descartes, *Œuvres*. Lettres, coll. La Pléiade, Gallimard, 1941, p. 1012.
[55] Arnaud et Nicole, *La logique ou l'art de penser*, Amsterdam, Abraham Wolgang, 6e ed., 1685, p. 113

prédécesseurs ne s'appuyaient que sur « *l'autorité morale de l'auteur* » (Laugier & Dumon, 2001, p. 4). L'imprécision de la nomenclature est sans doute aussi un moyen pour les alchimistes d'éviter toute contradiction. Avec des chimistes comme Van Helmont, Boyle, Lémery, la chimie en tant que science commence à se développer. Pourtant, ce développement ne se fait pas contre l'alchimie mais au sein de celle-ci avec la volonté de « *comprendre rationnellement la structure de la matière en général* » (Scheidecker-Chevallier & Laporte, 1999, p. 18). La terminologie utilisée ne progresse pas pour autant et continue à rendre l'accès à la chimie toujours aussi difficile et réservé à des initiés. En 1751, Venel, en introduction de son article « Chymie » dans l'encyclopédie de Diderot et d'Alembert écrit à propos de la chimie que :

> *Cette science n'est que très médiocrement répandue, même parmi les savans, malgré la prétention à l'universalité de connoissances qui fait aujourd'hui le goût dominant. Les Chimistes forment encore un peuple distinct, très peu nombreux, ayant sa langue, ses lois, ses mysteres, & vivant presque isolé au milieu d'un grand peuple peu curieux de son commerce. (1751, p. 408)*

Et le lien étroit à la médecine et aux pratiques artisanales (métallurgies, parfumeries, …) n'aide sans doute pas non plus son positionnement en tant que science.

> *La chimie dans son propre corps la double langue, la populaire & la scientifique. (Venel, 1751, p. 426)*

Annexe 15.2 : La nomenclature avant Lavoisier

Les chimistes jusqu'au XVIIIe siècle utilisent « *une jungle de mots exotiques et obscurs* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 63). Cette jungle reflète celle des pratiques et l'incapacité pour les chimistes aussi bien d'identifier les propriétés d'un corps que d'isoler des corps purs, la plupart des préparations aboutissant à des mélanges. Les chimistes sont confrontés à un labyrinthe enchevêtré des opérations, des propriétés et des substances. La connaissance à propos des corps est intimement liée aux pratiques, et « *celles-ci ne peuvent elles-mêmes être conçues comme logiquement déductibles d'une hypothèse théorique bien fondée.* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 37). Les substances sont désignées « *du nom de leur inventeur (sel de Glauber, liqueur de Libavius), d'autres par leur origine (vitriol romain, hongrois), d'autres par leurs effets médicinaux, d'autres par leurs modes de préparation* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 63). Astrologie et médecine peuvent se mélanger dans l'élaboration des noms, renforçant le manque de clarté. « *Le monde des métaux avait sa correspondance avec celui des planètes, de la lune et du soleil, eux-mêmes associés aux organes vitaux du corps humains*. » (de Menten, 2013, p. 46). Les chimistes ne possèdent pas les techniques leur permettant d'analyser des substances obtenues à partir de modes opératoires différents. Ils ne peuvent dans ce cas se rendre compte que celles-ci sont parfois identiques. Une même espèce chimique peut alors avoir plusieurs noms différents. Le sel fixe de tartre est ainsi dénommé parce qu'on l'obtient par calcination du tartre qui se dépose dans les tonneaux de vin. Le sel fixe alcali est extrait des cendres de bois. Pourtant ils ne sont qu'un seul et même corps : « *notre carbonate de potassium*. » (Massain, 1966, p. 71). On trouve également des noms tels que« *fleur de soufre, obtenue en condensant une fumée, précipité de soufre, esprit ou huile de vitriol, selon que la catégorie aboutit à un acide plus ou moins concentré* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 63). Inversement, il arrive qu'une même substance possède des noms différents. Le sulfate de potassium peut indifféremment être nommé *« vitriol de potasse, tartre vitriolé, sel de duobus, sel polychreste de Glazer et arcanum duplicatum* » (Massain, 1966, p. 71). Des substances chimiques voisines jouant le même rôle au cours d'une préparation amenant au même produit final peuvent porter le même nom. Le mot alcali désigne aussi bien la soude que la potasse. En ce début de XVIIIe siècle, il manque encore aux chimistes la connaissance de la constitution des corps sans laquelle une nomenclature rationnelle est impossible.

Notre nitrate de cuivre est dénommé cristaux de Vénus, notre oxyde d'étain fleurs de Jupiter, notre acétate de plomb sel de Saturne, notre sulfate d'argent vitriol de Lune, notre chlorure stannique l'esprit fumant de Libavius …. Certes, le pittoresque n'y perd rien, mais on conviendra que le premier mérite d'une nomenclature bien faite doit être de faciliter l'initiation scientifique du lecteur. Il est vrai qu'une nomenclature digne de ce nom exige la connaissance de la constitution même des corps que l'on veut dénommer : c'est loin d'être le cas à l'aube du XVIIIe siècle ! (Massain, 1966, p. 90)

Annexe 15.3 : Les symboles avant Lavoisier

Alors que l'alchimie connaît son apogée au Moyen-Âge et à la Renaissance, on trouve les premiers symboles dans les manuscrits grecs aux environs du IIIe siècle de notre ère. Les symboles se transmettent ensuite aux Arabes puis à l'Occident en même temps que « *les règles et les recettes ésotériques* » (Ponot, 1971, p. 67) permettant de réserver l'interprétation de ce langage aux seuls initiés. Ce mode d'écriture symbolique permettant de conserver un fonctionnement ésotérique est donc apprécié des alchimistes. C'est toujours la croyance d'être les dépositaires d'une vérité céleste qui les empêche de divulguer leurs secrets. On trouve dans ces symboles les éléments chimiques selon Aristote sous forme de triangle ainsi que les symboles les plus anciens empruntés à l'astrologie (Figure 74). Pour les alchimistes, les métaux présents au sein de la terre trouvent leur origine dans les astres : « *c'est le Soleil qui avait fait naître l'or, la Lune l'argent, etc.* » (Massain, 1966, p. 36). Une partie des symboles sont également issus d'abréviations des noms grecs des substances qui se sont transformées au cours du temps (Crosland, 1980, p. 230).

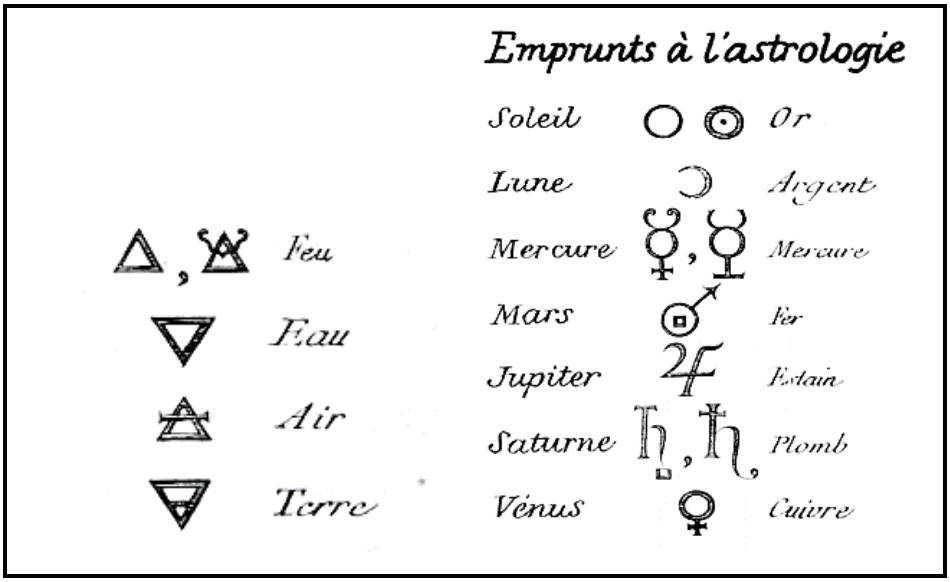


Figure 74 Les éléments d'Aristote et les symboles issus de l'astrologie (Ponot, 1971)

Pour Crosland (1980, p. 235), la façon dont les symboles alchimiques ont chacun une signification littérale et peuvent être combinés ensemble pour donner une nouvelle substance, montre que ceux-ci symbolisent avant tout le nom de la combinaison plutôt que la substance elle-même. Enfin, comme dans le cas des noms, une même substance peut être représentée par une variété de symboles : 32 symboles pour le tartre, 39 symboles pour le mercure (Crosland, 1980, p. 236).

Avec le XVIIIe siècle, l'alchimie est en train de devenir chimie. Les expériences ne sont plus rattachées à un quelconque mysticisme ou une quelconque magie. Les signes utilisés perdent leur aspect mystérieux. Les premières théories chimiques essayant de coordonner l'ensemble des phénomènes observés à l'époque apparaissent : théorie du phlogistique, théorie des affinités. Il s'agit pour Scheidecker-Chevallier et Laporte (1999, p. 32), de la première théorie chimique scientifique susceptible d'être réfutée au sens de Popper. Les symboles reviennent alors au premier plan mais les chimistes conservent ceux des alchimistes. Est-ce par habitude ou par conservatisme ? Toujours est-il qu'ils ont été *« forgés au fil des siècles, sanctionnés par l'usage et perpétuent bien la mémoire d'une tradition* » (Bensaude-Vincent, 1989, p. 373). Aux symboles des alchimistes, de nouveaux se sont ajoutés. Diderot (1762), pour illustrer l'article « *Chymie* » de Venel (1751) dans son encyclopédie, utilise quatre planches pour rassembler ce qui semble être l'ensemble des symboles chimiques connus à l'époque. Ceux-ci sont utilisés aussi bien pour illustrer les substances (Figure 75) que les procédés (Figure 76) ou les instruments (Figure 77).

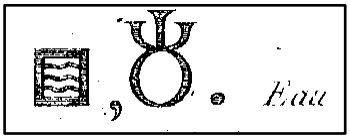


Figure 75 Extrait planche n°1 : une substance chimique (Diderot & d'Alembert, 1762, p. pl1).

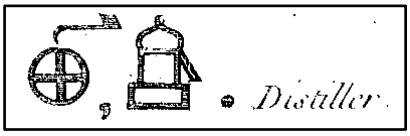


Figure 76 Extrait planche n°1 : un procédé (Diderot & d'Alembert, 1762, p. pl1).

Figure 77 Extrait planche n°1 : un instrument (Diderot & d'Alembert, 1762, p. pl1).

On trouve également plusieurs signes pour représenter les mêmes substances (Figure 78).

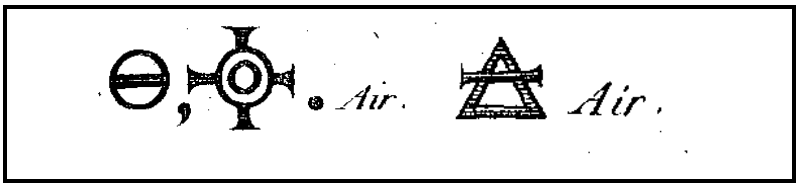


Figure 78 Extraits planche n°1 et planche n°4 : l'air (Diderot & d'Alembert, 1762, pp. pl1-4)

Pour Crosland (1980, p. 240), la *Table des différents rapports observés entre différentes substances* de Geoffroy (Figure 79) va remettre au premier plan les symboles en 1718. Sont toujours présents les éléments d'Aristote ainsi que les symboles issus de l'astrologie :

- « *le cercle pour les métaux solaires colorés (or, cuivre, fer, …)*
- *le demi cercle pour les métaux lunaires argentés (argent, étain, plomb, ..)* » (Laugier & Dumon, 2001, p. 6)

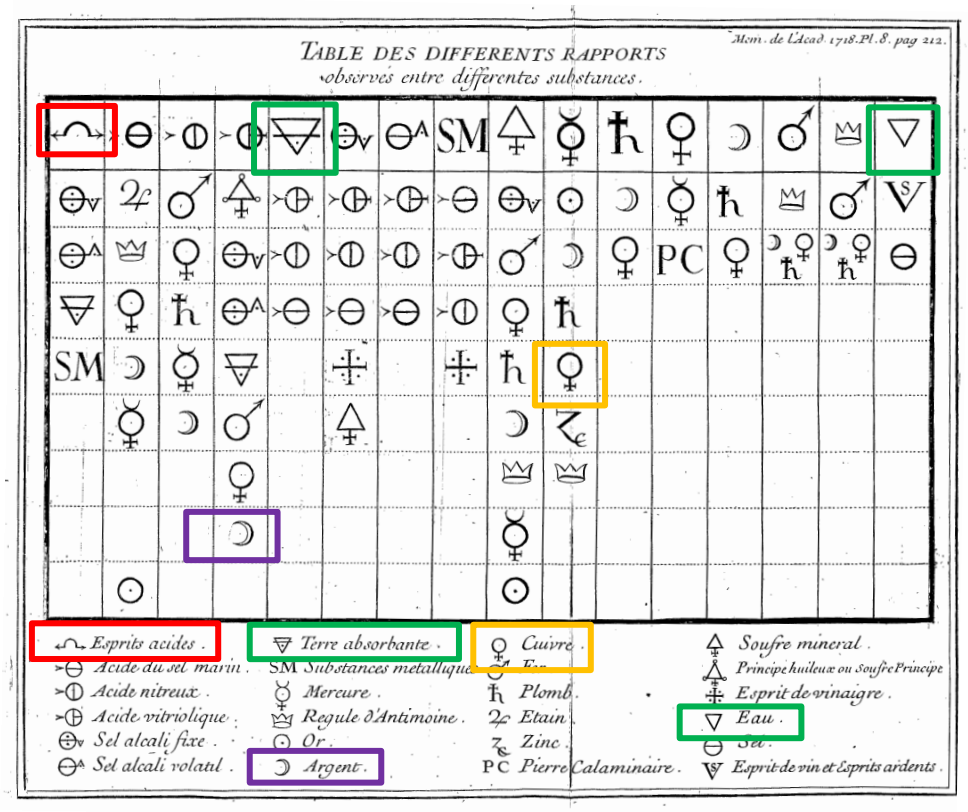


Figure 79 Table de Geoffroy publiée dans l'histoire de l'académie royale des sciences (1718, p. 212)

Mais, en plus des symboles traditionnels, les chimistes commencent à en développer de nouveaux en lien avec l'apparition des premières théories chimiques. Un symbole important dans la table Figure 79 est celui correspondant à l'esprit d'acide combinaison du symbole Ω lié à l'esprit en grec et des flèches se référant aux théories de Lemery

sur l'action corrosive des acides due à leurs pointes. Pour Geoffroy, il est possible d'illustrer la relation entre diverses substances à l'aide des symboles, une fois leurs significations comprises, rendant alors celle-ci accessible d'un seul coup d'œil (Crosland, 1980, p. 240). Les sels sont interprétés comme des substances composées. Des chimistes comme Rouelle en 1774 et Bergman en 1775 vont proposer des symboles indiquant très clairement leur

composition même si les mixtes n'ont pas encore à cette date de noms systématiques acceptés (Crosland, 1980, p. 237‑ 238). Nous verrons un peu plus loin que Lavoisier va utiliser dans un de ses mémoires ces nouveaux symboles composés pour essayer de représenter des transformations chimiques dans un langage censé soulager l'esprit. Mais malgré les avantages que semble permettre l'utilisation des symboles pour travailler à partir des nouvelles théories, de nombreux chimistes dans cette deuxième partie de XVIIIe siècle les rejettent, considérant encore que les erreurs auxquelles peuvent conduire leurs mauvaises interprétations l'emportent sur les avantages. Enfin la connaissance de l'ensemble des symboles augmente très lourdement la tâche des étudiants.

Annexes 16 : Élaboration historique du langage — Lavoisier

Annexe 16.1 Les principes de la nouvelle classification

Guyton de Morveau entreprend en 1782 la refonte de la nomenclature.

> *Il y avait alors au parlement de Dijon un avocat général, Guyton de Morveau, qui consacrait noblement ses loisirs à l'étude de la chimie et de la minéralogie. Il avait été frappé, dans ses leçons publiques, des inconvénients de la nomenclature, si l'on peut appeler ainsi une langue sans règles et sans clarté, collection de mots bizarres et de synonymes fatigants. (Wurtz, 1869, p. 27).*

Pour lui, le langage est une affaire de convention. Il tente alors d'introduire « *des dénominations systématiques, un peu sur le modèle de la nomenclature de Linné en botanique* » (Bensaude-Vincent, 1989, p. 373). Il supprime les noms hérités de l'alchimie évoquant l'inventeur, le lieu de découverte ou celui des divinités.

> *Guyton de Morveau fut le premier qui insista sur la nécessité de réformer un langage qui permettait de dire, par exemple : huile de vitriol et huile de tartre, pour désigner un acide des plus énergiques et un sel d'une réaction très alcaline ; ou bien encore : crème de tartre et crème de chaux, comme pour indiquer une ressemblance de nature entre le bi tartrate de potasse et le carbonate de chaux, tandis qu'évidemment aucune espèce d'analogie ne rapproche ces deux composés. (Dumas, 1836, p. 327)*

Il cherche des noms neutres qui doivent faire consensus parmi ses collègues. Il simplifie de sorte qu'à chaque espèce chimique ne corresponde plus qu'un nom et un seul. Mais son entreprise échoue partiellement. Il souhaite en effet donner des noms qui reflètent les corps et soulager ainsi la mémoire de l'apprenti chimiste. Mais les connaissances chimiques de l'époque ne permettent pas encore d'assurer une identification suffisamment fiable des substances. Il se retrouve face à un dilemme. Faut-il nommer les substances dans un langage savant mais qui « *risque de véhiculer une conception révocable ou erronée, à cause de ses prétentions théoriques »* (Dagognet, 2002, p. 15) ou faut-il donner bien un mot vide de sens mais qui alors *« trahit les règles de la lexicographie rationnelle* » (Dagognet, 2002, p. 15) ?

Lavoisier reprend le projet en 1787 et, avec Guyton de Morveau, forme une nouvelle équipe comprenant également Berthollet et Fourcroy. En quelques mois, ils publient la *Méthode de*

nomenclature chimique. Ils élaborent les noms des corps en partant de ce que Lavoisier va appeler les corps simples pour aller vers les corps composés. Le chimiste décompose les substances pour trouver les simples et classe ensuite les substances en partant des simples pour retourner à la combinaison. Lavoisier propose alors une classification méthodique à partir d'une quarantaine de tableaux censés indiquer toutes les combinaisons possibles des corps simples amenant aux corps composés connus, voire encore inconnus à ce jour mais dont l'existence est prédite à partir de la méthode. Les chimistes lancent alors les travaux d'analyse pour identifier ces substances. Chaque tableau indique la composition des substances à partir des différentes associations possibles de simples ou des radicaux.

> *Le corps simple est le terminus de l'opération d'analyse conduite au laboratoire et le point de départ, l'alphabet de la nomenclature. (Bensaude-Vincent, 1989, p. 377)*

16.1.1 Les simples

La nomenclature est composée d'un alphabet de 33 noms simples correspondant aux substances simples (Figure 80) classées en fonction du type de composés qu'elles forment. Les premières ont un statut privilégié que Lavoisier nomme élément. Il n'arrive pas à rompre complétement avec la tradition aristotélicienne. On retrouve en effet dans cette catégorie « *les substances simples qui appartiennent aux trois règnes* » (Figure 80) : « *les principes du feu (Lumière et Calorique), de l'air (des gaz) et de l'eau (oxygène et hydrogène)* » (Dagognet, 2002, p. 24).

	NOMS NOUVEAUX.	NOMS ANCIENS CORRESPONDANTS.
Substances simples qui appartiennent aux trois règnes, et qu'on peut regarder comme les éléments des corps.	Lumière	Lumière.
	Calorique	Chaleur.
		Principe de la chaleur.
		Fluide igné.
		Feu.
		Matière du feu et de la chaleur.
	Oxygène	Air déphlogistiqué.
		Air empiréal.
		Air vital.
		Base de l'air vital.
	Azote	Gaz phlogistiqué.
		Mofette.
		Base de la mofette.
	Hydrogène	Gaz inflammable.
		Base du gaz inflammable.
Substances simples, non métalliques, oxydables et acidifiables.	Soufre	Soufre.
	Phosphore	Phosphore.
	Carbone	Charbon pur.
	Radical muriatique	Inconnu.
	Radical fluorique	Inconnu.
	Radical boracique	Inconnu.
Substances simples, métalliques, oxydables et acidifiables.	Antimoine	Antimoine.
	Argent	Argent.
	Arsenic	Arsenic.
	Bismuth	Bismuth.
	Cobalt	Cobalt.
	Cuivre	Cuivre.
	Étain	Étain.
	Fer	Fer.
	Manganèse	Manganèse.
	Mercure	Mercure.
	Molybdène	Molybdène.
	Nickel	Nickel.
	Or	Or.
	Platine	Platine.
	Plomb	Plomb.
	Tungstène	Tungstène.
	Zinc	Zinc.
Substances simples, salifiables, terreuses.	Chaux	Terre calcaire, chaux.
	Magnésie	Magnésie, base de sel d'Epsom.
	Baryte	Barote, terre pesante.
	Alumine	Argile, terre de l'alun, base de l'alun.
	Silice	Terre siliceuse, terre vitrifiable.

Figure 80 Traité élémentaire de chimie : tableau des corps simples (A. L. Lavoisier, 1864, p. 135)

La nouvelle nomenclature ne peut non plus faire table rase des habitudes et ne peut balayer des termes utilisés par d'autres catégories professionnelles (artisans, parfumeurs, pharmaciens, etc.).

> *On peut se rappeler que nous nous sommes efforcés de conserver à toutes ces substances les noms qu'elles portent, dans la société : nous ne nous sommes permis de les changer, que dans deux cas ; le premier à l'égard des substances nouvellement découvertes et qui n'avoient point encore été nommées, […] le second, lorsque les noms adoptés, soit par les anciens, soit par les modernes, nous ont paru entraîner des idées évidemment fausses. (Lavoisier, 1801, p. XVIII - XIX)*

Certaines substances comme les métaux (cuivre, étain, fer, or, …) (Figure 80) conservent leur nom usuel. D'abord parce qu'ils sont simples mais surtout parce qu'ils sont particulièrement utilisés dans les arts et la vie civile. Pour Cottez (1994, p. 680), « *on ne touche pas aux noms consacrés par le travail et les échanges.* ». Mais les périphrases disparaissent.

> *Les noms d'huile de tartre par défaillance, d'huile de vitriol, de beurre d'arsenic, de fleur de zinc, etc., sont plus impropres encore, parce qu'ils font naître des idées fausses : parce qu'il n'existe à proprement parler, dans le règne minéral et surtout dans le règne métallique, ni beurre, ni huile, ni fleurs. (Lavoisier, 1801, p. XXVI)*

Lavoisier les remplace par des noms simples, en lien logique avec sa théorie chimique. Il supprime également tous les noms qui pourraient rappeler la théorie de Stahl. Il change l'air vital par oxygène, le gaz inflammable par hydrogène et l'air phlogistiqué par azote, dont les nouvelles significations sont générateur d'acide pour oxy-gène, générateur d'eau pour hydro-gène et impropre à la vie animale pour azote. Lavoisier prévoit des substances simples qui n'ont pas encore été isolées. Il introduit dans les simples les radicaux muriatique, fluorique et boracique, le radical étant le corps simple qui donne un acide ou une base combinée avec respectivement un principe acidifiant ou un principe basifiant. Il déclare :

> *On sait seulement que ces radicaux s'oxygènent ; qu'ils forment les acides muriatique, fluorique et boracique, et qu'alors ils sont susceptibles d'entrer dans un grand nombre de combinaisons : mais la chimie n'a pas encore pu parvenir à les désoxygéner, s'il est permis de se servir de cette expression, et à les obtenir dans leur état de simplicité. (Lavoisier, 1864, p. 162)*

Enfin, il ignore dans ce tableau certaines substances qui sont à l'époque considérées comme simples.

> *Je n'ai point fait entrer dans ce tableau les alcalis fixes, tels que la potasse et la soude, parce que ces substances sont évidemment composées, quoiqu'on ignore cependant encore la nature des principes qui entrent dans leur combinaison. (A. L. Lavoisier, 1864, p. 137)*

16.1.2 Les composés

Les substances composées sont désignées par un nom juxtaposant ceux des constituants et classés par ce qu'il appelle genres et espèces.

> *Le nom de classes et de genres est dans l'ordre naturel des idées, celui qui rappelle la propriété commune à un grand nombre d'individus : celui d'espèces au contraire, est celui*

> *qui ramène l'idée aux propriétés particulières à quelques individus. […] Les acides, par exemple, sont composés de deux substances de l'ordre de celles que nous regardons comme simples, l'une qui constitue l'acidité et qui est commune à tous ; c'est de cette substance que doit être emprunté le nom de classe ou de genre : l'autre qui est propre à chaque acide, qui les différencie les uns des autres, et c'est de cette substance que doit être emprunté le nom spécifique. (Lavoisier, 1801, p. XX-XXI)*

Dans le tableau *Combinaisons binaires de l'hydrogène avec les substances simples* (Figure 81), le genre hydrure est appliqué aux corps simples métalliques. Lavoisier crée le genre oxyde composé du principe propre oxygène, comme pour les acides, et d'un principe spécifique (les simples métalliques ou non). Et les composés peuvent à leur tour devenir une base commune. L'eau n'est plus considérée comme un élément mais devient une combinaison binaire entre l'oxygène et l'hydrogène (Figure 81). Et, dans tous les tableaux, Lavoisier prévoit des combinaisons qui n'ont pas encore été découvertes comme pour les hydrures de simple métallique (Figure 81).

	NOMS des SUBSTANCES SIMPLES.	RÉSULTATS DES COMBINAISONS.	
		NOMENCLATURE NOUVELLE.	OBSERVATIONS.
Combinaisons de l'hydrogène avec:	Le calorique....	Gaz hydrogène.	Cette combinaison de l'oxygène et du carbone comprend les huiles fixes et volatiles, et forme le radical d'une partie des oxydes et acides végétaux et animaux ; lorsqu'elle a lieu dans l'état de gaz, il en résulte du gaz hydrogène carboné.
	L'azote.....	Ammoniaque ou alcali volatil.	
	L'oxygène.....	Eau.	
	Le soufre..... Le phosphore....	Combinaison inconnue[1].	
	Le carbone.....	Radical hydro-carboneux ou carbone-hydreux.	
	L'antimoine.....	Hydrure d'antimoine.	Aucunes de ces combinaisons ne sont connues, et il y a toute apparence qu'elles ne peuvent exister à la température dans laquelle nous vivons, à cause de la grande affinité de l'hydrogène pour le calorique.
	L'argent.....	Hydrure d'argent.	
	L'arsenic.....	Hydrure d'arsenic.	
	Le bismuth.....	Hydrure de bismuth.	
	Le cobalt.....	Hydrure de cobalt.	
	Le cuivre.....	Hydrure de cuivre.	
	L'étain.....	Hydrure d'étain.	
	Le fer.....	Hydrure de fer.	
	Le manganèse...	Hydrure de manganèse.	
	Le mercure.....	Hydrure de mercure.	
	Le molybdène..	Hydrure de molybdène.	
	Le nickel.....	Hydrure de nickel.	
	L'or.....	Hydrure d'or.	
	Le platine.....	Hydrure de platine.	
	Le plomb.....	Hydrure de plomb.	
	Le tungstène....	Hydrure de tungstène.	
	Le zinc.....	Hydrure de zinc.	

Figure 81 Traité élémentaire de chimie : extrait du tableau combinaisons binaires de l'hydrogène (Lavoisier, 1864, p. 152)

Enfin la plus grande nouveauté est sans doute l'ajout de préfixes et de suffixes :

- la terminaison « eux » et « ique » (Figure 82) pour indiquer le degré d'oxygénation dans les acides ou « ure » dans les cas des combinaisons non oxygénées ou acidifiées ;

NOMS des SUBSTANCES SIMPLES.	RÉSULTATS DES COMBINAISONS.	
	NOMENCLATURE NOUVELLE.	OBSERVATIONS.
Le calorique	Gaz du phosphore.	
L'oxygène.	Oxyde de phosphore. Acide phosphoreux. Acide phosphorique.	
L'hydrogène	Phosphure d'hydrogène.	
L'azote	Phosphure d'azote.	
Le soufre	Phosphure de soufre.	
Le carbone	Phosphure de carbone.	

Figure 82 Traité élémentaire de chimie : extrait des combinaisons binaires du phosphore (A. L. Lavoisier, 1864, p. 157)

- la terminaison « ate » (Figure 83) et « ite » (Figure 84) pour les sels correspondants.

NOMENCLATURE NOUVELLE.	
NOMS DES BASES.	NOMS DES SELS NEUTRES.
La chaux.	Phosphate de chaux.
La baryte.	Phosphate de baryte.
La magnésie.	Phosphate de magnésie.
La potasse	Phosphate de potasse.
La soude.	Phosphate de soude.

Figure 83 Traité élémentaire de chimie : extraits du tableau des combinaisons du phosphore saturé d'oxygène (A. L. Lavoisier, 1864, p. 176)

NOMENCLATURE NOUVELLE.	
NOMS DES BASES.	NOMS DES SELS NEUTRES.
La chaux.	Phosphite de chaux.
La baryte.	Phosphite de baryte.
La magnésie.	Phosphite de magnésie.
La potasse.	Phosphite de potasse.
La soude	Phosphite de soude.

Figure 84 Traité élémentaire de chimie : extrait du tableau des combinaisons du phosphore, premier degré d'oxygénation (A. L. Lavoisier, 1864, p. 175)

Pour Cottez (1994, p. 683), c'est en travaillant avec les acides que Lavoisier et ses condisciples ont eu l'idée de « *cette néologie révolutionnaire* ». Cette innovation lexicale est toujours utilisée de nos jours. Au final, plus qu'une nomenclature, Lavoisier élabore une méthode pour nommer.

> *Il me suffit d'avoir donné ici, non la dénomination de tous, mais la méthode de les nommer tous. Le mérite de la nomenclature que nous avons adoptée, consiste principalement en ce que la substance simple étant nommée, le nom de tous ses composés découle nécessairement de ce premier mot. (Lavoisier, 1801, p. 56)*

16.1.3 La nomenclature au cœur du travail du chimiste

En 1787, Lavoisier et ses condisciples publient la *Méthode de nomenclature chimique*, ne traitant a priori que des aspects des nouvelles dénominations. Deux ans après, c'est le *Traité élémentaire de chimie* qui regroupe et associe dans un même ouvrage nomenclature et analyse chimique.

> *Et en effet, tandis que je croyais ne m'occuper que de nomenclature, tandis que je n'avais pour objet que de perfectionner le langage de la chimie, mon ouvrage s'est transformé insensiblement entre mes mains, sans qu'il m'ait été possible de m'en défendre, en un traité élémentaire de chimie. (Lavoisier, 1801, p. 1‑2)*

Les tableaux classant les espèces chimiques et donnant les anciennes et nouvelles dénominations sont le cœur de l'ouvrage, entre une première partie portant sur l'ensemble des combinaisons connues et leur analyse chimique et une dernière partie exposant l'ensemble des techniques d'analyse. Le travail de nomenclature est placé au cœur du travail du chimiste. Analyser, classer et nommer sont indissociables. La finalité de la nomenclature n'est pas uniquement de nommer mais est aussi de donner un outil pour prévoir :

> *Les langues n'ont pas seulement pour objet, comme on le croit communément, d'exprimer par des signes, des idées & des images : ce sont, de plus, de véritables méthodes analytiques, à l'aide desquelles nous procédons du connu à l'inconnu. (de Morveau, Lavoisier, Bertholet, & de Fourcroy, 1787, pp.6)*

C'est ainsi que des substances, analysées comme simples à l'époque, seront classées en composés (radical muriatique, borique, flurorique) et des complexes encore inconnus au moment de l'édition du traité élémentaire auront déjà leur place dans les tableaux (les hydrures métalliques). Les faits, les noms et les idées deviennent indissociables et se correspondent à tel point que « *la chimie peut les confondre* » (Dagognet, 2002, p. 21).

L'entreprise de Lavoisier est très rapidement reconnue par ses pairs comme un moment fondamental de la chimie.

> *La nomenclature latine, dite antiphlogistique, qui sert de base à la nomenclature française, est un véritable chef-d'œuvre. Celui qui, avec un peu de connaissance de la chimie, la parcourt la connaît tout de suite ; et elle contient pour ainsi dire une partie principale de la théorie de la science. (Berzelius, 1835, p. 155)*
>
> *Cette langue chimique, si admirable dans sa précision, n'a pas peu contribué au triomphe des idées, à la fin du dernier siècle. (Wurtz, 1869, p. 27)*

La révolution de Lavoisier est bien de s'être approprié la chimie par l'analyse et par la dénomination. Et sa nomenclature va servir aux triomphes de ses idées.

> *Guyton Morveau mettait en avant vers la même époque une nouvelle nomenclature, mais il l'appliquait à la théorie du phlogistique. Lavoisier, après quelques discussions, finit par entraîner tous les suffrages, et obtint que la nomenclature nouvelle serait l'expression de ses doctrines. Ce fut un vrai triomphe pour lui ; car bientôt cette théorie si belle, exposée dans un langage si clair et si logique, obtint la faveur populaire et réunit tous les suffrages. (Dumas, 1836, p. 176‑177)*

Annexe 16.2 Une nomenclature pour penser une nouvelle chimie

Lavoisier ne cherche pas simplement à ranger ou à convenir d'un nom mais il s'agit bien « *de décomposer ou de reconstruire à la fois les choses et les faits (le parallélisme physico-grammatical)* » (Dagognet, 2002, p. 22). Il est convaincu qu'un ordre naturel (une classification) existe pour les espèces chimiques et que la nomenclature doit s'appuyer sur cet ordre, en être le reflet et en favoriser l'apprentissage (Dagognet, 2002, p. 22).

16.2.1 Plus qu'une nomenclature : une philosophie

Pour Condillac, on ne peut pas raisonner sans une langue bien faite.

> *Nous avons remarqué que le développement de nos idées et de nos facultés ne se fait que par le moyen des signes et ne se ferait point sans eux ; que, par conséquent, notre manière de raisonner ne peut se corriger qu'en corrigeant le langage et que tout l'art se réduit à bien faire la langue de chaque science. (Condillac, 1822, p. 458)*

Une partie des difficultés de la chimie vient de son langage. Sans un langage pensé avec logique, il ne peut y avoir de raisonnement scientifique.

> *Faut-il s'étonner qu'on ne sache pas raisonner, quand la langue des sciences n'est qu'un jargon composé de beaucoup trop de mots, dont les uns sont des mots vulgaires qui n'ont pas de sens déterminé, et les autres des mots étrangers ou barbares qu'on entend mal ? (Condillac, 1822, p. 445).*

Pour que la chimie soit enfin reconnue en tant que science ou en tant que discipline universitaire, élaborer son langage devient une nécessité. Les termes utilisés avant Lavoisier véhiculent des idées fausses. « *les erreurs scientifiques sont des erreurs linguistiques* » (Bensaude-Vincent, 1989, p. 375). Lavoisier est complétement convaincu que la chimie ne peut progresser qu'avec les progrès de sa langue. « *Une langue qui retarde »* ne peut pas permettre *« une connaissance qui avance* » (Cottez, 1994, p. 677). Il y a donc pour Lavoisier urgence à proposer un système de dénominations basé sur des principes scientifiques avec des noms précis et non choisis au hasard. Quoi de mieux pour construire cette nouvelle langue que de prendre appui sur ses propres théories.

16.2.2 Une nomenclature pour propager une nouvelle chimie

Le XVIIIe siècle voit les échanges entre scientifiques se multiplier. Lavoisier a bien compris l'importance de la langue pour propager ses idées. Il cherche à acquérir des appuis pour sa nouvelle doctrine. La forme ou la nomenclature doit permettre de faire passer le fond anti phlogistique. Dumas dira plus tard de Lavoisier :

> *Dans la marche qu'il suit en l'exposant, se fait voir le désir qu'il avait de ne blesser personne, de se concilier les suffrages, et d'acquérir des appuis à sa nouvelle doctrine dont le fond allait passer d'une manière définitive, grâce à la forme. (Dumas, 1836, p. 332)*

Par rapport au travail initial de Guyton de Morveau, toutes les dénominations sont fondées sur la base exclusive de ses théories*, « transformant ainsi le projet collectif de réforme en arme de guerre contre la doctrine du phlogistique »* (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 117). Cette posture extrême contre la théorie du phlogistique va amener certains chimistes à s'opposer à sa nomenclature en 1787. Priestley, Cavendish, Black ou Davy souhaitent conserver ou choisir des noms « neutres » ne reflétant aucune théorie plutôt que ceux proposés par Lavoisier. Mais pour imposer son travail et ses nouvelles théories, Lavoisier entame un important travail de persuasion en prenant notamment contact avec les chimistes de tous les pays et en proposant une traduction immédiate de ses ouvrages. Pour être certain de voir ses travaux publiés au plus vite, il décide de créer avec Guyton de Morveau, Gaspard Monge, Berthollet, Fourcroy, Hassenfratz et Adet une nouvelle revue, *les Annales de chimie*, immédiatement distribuée en France et en Angleterre. Dès 1790, les nouvelles théories de Lavoisier l'emportent.

> *La vision de Lavoisier s'est introduite dans l'esprit du lecteur, savant ou écolier, avec les mots mêmes de la langue chimique ; et l'on sait quelle est, en pareil cas, la puissance des mots. (Wurtz, 1869, p. 30)*

Sa nomenclature entraîne quasi immédiatement l'oubli de l'ancienne rendant ainsi la plupart des ouvrages de ces prédécesseurs illisibles et les rejetant irrémédiablement « *dans une lointaine préhistoire* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 119).

> *Bannir les noms en usage et construire une langue artificielle, uniquement forgée sur les bases de la théorie lavoisienne, c'est en finir avec le passé. Mieux : c'est renaître par le baptême. (Bensaude-Vincent, 1989, p. 373)*

L'adhésion de l'ensemble des chimistes à la nouvelle langue se fait aussi autour de ses mérites pédagogiques. Les chimistes et hommes d'État de l'époque (Fourcroy, Guyton, Lavoisier) se

sont tous tout autant préoccupés des nouvelles théories que de leur transmission. Et permettre la transmission de la chimie au sein de l'Université, c'est aussi permettre de propager les théories de Lavoisier.

16.2.3 Une nomenclature pour apprendre

Pour Dagognet (2002), il y a une urgence pédagogique en cette fin de XVIIIe siècle. La chimie est en retard sur le plan industriel. Le développement industriel doit passer par le développement de l'enseignement universitaire. Or la chimie n'est toujours pas reconnue en tant que discipline à part entière à l'Université. Celle-ci doit d'abord devenir une science transmissible. Sortir du jargon utilisé et faire la réforme lexicale est donc pour Lavoisier une condition incontournable qui doit favoriser l'apprentissage et éviter de rebuter tous ceux qui souhaitent s'orienter vers la chimie.

> *On se déshabituera peu à peu de parler de l'esprit de Libavius (chlorure stannique) ou de celui de Vénus (acide acétique), du safran de Mars (oxyde de fer), de la liane philosophique (oxyde de zinc), des cristaux de lune (nitrate d'argent) ou de Chypre (sulfate de cuivre). Le poète n'y trouvera sans doute pas son compte, mais à coup sûr, l'apprenti chimiste y trouvera le sien. (Massain, 1966, p. 133)*

Le travail de Bergman et Guyton ne constitue pas « *un instrument de communication didactique* » (Laugier & Dumon, 2001, p. 8) au contraire de la nomenclature de Lavoisier dont le principal avantage est sa facilité d'apprentissage pour les étudiants (Sliwka, 2003). Apprendre le nouveau système réduit considérablement le temps qui était nécessaire pour apprendre l'ancien vocabulaire. Et non seulement les noms se retiennent enfin aisément mais ils permettent ainsi de retrouver les propriétés associées aux corps composés.

> *C'est un moyen facile de reconnaître, jusqu'à un certain point, d'après son nom seul, la nature du corps composé et même quelques-unes de ses propriétés les plus essentielles. (Regnault, 1850, p. 12).*

La chimie devient alors académique et se sépare à tout jamais des droguistes, parfumeurs ou artisans.

16.2.4 Les limites de ce travail

Pour Dagognet, Lavoisier n'a pas pu mener jusqu'au bout « *son projet de Tantale* » (2002, p. 22). Il ne parvient pas à conserver une totale cohérence sur l'ensemble des tableaux proposés

entre le collectif de *La méthode de la nomenclature* de 1787 et les quarante-quatre tableaux individuels du *Traité de chimie* de 1789. Les alkalis, présents dans le tableau de 1787, disparaissent du tableau des substances simples en 1789 (Figure 80). Il ne parvient pas non plus à faire totalement table rase du passé. Tous les éléments-principes d'Aristote ne sont pas éliminés. La lumière et le calorique sont conservés (Figure 80). Son objectif est de construire une nomenclature basée uniquement sur les théories de la chimie mais sa première catégorie de simple est rattachée au feu, à l'eau et à l'air, ce qui l'amène à conserver, sans aucune justification théorique, l'azote dans les éléments, car rattaché à l'air. Il ne peut non plus se détacher de tout empirisme. L'acide citrique et l'acide malique sont présents parce qu'extraits des citrons ou des pommes.

Sa nomenclature est basée sur une théorie qui va s'avérer par la suite erronée. Il confère en effet une place centrale à l'oxygène dans son système en faisant dériver tous les acides de ce simple. Il lui manque un véritable support théorique permettant d'individualiser les corps simples. Ceux-ci sont en effet définis par un critère négatif. Les corps simples ne sont que supposés simples car on ne peut savoir si, avec le développement des techniques, ils ne pourront à leur tour être décomposés.

> *Nous ne pouvons donc pas assurer que ce que nous regardons comme simple aujourd'hui le soit en effet : tout ce que nous pouvons dire, c'est que telle substance est le terme actuel auquel arrive l'analyse chimique, et `qu'elle ne peut plus se subdiviser au-delà, dans l`état actuel de nos connaissances. (Lavoisier, 1864, p. 137)*

Toute la base de sa classification peut s'effondrer d'un moment à l'autre avec l'évolution des techniques.

> *Puisque ces principes ne se séparent jamais, ou plutôt puisque nous n'avons aucun moyen de les séparer, ils agissent à notre égard à la manière des corps simples, et nous ne devons les supposer composés qu'au moment où l'expérience et l'observation nous en auront fourni la preuve. (Lavoisier, 1801, p. 7)*

Enfin, même si le principe d'une nomenclature allant du simple au complexe reste utilisable pour les composés binaires ou les ternaires, cela pose trop de difficultés pour les cas suivants, ce dont Lavoisier se rend très vite compte.

> *Tous les acides animaux ont pour base l'azote, le phosphore, l'hydrogène et le carbone ; une nomenclature qui entreprendrait d'exprimer à la fois ces quatre bases serait méthodique*

> *sans doute ; elle aurait l'avantage d'exprimer des idées claires et déterminées, mais cette cumulation de substantifs et d'adjectifs grecs et latins, dont les chimistes même n'ont point encore admis généralement l'usage, semblerait présenter un langage barbare, également difficile à retenir et à prononcer. (Lavoisier, 1801, p. 128‑129)*

Au final, la nouvelle nomenclature ne va pas résister au développement de la chimie organique. Le langage va à nouveau évoluer avec le développement de nouveaux faits et de nouvelles théories.

Annexe 16.3 : Une première tentative de nouveaux symboles

Lavoisier, de Morveau, Berthollet et de Fourcroy ajoutent à leur *Méthode de la nomenclature chimique* deux mémoires d'Hassenfratz et Adet intitulés *Un nouveau système de caractères chimiques adaptés à cette nomenclature* et *Sur l'arrangement que doivent avoir ces nouveaux caractères, afin de leur faire exprimer le rapport de quantité des substances simples contenues dans les mixtes*. Ces mémoires sont une tentative pour réformer les symboles alchimiques. Hassenfratz et Adet proposent de nouveaux caractères (Figure 85) à partir de figures géométriques de base : le trait (vertical pour le calorique, horizontal pour l'oxygène), le demi-cercle (ouvert à droite pour le carbone, à gauche pour l'hydrogène, vers le haut pour le soufre), cercle, le carré, le triangle, etc. Ces symboles doivent permettre de représenter les simples.

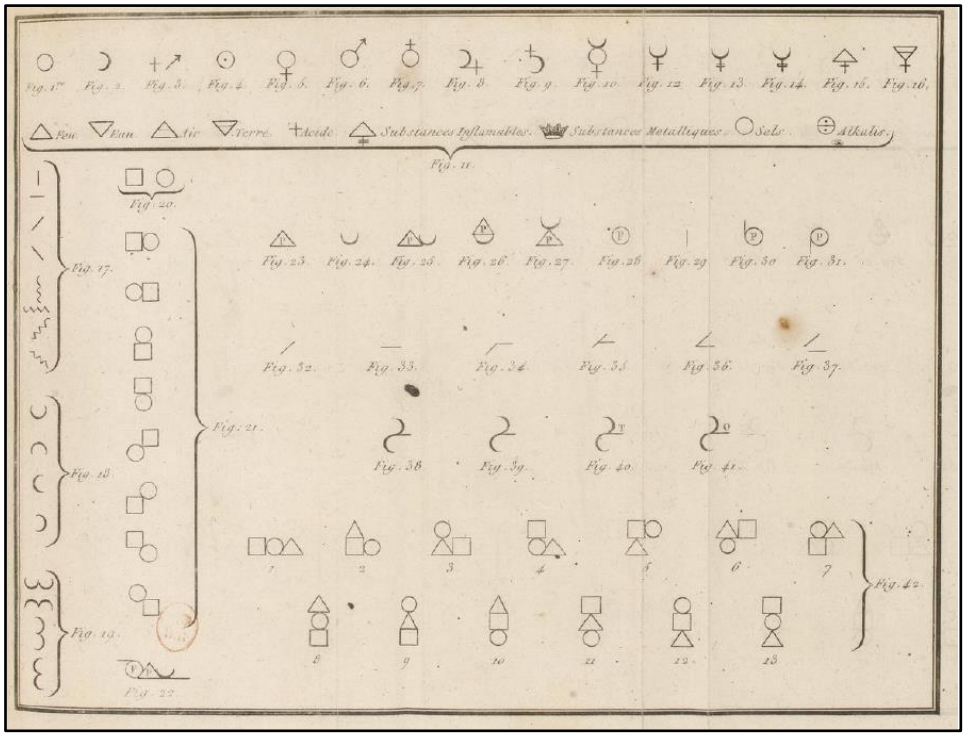


Figure 85 Symboles d'Hassenfratz et Adet (de Morveau et al., 1787)

À ces formes géométriques, insuffisantes pour représenter l'ensemble des simples sans risque de confusion, ils ajoutent des lettres qu'ils inscrivent à l'intérieur des triangles et des cercles (Figure 86). C'est la première fois que des lettres sont utilisées pour représenter des espèces chimiques, ce qui a, pour certains historiens, ouvert ensuite la voie à Berzelius (Crosland, 1980, p. 246). Ils combinent ensuite les caractères (Figure 85) des simples pour former les complexes. Dans la figure 86, le symbole du gaz carbonique est constitué des symboles du

carbone, de l'oxygène et du calorique. Ils distinguent les états physiques de l'eau en jouant sur la présence ou pas du calorique entre le solide, le liquide et la vapeur (Figure 86).

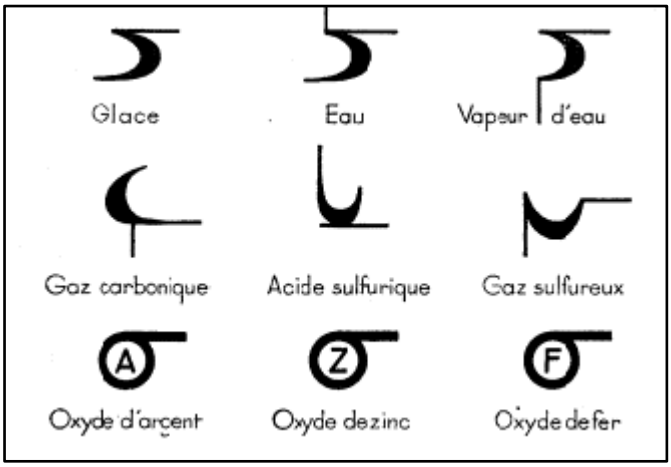
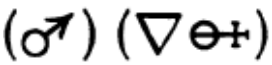


Figure 86 Symboles proposés par Hassenfratz et Adet (Laugier & Dumon, 2001)

Ils prônent le développement du pictural sur les mots qui ne « *suffiraient plus à peindre la chose* » (Dagognet, 2002, p. 38) car trop imprécis. Les caractères doivent permettre de mieux rendre compte de « *la nature, des proportions, rapports, arrangements des divers constituants qui entrent dans les mixtes* » (Dagognet, 2002, p. 40). À l'inverse de la nomenclature, ces symboles ne seront quasiment jamais utilisés. Il y a déjà un problème de typologie entraînant des difficultés d'imprimerie mais, pour Laugier et Dumon (2001, p. 3), ces symboles servent surtout à « *illustrer un discours* ». Avec ces notations, Hassenfratz et Adet ont essayé de clarifier et de simplifier les figures alchimiques en proposant des symboles basés sur la logique des théories de Lavoisier. Pour Lavoisier, ces symboles ne simplifient en rien l'apprentissage de la chimie, au contraire. Pourtant, dans un mémoire de 1782 intitulé *Considérations générales sur la dissolution des métaux dans les acides*, Lavoisier se rend bien compte qu'il manque encore à la chimie à la fois un modèle théorique et une représentation symbolique des réactions chimiques. Dans ce mémoire, il veut réaliser le bilan de matière des dissolutions métalliques. Il reprend les symboles utilisés par Geoffroy et Bergman et propose la suite de formules ci-dessous (Lavoisier, 1862, p. 515-517).

- Il représente la dissolution du fer dans l'acide nitreux :  .

- Mais comme l'acide nitreux est pour lui un composé, il remplace son symbole par ceux de l'air nitreux et du principe oxygine : . Sa théorie de l'oxydation est le principe central réorganisateur de la chimie (Laugier & Dumon, 2001, p. 8).

- Il fait ensuite apparaître les quantités en masse des différentes substances intervenant dans la réaction ainsi que l'eau nécessaire à la dissolution. La nouvelle formule devient :

$$(a\,♂) + (2\,a\,b\,▽ + \frac{a\,b}{q}\,▽) + (\frac{a\,b}{s}\,⊕ + \frac{a\,b}{t}\,△)$$

- Enfin il donne ce qui reste après la dissolution et après dégagement d'une quantité en masse d'air nitreux :

$$(a\,♂ + \frac{a}{p}\,⊕) + (2\,a\,b\,▽ + \frac{ab}{q}\,▽) + \frac{a\,b}{s}\,⊕ - \frac{a}{p}\,⊕ + \frac{ab}{t}\,△ - \frac{a}{p}\,△)$$

Lavoisier tente avec ces symboles de résumer l'ensemble des réactions en quelques formules algébriques, comme peuvent le proposer les mathématiques, ce qui devrait être plus simple qu'un long discours. Mais cela reste pour lui des « *espèces de formules* ».

> *Pour mieux faire sentir à cet égard l'état de la question, et pour présenter aux yeux, sous un même coup d'œil, le résultat de ce qui se passe dans les dissolutions métalliques, j'ai construit des espèces de formules qu'on pourrait prendre d'abord pour des formules algébriques, mais qui n'ont point le même objet, et qui ne dérivent point des mêmes principes ; nous sommes encore bien loin de pouvoir porter dans la chimie la précision mathématique. (Lavoisier, 1862, p. 515)*

La symbolique alchimique ne lui convient pas mais il ne va pas pour autant utiliser les représentations d'Hassenfratz et Adet. Il considère sa nomenclature suffisamment explicite et simple pour porter ses théories. Les symboles n'apportent rien de plus. Il manque encore à ce stade une nouvelle théorie permettant d'élaborer une symbolique permettant de proposer la précision algébrique des mathématiques.

Annexes 17 : Dalton et Berzelius

Annexe 17.1 : L'explosion des lois empiriques au début du XIXe siècle

La qualité croissante des mesures quantitatives réalisées sur les masses ou sur les volumes au cours des combinaisons sont à l'origine, en à peine dix ans, de quatre lois empiriques. Elles vont être à l'origine des « *proportions chimiques* », ce que nous pourrions désigner par le premier modèle de la réaction chimique.

> *Quoi qu'on ne puisse pas désigner avec certitude quel fut le premier chimiste qui tenta de déterminer, par l'analyse d'un corps, la proportion de ses principes constituants, il est néanmoins suffisamment constaté que l'art de faire ces expériences avec précision, ne date que de la seconde moitié du siècle dernier ; et que c'est·à son perfectionnement que nous devons la théorie des proportions chimiques. (Berzelius, 1819, p. 2)*

17.1.1 Loi des nombres proportionnels (loi empirique)

Richter en 1792 introduit la notion de stœchiométrie et la loi des nombres proportionnels. Il réalise des observations entre les acides et les bases dans le cas de la formation des sels neutres. Wurtz (1869, p. 36‑37) explique, dans son *Histoire des doctrines chimiques*, que les quantités de différentes bases qui neutralisent 1000 grammes d'acide sulfurique sont proportionnelles aux quantités des mêmes bases qui neutralisent 1000 grammes d'acide nitrique. Les premières sont équivalentes entre elles, c'est-à-dire qu'elles peuvent se remplacer par rapport à un certain poids d'acide sulfurique. Il en est de même des secondes, qui peuvent se remplacer par rapport à un certain poids d'acide nitrique. Si le poids de l'acide ne change pas, le poids de chacune des bases demeure invariable. S'il augmente ou s'il diminue, le poids de chacune des bases augmente ou diminue dans la même proportion. Ainsi, à partir d'un poids donné d'un acide donné, on peut déterminer des poids qui s'équivalent pour les bases neutralisant l'acide. Il est donc possible d'attribuer à chaque élément un coefficient tel que, dans tout composé, le rapport des poids des éléments combinés soit égal au rapport de leurs coefficients ou à un multiple simple. Les rapports pondéraux suivant lesquels les acides se combinent aux oxydes sont donc absolument fixes. Richter et Wenzel vont répéter de très nombreuses mesures et dresser les tables de poids équivalents. Mais comme leur domaine d'étude est limité aux acides et aux bases réagissant pour former les sels

neutres, les tables ne sont valables que pour ce domaine. Pourtant leurs recherches sur la composition des sels vont être à la base des formules chimiques de la première moitié du XIXe siècle et à l'origine de tout un courant de pensée : les équivalentistes. Nous reviendrons sur cette interprétation des formules chimiques dans le deuxième chapitre de cette partie. Leurs travaux préparent la loi des proportions définies de Proust (Wurtz ,1869).

17.1.2 Loi des proportions définies (loi empirique)

Nous venons de voir qu'en ce début de XIXe siècle la différence entre mélange, dissolution et réaction chimique n'est pas encore établie mais que les chimistes commencent à observer des proportions fixes dans certaines combinaisons.

> *Il reste un problème intéressant à résoudre ; c'est à déterminer quelles sont les dispositions et les circonstances qui décident des proportions fixées dans certaines combinaisons pendant que d'autres se font en toutes proportions. (Berthollet, 1803, p. 334)*

Pour Berthollet, il y a identité complète entre dissolution chimique et réaction chimique. Une controverse va s'installer avec Proust de 1799 à 1806. La notion de corps pur est au centre du problème (Goupil, 1991). Berthollet confond corps pur et mélange comme il confond volontairement dissolution conduisant à un mélange et réaction conduisant à un corps pur. Il reconnaît expérimentalement des cas incontournables de combinaisons à proportions fixes et justifie l'arrêt à des proportions définies par l'existence de forces physiques. Mais au cours de la réaction chimique, c'est la composition même de la combinaison qui varie constamment. Pour Berthollet « *chaque composé est un mélange particulier, qui dépend de ses conditions de productions* » alors que pour Proust, « *les composés chimiques ont bel et bien une identité* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 99). Si le chimiste peut jouer sur les conditions de la réaction, il n'a aucune action sur les proportions dans les combinaisons chimiques qui assurent « *l'individualité des corps chimiques* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 100). Proust soutient contre Berthollet ces principes et introduit en 1802 la loi des proportions définies qui indiquent que les combinaisons chimiques ont une composition pondérale fixe dans laquelle les éléments se trouvent dans des proportions constantes d'un échantillon à l'autre. La loi sera par la suite définitivement établie par Berzelius en partant de mesures d'une très grande précision.

17.1.3 Loi des proportions volumétriques pour les gaz (loi empirique)

Gay-Lussac entreprend de nombreuses expériences sur la combinaison des gaz. Il commence par observer en 1802 que la dilatation d'un gaz est indépendante de la nature de celui-ci. Ces travaux l'amènent alors à conclure que les substances à l'état gazeux se combinent dans des rapports en volume entiers et très simples, comme 1, 2 et 3 (Figure 87). C'est la loi des proportions volumétriques.

> *Les combinaisons des substances gazeuses les unes avec les autres se font toujours dans les rapports les plus simples, et tels qu'en représentant l'un des termes par l'unité, l'autre est 1, 2 ou au plus 3. (Gay-Lussac, 1809, p. 207)*

Dans le cas de la formation de l'eau (Figure 87), 2 volumes d'hydrogène réagissent avec 1 volume d'oxygène pour donner deux volumes d'eau.

2 vol. d'hydrogène	+	1 vol. d'oxygène	forment	2 vol.	d'eau.
2 vol. de chlore	+	1 vol. —	—	2 vol.	d'anhydride hypochloreux.
2 vol. d'azote	+	1 vol. —	—	2 vol.	de protoxyde d'azote.
1 vol. —	+	1 vol. —	—	2 vol.	de bioxyde d'azote.
1 vol. de chlore	+	1 vol. d'hydrogène	—	2 vol.	d'acide chlorhydrique.
1 vol. d'azote	+	3 vol. —	—	2 vol.	d'ammoniaque.
1 vol. d'ox. de carb.	+	1 vol. de chlore	—	1 vol.	de gaz chloroxycarbonique.
1 vol. d'éthylène	+	1 vol. —	—	1 vol.	de chlorure d'éthylène.

Figure 87 Rapport volumétrique dans plusieurs combinaisons entre gaz (Wurtz, 1886, p. 71)

Avec la loi des combinaisons gazeuses, Gay-Lussac prolonge la démarche quantitative de Richter et Wenzel de la proportionnalité des poids à la proportionnalité des volumes gazeux (de Menten, 2013, p. 191). Il mène ses travaux en France parallèlement à ceux de Dalton en Angleterre. Ce dernier aboutit à un résultat similaire avec la loi des proportions multiples à partir des masses. Ils ne vont pourtant ni se comprendre, ni s'accorder. Dalton va prolonger son étude quantitative par une théorie explicative. Gay-Lussac va rester à un niveau empirique. Nous reviendrons sur leur différence dans le chapitre 2.

17.1.4 Loi des proportions multiples (loi empirique)

Lavoisier, Richter, Proust, Gay-Lussac observent tous l'existence de proportions définies dans les combinaisons chimiques. Dalton, en étudiant le gaz des marais (le méthane) et le gaz oléifiant (l'éthène), observe que le premier contient une proportion double de carbone au second. Il réitère cette observation avec l'oxygène entre l'oxyde de carbone et le gaz carbonique (de Menten, 2013, p. 193). Il en déduit en 1804 la loi des proportions multiples.

Lorsque deux éléments forment ensemble plusieurs composés, les diverses masses de l'un qui se combine à la même masse de l'autre, sont entre elles dans des rapports simples comme des nombres entiers. (Dalton citée par de Menten, 2013, p. 193)

Annexe 17.2 : Des formules s'appuyant sur des analyses quantitatives

La recherche des poids, équivalent ou atomique, est une des activités principales des chimistes pendant près de la moitié du XIXe siècle.

17.2.1 Les tables de poids

Berzelius commence ses travaux en 1808 et, dès 1815, il est en mesure de donner des tables de poids atomiques bien plus exactes que celles de ses devanciers. L'*Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence de l'électricité* en 1815 s'impose immédiatement. Berzelius compile sur plus de cent pages les poids des atomes[56] simples et composés. Il réalise lui-même les manipulations pour les mesures des poids des corps simples identifiés à l'époque. Il ne délègue à personne ces expérimentations.

> *Pour déterminer les poids relatifs des atomes, j'ai fait la plupart des expériences que je vais indiquer. Personne, j'espère, ne me blâmera d'avoir préféré les résultats de mes propres expériences à ceux des autres. (Berzelius, 1835, p. 94)*

Ses tables des poids vont servir de référence à la communauté internationale pendant au moins 30 ans. Il corrige les poids atomiques proposés par ses congénères, notamment ceux de Dalton. Il réalise sur plus de 2000 substances des expériences permettant de déterminer leur composition exacte et leur poids (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 157). Il remet sans cesse à jour les tables. Dans son traité de 1835, c'est plus de 350 pages de tableaux (Figure 88) consacrées aux poids des principaux corps composés et si toutes ses tables s'imposent dès la sortie de son premier essai en 1815, cela tient très certainement en partie à sa nouvelle écriture (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 156).

NOMS DES SUBSTANCES.	FORMULES.	POIDS DE L'ATOME.		CONTIENT POUR CENT.		
		O = 100.	H = 1.	Base.	Acide.	Ḣ
Acétal (acétate tri-éthéreux)	$C^8H^{12}O^2$	1023,81	72,04	C = 59,73	O 29,30	H = 10,97
Acétate aluminique	$\dddot{Al}\,\dot{A}^3$	2571,90	206,09	24,97	75,03	

Figure 88 Extrait de la table synoptique des poids atomiques (Berzelius, 1835, p. 124)

[56] Le terme « atome » signifie pour les chimistes de l'époque aussi bien atome que molécule.

Dans tous ses tableaux, la première colonne (Figure 88) indique le nom des substances, d'après la nomenclature employée dans le Traité, et la seconde colonne (Figure 88) la formule qui sert de base au calcul. Les troisième et quatrième colonnes (Figure 88) indiquent le poids atomique comparé respectivement à celui de l'oxygène pris égal à 100 puis à celui de l'atome double d'hydrogène (H barré) pris pour unité. Enfin, les cinquième, sixième et septième colonnes (Figure 88) donnent le radical respectivement de la base ou de l'acide ou de l'eau d'une combinaison déterminée en parties centésimales. Le radical, issu de la chimie minérale, est ce qui doit être combiné à l'oxygène pour former l'oxyde ou l'acide. Berzelius l'adapte également à la chimie organique où chaque produit « *peut être considéré comme divisible en oxygène et en un radical composé* » (Berzelius, 1819, p. 98). Les poids sont mesurés de proches en proches à partir des formules. En changer une, revient à changer l'ensemble des poids. Déterminer les « bonnes » formules chimiques devient un enjeu pour les chimistes pendant toute la première partie du XIXe siècle. Des désaccords vont apparaître entre Dalton et Berzelius, notamment autour de la formule de l'eau ainsi que sur le choix de la référence des poids. Pour tout ce travail, Berzelius s'appuie sur un réseau de lois dont deux nouvelles : la loi des chaleurs spécifiques de Dulong et Petit et la loi de l'isomorphisme de Mitscherlich. Celles-ci seront par ailleurs utilisées aussi bien par les atomistes que par les équivalentistes dans toutes les recherches de poids.

17.2.2 Deux nouvelles lois

17.2.2.1 Loi des chaleurs spécifiques[57]

Dulong et Petit montrent que la chaleur spécifique des corps simples à l'état solide est en raison inverse de leur poids atomique. Si l'on multiplie ces deux quantités l'une par l'autre, on obtient un produit constant. Le résultat plutôt inattendu est pris par les atomistes « *comme une confirmation éclatante de l'hypothèse des atomes* » (Wurtz, 1864, p. 24). Berzelius utilise cette loi pour déterminer les poids des métaux. Il indique dans la *Théorie des proportions chimiq*ues que les différences obtenues dans la dernière colonne du tableau ci-dessous (Figure 89) sont trop faibles « *pour ne pas pouvoir regarder comme constant le rapport entre la chaleur spécifique et le poids des atomes* » (Berzelius, 1835, p. 82).

[57] Ou capacité thermique massique pour le terme actuel.

Corps simples.	Chaleur spécifique.	Poids des atomes.	Produits du poids de chaque atome par la capacité correspondante.
Soufre.	0,1880	201,15	0,3790
Or.	0,0298	1243,0	0,3704
Platine	0,0314	1215,2	0,3816
Étain.	0,0514	735,3	0,3779
Cuivre.	0,0949	395,7	0,3755
Plomb.	0,0293	1294,5	0,3793
Zinc.	0,0927	403,2	0,3738
Nickel	0,1035	369,7	0,3826
Fer.	0,1100	339,2	0,3731

Figure 89 Berzelius présentant les résultats obtenus par Dulong et Petit (Berzelius, 1835, p. 81 -82)

17.2.2.2 Loi de l'isomorphisme

Mitscherlich énonce en 1819 la loi de l'isomorphisme indiquant que deux corps isomorphes[58] possèdent une structure atomique semblable. Leur composition est donc exprimée par des formules analogues. Wurtz dans ses *Leçons de philosophie chimique* (1864) décrit les applications de cette loi pour la détermination atomique des formules. Il montre ainsi que l'oxyde d'aluminium ainsi que l'oxyde ferrique doivent renfermer deux atomes respectivement d'aluminium et de fer et trois atomes d'oxygène.

> *Tel est le secours que la loi de l'isomorphisme prête à la construction des formules et à la fixation des poids atomiques. (Wurtz, 1864, p. 26)*

17.2.3 Un réseau de lois pour déterminer les poids

Berzelius utilise un réseau de lois pour établir les poids atomiques. En plus des deux précédentes et de la loi des proportions fixes et multiples, et à la différence de Dalton, il se réfère également aux travaux de Gay-Lussac. Il admet que les gaz des corps simples contiennent le même nombre d'atomes sous le même volume, à pression et température constante (Berzelius, 1835, p. 28). Il reprend en cela l'hypothèse d'Avogadro et d'Ampère, mais sans les citer. Dans ce cas, poids et densité[59] sont proportionnels. Déterminer la densité des gaz permet alors d'obtenir leur poids relatif. Il pose comme référence le poids de l'oxygène à 100. Partant des nombreuses combinaisons que les corps simples forment avec l'oxygène et en utilisant l'ensemble des lois à sa disposition, il établit de proche en proche l'ensemble des

[58] « On appelle corps isomorphe, les corps ou les combinaisons qui sont capables de se substituer réciproquement dans une combinaison, sans que la forme en soit changée. »(Louyet, 1841, p. 10)

[59] Berzelius pour mesurer les densités prend comme référence l'air pour les gaz et l'eau pour les liquides et solides. Quand il compare deux densités, il compare les poids pour un même volume de chaque espèce.

poids des simples et des corps composés connus de la chimie minérale. Ainsi pour déterminer le poids du carbone, il compare les densités du gaz oxygène et du gaz carbonique. Il en déduit alors le pourcentage en poids de l'oxygène dans le gaz carbonique. Ayant déterminé à l'aide des lois volumétriques de Gay-Lussac la formule du dioxyde de carbone (deux atomes d'oxygène et un atome de carbone), il peut en déduire le poids de l'atome de carbone (Figure 90). Berzelius décrit toute la méthode dans ses essais (Figure 91).

ELEMENT	POIDS ATOMIQUE		
	D'après Berzélius (1818)	D'après Berzélius (1826)	Valeur adoptée aujourd'hui
Carbone	12,12	12,24	12,01
Soufre	32,3	32,24	32,06
Plomb	416	207,4	207,21
Mercure	406	202,8	200,61
Cuivre	129	63,4	63,57
Fer	109,1	54,4	55,84
Sodium	93,5	46,6	22,997
Potassium	157,6	78,5	39,096
Argent	433,7	216,6	107,880

Figure 90 Tableau de quelques poids atomiques proposés par Berzelius (Massain, 1966, p. 166)

Massain, (1966, p. 166) compare dans le tableau ci-dessus (Figure 90) les poids atomiques obtenus par Berzelius entre 1818 et 1826 avec les valeurs d'aujourd'hui. Les écarts sont inférieurs à 2%[60]. Berzelius atteint un degré de précision que personne n'avait réussi à atteindre jusque-là. Il est « *le créateur des méthodes analytiques modernes* » (Wurtz, 1864, p. 19).

[60] Certaines valeurs de Berzelius sont doublées par rapport aux valeurs actuelles. Cela provient de la confusion entre atomes et molécules dans le cas des corps simples.

8. *Carbone* (C). Lorsque le gaz oxigène prend ce qu'il lui faut de carbone pour se convertir en gaz oxide de carbone, son volume en est justement doublé; et jusqu'ici l'expérience ayant prouvé que les corps gazeux, en se combinant, conservent leur volume ou se condensent, mais que jamais, dans ce cas, ils ne se dilatent, l'augmentation de volume qui a lieu ici ne peut pas être attribuée à la dilatation du gaz oxigène; elle doit provenir de l'addition d'un volume de carbone, et, par conséquent, cette combinaison consiste dans un volume ou atome de chaque élément. Cependant l'oxide de carbone pourrait aussi contenir deux atomes de carbone sur un d'oxigène, dans le cas où ces deux gaz, en se combinant, se fussent condensés d'une quantité égale au demi-volume du carbone. C'est ainsi que, par exemple, un volume de gaz oxigène qui se combine avec deux volumes d'hydrogène, produit deux volumes de vapeur d'eau, tandis que la combinaison se condense d'un volume d'hydrogène. Puisque l'oxide de carbone prend la moitié de son volume de gaz oxigène pour passer au degré suivant d'oxidation, l'acide carbonique, il faut que ce dernier soit composé d'un atome de carbone et de deux d'oxigène. En examinant les carbonates, on trouve que l'acide carbonique contient deux fois autant d'oxigène que la base qui le neutralise, et que dans les sels avec excès d'acide, il en contient quatre fois autant. Plusieurs chimistes calculent différemment le poids de l'atome de carbone; mais les raisons que je viens de rapporter me paraissent plus probables qu'aucune autre. MM. Biot et Arrago, ainsi que de Saussure, ont cherché à déterminer la composition de l'acide carbonique, par la pesanteur spécifique du gaz oxigène et de l'acide carbonique. MM. Biot et Arrago ont trouvé que la pesanteur spécifique du gaz oxigène est de 1,10359, et celle du gaz acide carbonique de 1,51961; d'où il résulte que l'acide carbonique contient 72,623 pour 100 d'oxigène; et s'il y entre deux atomes d'oxigène par atome de carbone, ce dernier pesera 75,33. D'après M. de Saussure, la pesanteur spécifique du gaz oxigène est 1,1040, et celui du gaz acide carbonique 1,5269; ce qui donnerait 72,3 pour 100 d'oxigène dans l'acide carbonique. M. de Saussure trouva, par la combustion du graphite dans le gaz oxigène, que l'acide carbonique contient 72,54 pour 100 d'oxigène; et si l'on calcule la composition de l'acide carbonique d'après celle du carbonate de plomb, la quantité d'oxigène sera de 72,68. Dans les tables suivantes, je me suis servi des résultats trouvés par MM. Biot et Arragó, parce qu'ils correspondent mieux avec les analyses des carbonates.

Figure 91 Description du calcul du poids de l'atome de carbone (Berzelius, 1819, p. 126 -128)

Annexes 18 : Les organiciens

Annexe 18.1 La théorie des radicaux ou une vision dualistique en chimie organique

Les organiciens, dont notamment Dumas et Liebig, cherchent à identifier dans les substances organiques les radicaux comme point commun entre différentes espèces chimiques. Pour Liebig, il s'agit d'utiliser *« la théorie des radicaux comme moyen de classification des corps »* (Dumon & Luft, 2008, p. 31). Lui et Wöhler identifient à partir des formules élémentaires révélées par l'analyse des invariants.

> *De même qu'il existe des familles de mots (comme « sable, sabler, sablonneux, ensabler... »), il existe des familles de molécules. (Laszlo, 2017)*

Le radical représente alors un groupe d'atomes qui a la propriété de ne pas se réarranger au cours des réactions chimiques et de former des composés avec des éléments différents (Scheidecker-Chevallier, 2000, p. 149). En 1932, Liebig et Wöhler travaillent sur les composés benzoïques et posent l'existence d'un radical commun : le benzoyle. En 1833 à partir des formules de l'alcool éthylique, de l'éther et du chlorure d'éthyle, respectivement C_2H_5OH, C_2H_5O, C_2H_5Cl, Liebig octroie au groupement C_2H_5 une certaine individualité (Massain, 1966, p. 189). Il lui donne le nom de radical éthyle. Ainsi, le même radical apparaît dans les molécules de formule C_7H_5O-H, C_7H_5O-OH, C_7H_5O-Cl, C_7H_5O-NH_2[61]. L'entité commune C_7H_5O est appelée « radical benzoyle ». Dumas et Liebig concluent en 1837 à l'unité de la chimie : les radicaux, simples en chimie minérale, sont composés en chimie organique. L'année suivante, Dumas identifie le radical méthyle. Mais il abandonne assez vite cette théorie. Il commence avec ses élèves, Laurent et Gerhardt, à partir de 1833 des travaux sur la réaction du chlore avec les composés organiques. Cela va amener l'abandon de la théorie dualistique pour faire place à la théorie des substitutions (Dumon & Luft, 2008, p. 31).

[61] Notation moderne

Annexe 18.2 La théorie des substitutions pour remplacer la vision dualistique

En 1834, Dumas énonce une théorie des substitutions basée sur des règles empiriques dans lesquelles il indique notamment qu'un composé soumis à l'action des halogènes perd un hydrogène et gagne un atome de chlore, de brome ou d'iode, voire d'oxygène. Mais Dumas n'ose pas remettre en cause la théorie dualistique, ce qui ne va pas être le cas de Laurent qui va s'opposer ouvertement à Berzelius. Laurent raisonne comme un cristallographe et se pose les mêmes questions qu'eux, notamment Haüy (1743-1822). Celui-ci caractérise « *chaque espèce minérale par une forme polyédrique fixe* » et « *postule une corrélation entre les propriétés macroscopiques d'une substance et ses propriétés microscopiques* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 168). La molécule est considérée comme une unité structurale subdivisée en unités plus élémentaires. Laurent s'appuie sur cette approche et introduit sa théorie des noyaux. Il raisonne en termes d'arrangement spatial des atomes pour constituer la molécule. Un composé n'est plus alors une simple juxtaposition mais « *un édifice unitaire dessiné par* substitutions *progressives à partir d'un module de base, une forme primitive* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 174). Son noyau est constitué de carbone sur les angles et des atomes d'hydrogène sur les arêtes (Figure 92). Les noyaux peuvent accepter sur les faces des paires d'atomes (hydrogène, halogène, …) (Dumon & Luft, 2008, p. 33).

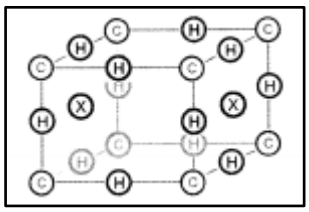


Figure 92 Représentation du noyau C8H12 selon Laurent (Dumon & Luft, 2008, p. 33)

Chaque atome d'hydrogène sur une arête est susceptible d'être remplacé par substitution. Le remplacement dans le noyau d'un hydrogène par un chlore ne change pas fondamentalement les propriétés de celui-ci. Les composés organiques ne peuvent plus dès lors être considérés comme les produits de l'interaction de deux radicaux au comportement électrique opposé, ce qui est parfaitement impossible dans la vision dualistique de Berzelius où l'hydrogène électropositif ne peut pas être remplacé par le chlore électronégatif. Enfin la molécule représente la plus petite quantité d'un corps simple qui peut être employée pour effectuer une réaction chimique. Le corps simple peut aussi être constitué d'un arrangement spatial d'atomes. Laurent pressent un autre lien entre les atomes, ou groupements d'atomes, que

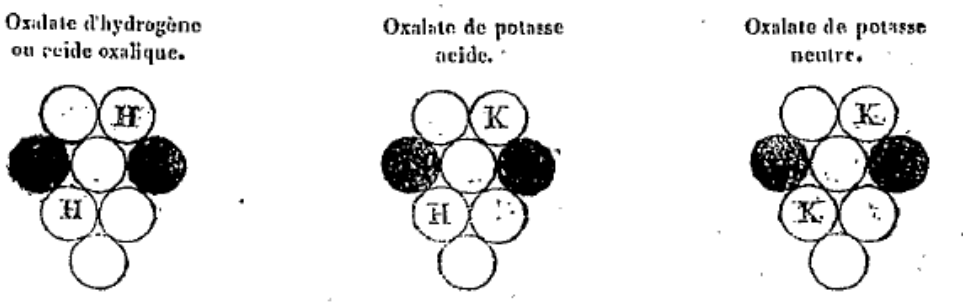
l'ionique. Ainsi la molécule de corps simple peut être constituée d'un assemblage du même atome, ce qui est absolument impensable en termes de forces électrostatiques. Il complète alors les propositions de Dumas en indiquant que l'hydrogène, éliminé et remplacé par l'atome de chlore dans la molécule organique, va former simultanément de l'acide chlorhydrique. On a alors une double combinaison dont une avec le corps simple chlore qui doit nécessairement être formé d'au moins deux atomes de chlore.

> *Les idées de Laurent s'opposent résolument à celles de Berzelius, en ce qui concerne la structure des composés de la chimie organique, représentés jusqu'alors selon les concepts de la théorie dualistique. (Dumon & Luft, 2008, p. 34)*

Berzelius et Liebig vont s'en prendre assez violemment à la théorie de Laurent. Lâché dans un premier temps par Dumas, celui-ci rejoint finalement son élève en travaillant en 1839 sur la réaction entre l'acide acétique et le chlore. L'acide trichloracétique est pour Dumas la preuve que certains éléments d'une substance peuvent bien être substitués par d'autres sans pour cela bouleverser tout l'édifice (Massain, 1966, p. 172). L'obtention de ce dernier peut s'interpréter comme la substitution d'un hydrogène par un chlore sans que cela ne change fondamentalement les propriétés de la substance initiale. En admettant ainsi que l'acide trichloracétique a une formule proche de celui de l'acide acétique, il conclut qu'une combinaison dépend moins de la nature des atomes qu'elle renferme que de leur groupement et de leur position dans la molécule (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993). Il rassemble alors dans le même type les corps qui renferment les mêmes groupements d'atomes équivalents et qui possèdent les mêmes propriétés fondamentales en « *délaissant l'imagerie du « noyau » de Laurent* » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 171). Gerhardt reprend les idées de Laurent et de Dumas. Il se montre critique vis-à-vis des radicaux de Liebig et de l'insuffisance de cette théorie. Il considère que les formules de Liebig doivent être rectifiées (Blondel-Mégrelis, 2008). Les composés ne doivent plus être pensés avec une vision binaire mais comme un tout où même un atome électronégatif peut venir remplacer un atome électropositif.

> *Depuis quelques années, les idées anti-binaires ont trouvé beaucoup de partisans en France, surtout parmi les chimistes qui s'occupent spécialement de recherches organiques. Ces chimistes considèrent les combinaisons comme un tout, comme un assemblage de molécules dans lequel une ou plusieurs molécules peuvent être échangées contre d'autres Sans que la nature chimique du système entier en soit changée. Ainsi, par exemple, les*

oxalates représentent un groupe moléculaire que l'on peut figurer graphiquement de la manière suivante (1)



(1) Les molécules noires représentent le carbone, les blanches l'oxygène ; K et H expriment le potassium et l'hydrogène. »(Gerhardt, 1844, p. 12)

Pour Gerhardt, il s'agit de la preuve d'une nouvelle théorie, celle des substitutions ou métalepsie.

Ces remplacements d'un corps par un autre sans que l'édifice moléculaire change de face, sont plus particulièrement connus sous le nom de phénomènes de substitution ou de métalepsie. (Gerhardt, 1844, p. 13)

Il expose à l'Académie des Sciences en 1852 son mémoire sur les acides organiques anhydres et montre que les acides hydratés ne sont pas la simple addition d'acides anhydre et d'eau mais que leur déshydratation correspond à une opération de double décomposition (Blondel-Mégrelis, 2008, p. 53). Il définit ainsi les radicaux :

J'appelle radicaux ou résidus les éléments de tout corps qui peuvent être ainsi transportés dans un autre corps par l'effet d'une double décomposition. […] Je distingue donc le radical hydrogène du gaz hydrogène, le radical chlore du chlore libre ; bien mieux, si l'on veut représenter par des formules rationnelles l'hydrogène ou le chlore libres, l'étude des réactions conduit à écrire le gaz hydrogène par les deux radicaux HH et le gaz chlore par les deux radicaux ClCl. Dans la nomenclature usuelle, le gaz hydrogène serait donc l'hydrure d'hydrogène, et le gaz chlore serait le chlorure de chlore ; cela veut dire que le gaz chlore et le gaz hydrogène résultent de doubles décompositions, ou peuvent donner lieu à de doubles décompositions. (Gerhardt, 1854, p. 568)

Et il illustre alors la double décomposition :

Si l'on traite, par exemple, le gaz chlore par de la potasse, on obtient du chlorure de potassium et de l'hypochlorite de potasse, par l'effet d'une double décomposition

$$\begin{array}{l} \quad Cl,Cl \quad + \quad O\left\{\begin{array}{l}K\\K\end{array}\right. \\ = Cl,K \quad + \quad O\left\{\begin{array}{l}Cl\\K\end{array}\right. \end{array}$$

Il est donc bien entendu qu'en parlant d'un radical je ne désigne aucun corps sous la forme et avec les propriétés qu'il aurait à l'état isolé ; mais je distingue simplement le rapport suivant lequel se substituent ou se transportent d'un corps à l'autre, dans la double décomposition certains éléments ou groupes d'éléments. (Gerhardt, 1854, p. 569)

Le *Traité de chimie organique* de Gerhardt marque le départ de la discipline au sens moderne. En cette moitié de siècle, la chimie organique a amené une nouvelle vision de la chimie. Pour les professeurs, ces nouvelles questions fondamentales sur la nature des combinaisons chimiques (soit l'addition de deux éléments ou de radicaux unis par des charges électriques, soit la substitution d'atomes sur la base d'un noyau pour Laurent ou d'un type pour Dumas ou Gerhardt) doivent pouvoir se traduire en termes concrets et quotidiens : comment nommer, écrire et classer les composés et comment mettre de l'ordre dans tous ces faits observés ? (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 173-174). Il est à nouveau nécessaire, comme à l'époque de Lavoisier, de guider l'étudiant dans ce labyrinthe. De nouvelles formules rationnelles et un principe structurant deviennent à nouveau nécessaires. La réflexion sur l'arrangement des atomes au sein de la molécule est lancée par Laurent. Le temps est venu pour que cette question irradie toute la communauté des chimistes.

Annexe 18.3 La théorie des types

En chimie minérale, on part de corps simples plutôt en nombre élevé pour aller vers la composition des corps composés. La chimie organique se décline essentiellement à partir d'un tout petit nombre de corps simples (C, H, O et N[62]) mais vers une multitude de corps composés (Dumon & Luft, 2008, p. 38). Les organiciens proposent alors un nouveau classement : la théorie des types. Des catégories sont créées en partant des types de réaction que peuvent subir les composés organiques. La première méthode est proposée par Dumas en 1840 dans le prolongement de la théorie des substitutions. L'idée principale est celle « *d'un arrangement moléculaire invariant, responsable de la permanence des propriétés, et conduisant à des types* » (Dumon & Luft, 2008, p. 43). La théorie est ensuite reprise par Laurent et généralisée par Gerhardt en 1853 (de Menten, 2013, p. 294). Ce dernier part des travaux d'Hofmann à propos des amines et de ceux de Williamson pour les composés oxygénés. Williamson considère tous les composés dérivés par substitutions progressives d'un type fondamental : l'eau. Il propose une nouvelle écriture de radicaux à partir de l'eau (Figure 93).

Type eau	*Radical alcool*	*Radical éther*
$\left.\begin{matrix}H\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}C_2H_5\\H\end{matrix}\right\}O$	$\left.\begin{matrix}C_2H_5\\C_2H_5\end{matrix}\right\}O$

Figure 93 Le type eau de Williamson (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 174)

Gerhardt affirme la nécessité de mettre de l'ordre dans la chimie organique en s'appuyant tout autant sur la composition des corps que sur leurs propriétés. Il introduit la notion de type.

> *Le type est donc l'unité de comparaison pour tous les corps qui, comme lui, sont susceptibles d'échanges semblables ou résultent d'échanges semblables. Comme toute double décomposition n'est en définitive que l'interprétation en langage chimique d'une équation renfermant quatre termes, on peut dire qu'un type est le terme constant auquel équivaut un corps dans une série de semblables équations. (Gerhardt, 1854, p. 588)*

Pour faire partie du type eau, le composé doit pouvoir échanger une partie de sa constitution (un radical ou un arrangement d'atomes) contre un radical hydrogène ou l'oxygène de l'eau.

[62] Ces notations correspondent au corps simple de la première moitié du XIXe siècle.

L'alcool fait partie du type eau et peut s'écrire : H-O-$\mathbf{C_2H_5}$. Le groupe éthyle remplace un hydrogène dans la molécule d'eau H-O-**H**.

> *Pour dériver un corps du type eau, il faut connaître au moins une réaction dans laquelle ce corps se transforme par double décomposition, ou dans laquelle il se produit par double décomposition. On trouve ainsi quels sont les radicaux de ce corps, susceptibles d'être transportés, dans ces échanges, à la place du radical hydrogène ou du radical oxygène de l'eau. (Gerhardt, 1854, p. 588)*

Il complète la proposition de Williamson qu'il trouve trop limitée avec le seul type eau. Il utilise quatre types : l'eau, l'acide chlorhydrique, l'ammoniaque et l'hydrogène (Figure 94).

Ces *quatre formules-types* se notent de la manière suivante :

Eau.	OH^2,	volumes égaux.
Acide chlorhydrique. . . .	ClH,	
Ammoniaque.	NH^3,	
Hydrogène.	HH,	

Figure 94 Les types de Gerhardt (Gerhardt, 1854, p. 588)

Les formules typiques sont pour Gerhardt des outils permettant d'exprimer et d'interpréter dans les réactions les phénomènes de métamorphose (Dumon & Cokelez, 2006, p. 53). En aucun cas elles ne sont censées représenter une réalité, voire une hypothèse. Gerhardt, équivalentiste convaincu, se refuse à proposer des notations qui pourraient laisser imaginer un quelconque arrangement des atomes.

> *[…] les uns et les autres attribuent à la langue des formules un sens qu'elle ne saurait avoir, celui d'exprimer l'arrangement moléculaire. (Gerhardt, 1854, p. 563 - 566)*

Ces formules sont basées sur les seules réactions de substitution. La notation des types ne permet donc ni de représenter les réactions d'addition ni d'interroger l'arrangement des atomes au sein de la molécule mais va pourtant amener les chimistes à s'interroger plus finement sur les associations que peuvent faire les atomes. La question de l'arrangement des atomes va alors occuper tous les chimistes atomistes au milieu de ce siècle. De nouvelles formules vont s'avérer nécessaires pour illustrer et interroger ce point.

Annexes 19 : Les équivalentistes

Annexe 19.1 Table des équivalents chimiques des corps simples (Regnault, 1850)

Table des équivalents chimiques des corps simples.

		Par rapport à l'oxygène = 100.	Par rapport à l'hydrogène = 1.
Oxygène	O	100,0	8,00.
Hydrogène	H	12,5	1,00.
Azote	Az	175,0	14,00.
Soufre	S	200,0	16,00.
Sélénium	Se	491,0	39,28.
Tellure	Te	806,5	64,52.
Chlore	Cl	443,2	35,45.
Brôme	Br	978,3	78,26.
Iode	Io	1578,2	125,33.
Fluor	Fl	239,8	19,18.
Phosphore	Ph	400,0	32,00.
Arsenic	As	937,5	75,00.
Bore	Bo	136,2	10,88.
Silicium	Si	266,7	21,35.
Carbone	C	75,0	6,00.
Potassium	K	490,0	39,20.
Sodium	Na	287,2	22,98.
Lithium	Li	80,4	6,43.
Baryum	Ba	858,4	68,67.
Strontium	Sr	548,0	43,84.
Calcium	Ca	250,0	20,00.
Magnésium	Mg	151,3	12,10.
Aluminium	Al	171,0	13,68.
Glucinium	Gl	87,1	6,97.
Zirconium	Zr	420,0	33,60.
Thorium	Th	743,9	59,51.
Yttrium	Yt	402,3	32,20.
Erbium	Er	»	»
Terbium	Tr	»	»
Cérium	Ce	590,8	47,26.
Lanthane	La	588,0	47,04.
Didyme	Di	620,0	49,60.
Manganèse	Mn	344,7	27,57.
Fer	Fe	350,0	28,00.
Chrôme	Cr	328,0	26,24
Cobalt	Co	369,0	29,52.
Nickel	Ni	369,7	29,57.
Zinc	Zn	406,6	32,53.
Cadmium	Cd	696,8	55,74.
Etain	Sn	735,3	58,82.
Titane	Ti	314,7	25,17.
Plomb	Pb	1294,5	103,56.
Bismuth	Bi	1330,0	106,40.
Antimoine	Sb	806,5	64,52.
Uranium	U	750,0	60,00.
Tungstène	W	1150,0	92,00.
Molybdène	Mo	589,0	47,12.
Vanadium	Vd	855,8	68,46.
Cuivre	Cu	395,6	31,65.
Mercure	Hg	1250,0	100,00.
Argent	Ag	1350,0	108,00.
Or	Au	1227,8	98,22.
Platine	Pt	1232,0	98,56.
Osmium	Os	1244,2	99,53.
Iridium	Ir	1233,2	98,66.
Palladium	Pd	665,2	53,22.
Rhodium	Rh	652,1	52,17.
Ruthénium	Ru	646,0	51,68.

Annexe 19.2 Méthode pour déterminer les équivalents (Pelouze & Fremy, 1854, p. 37)

Avant de passer à la détermination numérique des équivalents des principaux corps simples, nous résumerons pour plus de clarté en quelques propositions séparées, les généralités qui viennent d'être exposées sur la théorie des équivalents.

I. Par les expériences de Wenzel, de Richter, de Dalton, de Wollaston et de Gay-Lussac, il a été démontré que les corps ne se combinent pas entre eux en toutes proportions, mais que les combinaisons chimiques ont lieu entre des masses constantes qui s'ajoutent les unes aux autres, dans des proportions toujours simples, et qui peuvent se remplacer mutuellement dans les divers composés. On a donné le nom d'équivalents, ou nombres proportionnels, aux quantités pondérales des différents corps qui se substituent les unes aux autres dans les combinaisons. '

ll. L'équivalent de l'oxygène ayant été arbitrairement représenté par le nombre 100, on appelle équivalent d'un corps la quantité pondérale de ce corps qui peut remplacer 100 d'oxygène dans les combinaisons.

Ill. L'équivalent d'un corps simple se déterminerait facilement si ce corps ne se combinait avec l'oxygène qu'en une seule proportion ; il suffirait de faire l'analyse de cette combinaison et de fixer par une simple proportion la quantité du corps qui se combine avec 100 d'oxygène. Mais les corps simples forment généralement plusieurs composés oxygénés. Les équivalents se déduisent alors le plus souvent du premier degré de combinaison avec l'oxygène ou de la combinaison qui présente le plus de fixité.

IV. La première combinaison d'un corps avec l'oxygène n'est pas toujours connue : ainsi pour l'aluminium, l'oxyde AlO n'a pas encore été obtenu ; on ne connaît jusqu'à présent que Al^2O^3 Il faut donc déterminer d'abord la formule des composés qui peuvent servir à fixer les équivalents. - On est guidé dans le choix de ces formules par la loi de l'isomorphisme et l'analogie existant entre certains corps simples qui doit se retrouver dans leurs combinaisons. -

V. Les composés oxygénés ne servent pas seuls à fixer les équivalents. On comprend que les équivalents du chlore, de l'hydrogène, du soufre, etc., une fois déterminés, pourront servir à fixer ceux des autres corps. –

Annexe 19.3 Recherche de la formule de l'acide benzoïque par un équivalentiste (Louyet, 1841, p. 93)

Recherche du nombre des équivalents des principes constituants de l'acide benzoïque (acide végétal). L'équivalent de cet acide est 1433,78 ; il contient sur 100 p. 74,7, carbone, 4,3 hydrogène et 21 oxygène;

100 d'acide contenant 74,7 carbone, 1433,78 renfermeront 1071,21 carbone;

100 d'acide, contenant 4,3 hydrogène, 1433,78 renfermeront 62,5 hydrogène;

100 d'acide, contenant 21,0 oxygène, 1433,78 renfermeront 300,0 oxygène.

Le nombre 1071,21 exprime la somme des équivalents de carbone; divisé par 76,4, ou 1 équivalent de carbone, on obtient 14 équivalents de carbone. En divisant 62,5 par le poids d'un équivalent d'hydrogène, ou 12,47, on a 5 équivalents d'hydrogène. Le nombre 300 divisé par 100 ou 1 équivalent oxygène, donne 3 équivalents d'oxygène. 1 équiv. d'acide benzoïque = 1433,78 se compose donc de:

14 équiv. de carbone. .	14 × 76,4
5 équiv. d'hydrogène. .	5 × 12,5
3 équiv. d'oxygène. .	3 × 100,0

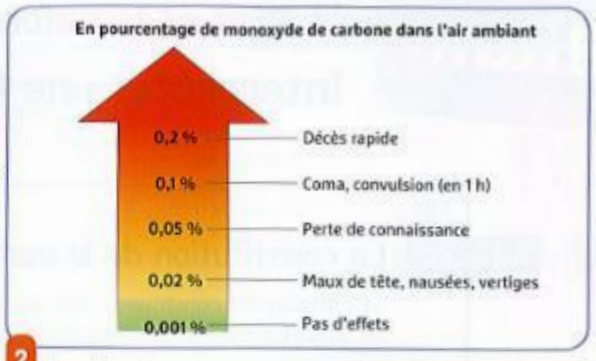
Annexes de 20 à 29 : Partie 4

Annexe 20 : Une proposition de séquence avec les gaz

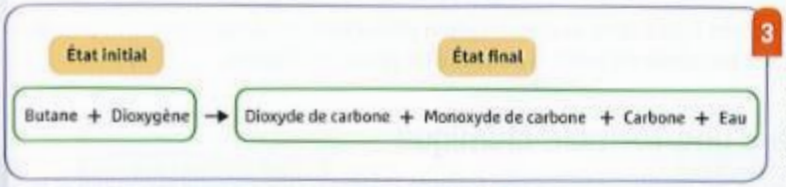
$$2\ C_4H_{10} + 13\ O_2 \longrightarrow 10\ H_2O + 8\ CO_2$$

- Si on prépare dans un récipient un mélange gazeux constitué de 2 volumes de gaz butane et de 13 volumes de dioxygène, alors ce mélange donnera lieu, en présence d'une flamme, à une combustion complète explosive.
- En revanche, si le mélange des réactifs s'effectue au fur et à mesure dans les mêmes proportions la combustion complète est non explosive (voir page 269).

1 **Équation de réaction modélisant la combustion complète du butane.**



2 **Les effets du monoxyde de carbone.** Incolore, inodore et non irritant, donc indécelable, le monoxyde de carbone empêche le transport du dioxygène dans l'organisme par le sang.



3 **Combustion incomplète du butane.** Lorsque le dioxygène de l'air est en quantité insuffisante, il y a combustion incomplète du butane. Il se forme de l'eau, du dioxyde de carbone, des fumées noires de carbone et un gaz, le monoxyde de carbone.

J'expérimente

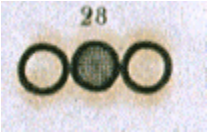
1. Préparer un mélange constitué de 2 mL de gaz butane et de 13 mL de dioxygène. Les gaz sont récupérés par déplacement d'eau dans une éprouvette graduée.
2. À l'aide d'une seringue munie d'un tuyau, aspirer le mélange gazeux. En injecter dans une cuvette d'eau additionnée de quelques gouttes de produit vaisselle et observer des bulles se former en surface.
3. Sous le contrôle du professeur, approcher une bûchette enflammée d'une bulle.

– En cas de sensibilité auditive, s'éloigner de la zone d'expérience.
– Le port de la blouse et de lunettes de protection est obligatoire. Attacher les cheveux longs.

4 **Réalisation d'une combustion explosive de butane.**

Annexes 21 : Les extraits de texte historique du scénario 1

Annexe 21.1 : Première étape : introduction du modèle des atomes et choix des symboles pour le modèle atomique et première écriture d'équation chimique.

Textes historiques et questions possibles	**Remarques**
-1. introduire le modèle de l'atome **Extrait de Berzelius sur le modèle atomique de Dalton (texte transformé) :** *« D'après le système de Dalton, les corps sont composés d'atomes ; et un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre élément mais non avec des fractions d'atomes. De même, un atome d'un corps composé peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre corps, composé. »*	Ce premier texte est une entrée possible pour proposer aux élèves le modèle de Dalton pour l'atome
-2. Introduire les symboles des atomes et formule des molécules **Extrait d'un texte de Dalton sur le dioxyde de carbone (texte transformé) :** *« De l'application de ces règles, nous pouvons tirer les conclusions suivantes que l'oxyde carbonique est un composé binaire, formé d'un atome de carbone et d'un oxygène ; que le gaz carbonique est un composé ternaire formé d'un atome de carbone, et de deux d'oxygène. »* **Question :** Parmi les exemples de symboles proposés ci-dessous, lesquels choisiriez-vous pour représenter les compositions de l'oxyde carbonique et du gaz carbonique proposé par Dalton ? Expliquez votre choix. *Symboles proposés par Hassenfratz et Adet (1787)* Gaz carbone oxygène *Symboles proposés par Dalton (1808):*  Gaz carbone oxygène	Les élèves doivent faire le choix entre plusieurs symboles pour écrire les formules. Nous proposons de travailler à partir du dioxyde de carbone car ils connaissent déjà tous cette formule.

À partir de la proposition de Berzelius ci-dessous, donner la formule du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone). *Proposition de Berzelius (texte transformé) (1819)* *« Méthode de compter le nombre relatif des atomes dans les combinaisons chimiques, et d'exprimer par des signes leur composition en qualité et en quantité. »* *Lorsque nous essayons d'exprimer les proportions chimiques, nous trouvons qu'il est nécessaire d'avoir des signes chimiques. On en a employé depuis longtemps quoiqu'ils aient été jusqu'à présent de peu d'utilité. À l'époque de l'alchimie des signes furent créés par le besoin de s'exprimer d'une manière mystique et incompréhensible pour le vulgaire. La chimie antiphlogistique (Hassenfratz et Adet) voulut leur en substituer d'autres, fondés sur le même principe scientifique que les nouveaux noms chimiques : le signe devait indiquer les parties constituantes d'un corps composé.* *Mais quoique ces signes, il faut l'avouer, fussent bien choisis ils n'étaient guère utiles car il est plus aisé d'écrire un mot en abrégé que de dessiner une figure. En proposant ici d'autres signes, je chercherai à éviter ces inconvénients. Je dois cependant faire observer que ces nouveaux signes ne sont pas créés dans la vue de les placer, comme les anciens, sur les vases de laboratoire mais qu'ils ont pour objet de faciliter l'expression des proportions chimiques, et de nous mettre en état d'énoncer brièvement et avec facilité le nombre d'atomes élémentaires qui se trouve dans chaque corps composé.* *Les signes chimiques doivent être des lettres alphabétiques pour pouvoir être facilement tracés et imprimés sans défigurer le texte. Je choisis donc à cet effet la lettre initiale du nom latin de chaque corps simple ; mais plusieurs de ces corps ayant la même initiale, je les distingue de la manière suivante :* 1. *Les corps simples non métalliques (les métalloïdes) ne seront désignés que par la lettre initiale, quand même elle serait commune à quelque métal ;* 2. *et le métal qui aura la même initiale qu'un autre métal ou un métalloïde , sera indiqué par les deux premières lettres de son nom, ou, si elles se trouvaient les mêmes dans un autre nom, on ajoutera à l'initiale la première consonne différente.* *Par exemple, C = Carborricum, Co = Colbaltum, Cu = Cuprium, O = Oxigenium, …*	Toutes les propositions sont possibles à ce stade : OCO, COO, OOC, CO2, CO_2, C2O, C_2O, CO^2, etc. Elles peuvent être discutées avec les élèves pour indiquer celles qui sont parfois utilisées (en jaune) et celle qui est en général retenue (en vert). Pour les autres symboles, le travail peut se faire en lien avec le tableau périodique en repérant les symboles avec une seule lettre et ceux avec deux lettres puis en repérant les lettres non « prévisibles ».
<u>-3. Application à la synthèse de l'eau : de la transformation chimique à la réaction chimique</u> **Extrait d'un texte de Lavoisier sur la synthèse de l'eau (texte transformé) :** *« Depuis qu'on connaît l'expérience dans laquelle un mélange d'hydrogène et d'oxygène ne produit, en brûlant, que de l'eau très pure, à peu près égale en masse à celui des deux gaz réunis, il était difficile de ne pas reconnaître dans*	Cette partie doit permettre la transition entre la première étape et la deuxième étape.

cette production d'eau une preuve presque évidente que ce liquide, mis de tout temps au rang des substances simples, est réellement un corps composé. » **Questions :** Quelle est la transformation chimique décrite par Lavoisier ? À partir des représentations que vous avez choisies, quelle pourrait être la formule de l'eau ? Proposez une représentation de la réaction qui interprète la transformation chimique sous forme d'équation	Nous attendons comme réponse possible HO (ou OH) ou H_2O si les élèves connaissent déjà la formule. Puis : H + O → (ou =) HO (ou OH) ou H_2 + O → H_2O si les élèves connaissent déjà la formule du dihydrogène

Annexe 21.2 : Deuxième étape : la formule d'une molécule et le modèle de la réaction chimique - écriture des formules des molécules, des espèces chimiques et d'une équation chimique.

Textes historiques et questions possibles	**Remarques**
-1. Introduction de la réaction chimique : modèle pour la transformation chimique **Texte de Dalton sur l'interprétation possible d'une transformation chimique** *« L'analyse et la synthèse chimique ne vont pas plus loin que de séparer les particules les unes des autres, et les réunir. »* En vous aidant du texte de Dalton et du texte de Lavoisier (texte fin de l'étape 1), proposez une interprétation en termes d'atomes et de molécules de l'expérience de la synthèse de l'eau décrite par Lavoisier. Vérifiez si votre proposition permet d'interpréter également la conservation de la masse au cours d'une transformation chimique indiquée par Lavoisier.	Ce premier travail doit permettre de définir une réaction chimique en termes de redistribution d'atomes et d'interpréter la conservation de la masse par la conservation des atomes (rappel : des atomes différents ont des masses différentes.)
-2. Controverse historique : recherche de la formule de l'eau en lien avec la synthèse de l'eau : **Texte de Dalton :** *« Les règles générales suivantes peuvent être adoptées comme guide dans toutes nos recherches sur la synthèse chimique.* 1. *Quand une seule combinaison de deux corps peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire, à moins qu'une certaine cause indique le contraire.* 2. *Quand deux combinaisons sont observées, on doit présumer qu'elles sont l'une binaire et l'autre ternaire* *De l'application de ces règles aux faits chimiques déjà bien établis, nous pouvons tirer les conclusions suivantes : que l'eau est un composé binaire d'hydrogène et d'oxygène. »* **Texte de Gaudin :** *« Un volume de gaz oxygène, en se combinant avec deux volumes de gaz hydrogène, donne deux volumes de vapeur d'eau, si les particules sont des atomes et pour que toutes les molécules soient identiques, il faudra que chaque particule d'oxygène s'approprie 2 particules de gaz hydrogène il y aura donc 3 particules en tout dans chaque molécule d'eau. »* **Questions :** Quelle est la formule de l'eau proposée par Dalton ? Proposée par Gaudin ?	Controverse entre Dalton et Gaudin pour la formule de l'eau. Dalton utilise un principe de simplicité. Gaudin part de résultats expérimentaux. La formule H_2O permet d'interpréter les résultats expérimentaux.

Comment Dalton justifie-t-il sa formule ? Comment Gaudin justifie-t-il sa formule ? Quelle formule doit-on retenir pour l'eau et pour quelle raison ?	
<u>-3. Recherche des formules des molécules d'hydrogène et d'oxygène : cas de la synthèse de l'eau</u> **Texte Gaudin** « *pour une même pression et une même température, nous dirons 1, 2, 3 molécules, au lieu de 1, 2, 3 volumes. Une molécule de gaz oxygène, en se combinant à deux molécules de gaz hydrogène, donne deux molécules de vapeur d'eau* » En écrivant l'équation de la réaction correspondant à la synthèse de l'eau avec les proportions indiquées par Gaudin, peut-on conserver pour l'oxygène et l'hydrogène les formules proposées par Dalton ? Et si non, quelle formule proposeriez-vous pour pouvoir respecter les faits expérimentaux ? Pour répondre vous pouvez-vous aider du texte de Gaudin ci-dessous. **Texte Gaudin** « *Une molécule de gaz oxygène, en se combinant à deux molécules de gaz hydrogène, donne deux molécules de vapeur d'eau ; […], il faut et il suffit que la molécule d'oxygène se partage en deux, et que chaque moitié vienne s'unir à une molécule biatomique d'hydrogène; donc le gaz oxygène est biatomique comme l'hydrogène* »	A partir des formules, on peut remplacer les noms dans le texte en dihydrogène et dioxygène Cette partie permet d'écrire une première équation de réaction chimique.

Rem : autre texte possible de Gaudin sur l'eau

« Par exemple, on sait très bien que, pour faire détoner le gaz hydrogène par son mélange avec l'oxygène, il faut, afin que la combinaison des deux gaz soit totale et ne laisse pour produit que de l'eau, que le rapport soit de deux volumes d'hydrogène contre un seul volume d'oxygène; et ,après la combinaison ,en supposant que l'on porte à 100 degrés la température de l'eau formée, on reconnaît qu'elle représente, pour trois volumes de gaz employé, deux volumes de vapeur seulement, et l'on dit qu'il y a eu condensation dans un rapport de trois à deux volumes.

Cela revient tout à fait à dire que deux molécules d'hydrogène, en se combinant avec une seule molécule d'oxygène, donnent lieu à deux molécules de vapeur d'eau. Dès lors il faut bien que la molécule d'oxygène se partage en deux parties égales pour que chaque moitié se réunisse aux molécules biatomiques d'hydrogène : donc la molécule d'oxygène, étant divisible par deux, n'est pas un atome, et cette molécule est biatomique au moins. »

Annexes 22 : Les dialogues

Annexe 22.1 : Dialogue 1 : formule des corps composés

Sagredo : N'est-il pas vrai que monsieur Lavoisier a réussi à décomposer de l'eau en gaz oxygène et en gaz hydrogène ?

Salviati : C'est parfaitement exact. Tous les chimistes sont maintenant d'accord sur ce point. L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé.[63] Dans le nouveau système proposé par monsieur Dalton, tout corps est formé d'un assemblage de particules qui peuvent être elles-mêmes des combinaisons d'autres particules ultimes appelées atomes. Un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre élément, toujours avec des nombres entiers d'atomes jamais avec des fractions d'atomes. [64] La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène H et d'atomes d'oxygène O. La combinaison de ces atomes forme une molécule d'eau.

Sagredo : Et dans ce cas, comment pourrions-nous écrire la formule de cette molécule d'eau ?

Simplicio : Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée comme guide dans toutes les recherches sur la synthèse chimique : quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire, à moins qu'une certaine cause indique le contraire. De l'application de cette règle, nous pouvons tirer la conclusion suivante : la molécule d'eau est une combinaison binaire d'atome d'hydrogène et d'atome d'oxygène. [65]Sa formule chimique sera donc HO.

Salviati : Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience, et n'a peut-être pas agi avec assez de précaution en appliquant sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie. [66] Monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène.[67] Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il paraît plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.[68]

Simplicio : La formule HO peut très bien s'expliquer. 2 volumes d'hydrogène se combinent avec 1 volume d'oxygène. Comme nous avons admis que la molécule d'eau est formée d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, il est clair que l'on peut dire que l'atome d'oxygène est

[63] D'après Lavoisier, A.-L. (1862). Œuvres de Lavoisier (Tome II Mémoires de chimie et physique). Paris, p.335-341

[64] D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Edition). Paris : Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.8

[65] D'après Dalton, J. (1808). A new system of chemical philosophy (Vol. 1). London : Rickerstaff., p.213

[66] D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Edition). Paris: Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.9

[67] D'après Lavoisier, A.-L. (1862). Œuvres de Lavoisier (Tome II Mémoires de chimie et physique). Paris : p.335-341

[68] D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Édition). Paris : Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.27

représenté par 1 volume de gaz oxygène et que l'atome d'hydrogène est représenté par 2 volumes de gaz hydrogène. [69]

Sagredo : Mais ceci n'est-il pas une supposition gratuite ?

Salviati : En effet, nous connaissons aujourd'hui un grand nombre d'exemples contraires à la règle des combinaisons de monsieur Dalton et notamment la molécule d'eau. De nombreux chimistes semblent s'accorder pour la formule H_2O et s'appuient pour cela sur les hypothèses de monsieur Ampère et de monsieur Avogadro[70] à propos de la combinaison des atomes et sur les résultats expérimentaux de monsieur Gay-Lussac pour les volumes de gaz. Je vais dès à présent vous présenter ces nouvelles règles.

---

[69] D'après Regnault, V. (1850). Premiers éléments de chimie. Paris: V. Masson, Langlois et Leclercq., p.540

[70] D'après Avogadro, A. (1811). Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons. Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts, (LXXIII), 58–76.

Annexe 22.2 : Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (1ère partie)

Sagredo : La mise en contact du gaz hydrogène et du gaz chlore permet d'obtenir le gaz chlorhydrique. Comment peut-on représenter cela avec les formules de monsieur Berzelius ?

Simplicio : En me basant sur les combinaisons de monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl.

Salviati : Monsieur Gay-Lussac, qui a posé en 1808 ses lois mémorables sur les volumes des gaz qui se combinent, a trouvé qu'1 volume d'hydrogène s'unit à 1 volume de chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique[71].

Sagredo : N'y a -t-il pas alors contradiction entre le fait d'obtenir une molécule de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Simplicio, et deux volumes de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Salviati ?

Simplicio : L'explication la plus simple est qu'1 volume d'hydrogène s'unit à 1 volume de chlore ce qui donne 2 volumes de gaz chlorhydrique. [72]

Salviati : Mais pour l'eau monsieur Gay-Lussac a trouvé que 2 volumes de gaz hydrogène et 1 volume de gaz oxygène donnent deux volumes de gaz eau. Et nous connaissons également l'action entre le gaz hydrogène et le gaz azote où monsieur Gay-Lussac trouve que 3 volumes de gaz hydrogène et 1 volume de gaz azote donnent 2 volumes de gaz ammoniac. Votre raisonnement ne semble plus applicable.

Simplicio : Je vous l'accorde, ma première explication était trop simple. Mais des chimistes comme monsieur Berthelot proposent de considérer que les corps simples ou composés occupent des volumes différents mais qu'ils sont entre eux dans des rapports simples comme :

- 1 équivalent d'oxygène occupe 1 volume
- 1 équivalent de chlore, d'hydrogène, 2 volumes
- 1 équivalent de gaz chlorhydrique, 4 volumes. [73]

Sagredo : Cela me semble bien compliqué et je ne comprends pas comment il choisit les volumes. De plus, monsieur Simplicio est reparti des formules de monsieur Dalton. Mais on a vu précédemment que celui-ci s'est déjà trompé pour la formule de l'eau.

Salviati : Vous avez tout à fait raison. Nous faisons de notre côté les mêmes hypothèses que messieurs Ampère et Avogadro : le volume de gaz représente la molécule de gaz. En cherchant à expliquer les faits conformément à cette hypothèse, de nombreux chimistes supposent que les molécules qui constituent un corps simple ne sont pas formées d'un seul atome, comme l'a d'abord suggéré Monsieur Dalton, mais sont composés de plusieurs atomes réunis. [74] Monsieur Wurtz remplace donc

---

[71] D'après Wurtz, A. (1869). Histoire des doctrines chimiques depuis Lavoisier jusqu'à nos jours. Paris: L. Hachette., p.119

[72] Ce raisonnement n'a pas été tenu par les opposants de la théorie atomique mais pourrait être proposé par les élèves.

[73] D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, 1, p.1189–1195.

[74] D'après Avogadro, A. (1811). Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons. Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts, (LXXIII), p.58–76.

l'énoncé de monsieur Berthelot par : tous les gaz renferment le même nombre de molécules pour un même volume de gaz, la molécule pouvant être formée soit :

- par 1 atome (mercure)
- par 2 atomes (hydrogène, chlore, oxygène, azote)
- par 3 atomes (ozone) [75]

[75] D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1189–1195

Annexe 22.3 : Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (2ème partie)

Simplicio : Vous êtes en train de nous dire que les formules H et H_2 ne représentent pas la même chose alors que l'une est tout simplement le double de l'autre. En quoi cet énoncé est-il plus clair ?

Salviati : Parce que nous établissons une distinction bien tranchée entre les mots atome et molécule, et cela avec d'autant plus de raisons que, si jusqu'à ce jour on n'est pas parvenu à se mettre d'accord sur des formules uniques, c'est uniquement faute d'avoir établi cette distinction.[76]

Simplicio : Monsieur Berthelot pense que les notions d'atomes et de molécules sont trop hypothétiques. Qui n'a jamais vu, je le répète, une molécule ou un atome ?[77]

Salviati : Point n'est besoin de les voir. Cette théorie permet d'interpréter l'ensemble des faits. De nombreux chimistes, Messieurs Dumas, Gaudin, Gerhardt, Laurent, pensent que pendant le processus de combinaison chimique, les molécules échangent leurs atomes de manière à donner de nouvelles molécules. Monsieur Wurtz représente cela sous la forme d'une équation : HH + ClCl = HCl + HCl.[78]

Sagredo : Cette théorie semble se tenir Donc si je récapitule ce que dit monsieur Salviati, les espèces chimiques sont constituées de particules que nous appelons molécules et ces molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes.

Salviati : C'est tout à fait cela, quoi qu'en dise monsieur Berthelot par la voix de monsieur Simplico. Les gaz hydrogène et chlore ne sont pas constitués de particules atomiques mais biatomiques.[79] Nous allons d'ailleurs les rebaptiser et les appeler molécule de dichlore et molécule de dihydrogène. Et nous appellerons les gaz correspondant : le dichlore et le dihydrogène.

Sagredo : Et on interprète alors la transformation chimique comme un échange d'atomes entre les molécules qui constituent les espèces chimiques.

Salviati : Tout à fait. Cette théorie permet également d'interpréter la formation de l'eau et de l'ammoniac et d'interpréter les volumes de gaz trouvés par monsieur Gay-Lussac.

Sagredo : Et l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène, d'azote et de carbone. Nous obtenons alors quatre formules de molécules différentes.

Salviati : Encore exact. Les atomes, de chlore, d'oxygène, d'azote n'ont pas le même pouvoir de combinaison pour l'hydrogène. Les combinaisons ainsi formées sont : HCl, H_2O, NH_3 et nous pouvons y ajouter CH_4 car les atomes d'hydrogène peuvent être remplacés par quart dans la molécule de méthane. Ainsi, les atomes C, Cl, N et O des corps simples ne sont pas équivalents entre eux puisqu'ils s'unissent à un même atome dans des quantités différentes.[80].

---

[76] D'après Gaudin, M. A. (1833). Recherches sur la structure intime des corps inorganiques définis. Annales de Chimie et de Physique, 52, p.113–133.

[77] D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1189–1195.

[78] D'après Wurtz, C. A. (1864). Leçons de philosophie chimique. Paris : Hachette., p.37-38.

[79] D'après Gaudin, M.-A. (1873). L'architecture du monde des atomes dévoilant la structure des composés chimiques et leur cristallogénie. Paris : Gauthiers-Villars., p.25.

[80] D'après Wurtz, A. (1877). Sur la loi des volumes de M. Gay-Lussac ; réponse à M. H. Sainte-Claire Deville. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1183–1189.

Sagredo : Il me reste une dernière question. La formule chimique permet de représenter une molécule. Est-il possible d'utiliser cette même formule pour représenter une espèce chimique ?

Salviati : Monsieur Gaudin trouve que si l'on voulait compter le nombre des atomes contenus dans une grosse tête d'épingle, en en détachant chaque seconde un milliard, il faudrait continuer cette opération pendant plus de deux cent cinquante mille ans.[81] Une espèce chimique est donc constituée d'un nombre incalculable de la même molécule. Il semble donc pertinent de garder la même formule pour la molécule et pour l'espèce chimique. Par contre pour faire la différence entre la molécule, invisible et l'espèce chimique accessible à nos sens, nous pouvons ajouter un indice à la formule qui désigne l'espèce chimique : un « g » pour gaz, un « l » pour liquide et un « s » pour solide.

Sagredo : Et dans ce cas, nous pouvons alors représenter les quatre réactions de formation du gaz chlorhydrique, du gaz eau, du gaz ammoniac et du gaz méthane à partir des espèces chimiques : gaz dihydrogène, gaz dichlore, gaz diazote.

[81] Gaudin, M.-A. (1873). L'architecture du monde des atomes dévoilant la structure des composés chimiques et leur cristallogénie. Paris: Gauthiers-Villars.

Annexe 23 : Transcription de la séance 3 à partir des textes historiques (Mathieu)

1 - 00:00 > 01:25 [Transition]

(Entrée de classe)

[>P]: vous prenez votre cahier côté cours au chapitre C4. Allons-y.

2 - 01:25 > 02:12 [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "particule", "atome", "symbole", "molécule", dimension

[>P]: on avait entamé la partie sur la constitution de la matière avec euh le fait que la matière était constituée de très petites particules. Est-ce que quelqu'un peut me rappeler le terme, comment s'appellent les très petites particules qui constituent la matière ? Oui Kimberley.

[>E]: les atomes.

[>P]: les atomes. Donc on avait vu qu'avec les atomes qu'il existait donc des symboles qu'on avait mis en place. On va essayer de les revoir au fur et à mesure. Après on avait commencé à attaquer tout doucement le terme de molécule. Est-ce que quelqu'un peut rappeler le terme, la définition de molécule ? Oui Anaël

[>E]: (trop doucement)

[>P]: un petit plus fort s'il te plaît.

[>E]: c'est deux atomes qui s'unissent.

[>P]: d'accord deux ou

[>E]: plusieurs.

[>P]: plusieurs. Deux c'est le minimum et tu peux en mettre plusieurs.

3 - 02:12 > 03:18 [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Langage symbolique non défini] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "molécule", "formule chimique", "modèle", empirique

[>P]: avant de commencer à voir plus en détail donc continuer sur la molécule, l'objectif aujourd'hui c'est de travailler justement sur ce que l'on appelle la formule chimique. Voir un peu comment cela a été mis en place au fur et à mesure et à voir aussi votre avis sur les différents modèles qui ont été utilisés. Alors la première chose c'est que vous, les formules chimiques, vous êtes habitués à les côtoyer tous les jours. La plus connue, celle que vous côtoyez le plus souvent. Si vous prenez par exemple cette publicité avec la marque que vous connaissez pour faire les boissons pétillantes, à quel niveau vous remarquez une formule chimique ? Levez la main s'il vous plaît. Oui.

[>E]: CO2.

[>P]: oui d'accord, la partie CO2. Donc on verra en fait que pas mal de formules chimiques, en fait, sont présentes dans les médias les publicités et qu'à force vous les apprenez entre guillemets sans le vouloir. Donc on verra après justement, est-ce que c'est noté correctement. Est-ce que c'est fait de manière on va dire légale pour savoir si tout a été bien mis en place.

4 - 03:18 > 04:35 [Empirique] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "formule chimique", "gaz", empirique, nom indéterminé, nom espèce chimique, "molécule"

[>P]: donc avant d'arriver à cette partie, à cette formule il y a eu différentes choses qui ont été faites à partir du moment où la chimie moderne a commencé à se mettre en place. Est-ce que Lavoisier ça vous rappelle quelque chose ?

[>E]: oui

[>P]: alors est-ce que quelqu'un peut me rappeler à quel moment on en avait parlé et pour quelle raison on en avait parlé, à part le lycée qui est à côté ?

[>E]: ben il avait changé le nom d'un truc, je crois.

[>P]: alors il avait parlé de certains noms de gaz. Sinon on en avait parlé, oui Kelly.

[>E]: les veines, là, ça marchait pas quand (inaudible)

[>P]: ça c'était la partie électricité. Donc quand on avait parlé de Galvani et de Volta. Donc ça c'était pas au moment de Lavoisier. C'était lorsqu'on avait parlé sur la composition de l'air. C'était lui qui avait mis en évidence que l'air était constitué du dioxygène et de 80% de diazote.

[>E]: et 20% de dioxygène.

[>P]: 20% de dioxygène. Alors on va partir en fait à partir de ce moment-là. C'est là où s'est développée la chimie moderne. Et vous avez d'autres scientifiques qui ont travaillé en même temps que Lavoisier. Donc les noms qui vont apparaître ne sont pas à savoir bien sûr. C'est des personnes qui ont travaillé justement sur des modèles qui ont été mis en place pour essayer de travailler sur cette formule chimique pour la molécule.

5 - 04:35 > 06:43 [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, "atome", nom atome, nom molécule, nom espèce chimique, chiffre, "molécule"

[>P]: je vais vous donner le texte juste après. D’abord vous lisez ce qui est écrit au tableau. On va le lire ensemble pour voir si vous avez des questions sur le vocabulaire. Kelly, oui je t'écoute. Est-ce que tu arrives à lire ? C'est bon, c'est assez grand. Alors je t'écoute Kelly.

[>E]: extrait d'un texte de Dalton.

[>P]: Dalton oui. Je vais expliquer après.

[>E]: de mille huit cent huit.

[>P]: mille huit cent huit. Texte transformé, tu n'es pas obligé de le lire. Je t'écoute pour la première phrase.

[>E]: l'oxyde carbonique est un composé binaire formé d'un atome de carbone et d'un d'oxygène.

[>P]: d'accord. Je vais t'arrêter juste là après je te laisserai la parole pour la deuxième phrase. Est-ce que dans la première phrase, l'oxyde carbonique, c'est le nom de la molécule qu'on va s'intéresser. Est-ce que le terme binaire, vous comprenez ce que cela veut dire ? Non personne. D'après ce qui suit à votre avis ? De quoi va être constituée cette molécule d'oxyde carbonique ?

[>E]: d'eau.

[>E]: d'atome.

[>P]: Matisse ?

[>E]: d'un atome de carbone et d'un oxygène.

[>P]: au total, cela nous fera combien d'atomes ?

[>E]: deux.

[>P]: juste deux. Binaire, tout simplement, ça veut dire qu'il y en aura deux. Je te laisse lire la deuxième phrase.

[>E]: le gaz carbonique est un composé ternaire formé d'un atome de carbone et de deux d'oxygène.

[>P]: même question. Le terme ternaire, est-ce que vous pourriez me dire ce que ça représente ?

[>E]: que c'est composé de trois atomes.

[>P]: d'accord. C'est-à-dire qu'il va y avoir trois atomes dans notre molécule. Juste avant de continuer, Dalton, donc mille huit cent huit, c'est un Anglais qui a travaillé justement sur les formules chimiques. Donc on va voir ce qu'il va proposer. Rien à voir avec les frères Dalton Lucky Luke, c'est autre chose. Est-ce que par contre vous connaissez le principe lorsqu'on dit qu'une personne est daltonienne ?

[>E]: elle porte des lunettes.

[>E]: elle ne reconnaît pas les couleurs.

[>P]: voilà, on est d'accord. Donc c'est lui qui a travaillé sur ça. Il a travaillé sur pas mal de choses et notamment sur ça.

6 - 06:43 > 09:58 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "symbole", nom indéterminé, "molécule", nom molécule, "atome", nom atome, "représenter", chiffre, nom espèce chimique

[>P]: à partir de là on va présenter deux modèles qui ont été travaillés. Le premier modèle, c'est un modèle qui est proposé par deux Français, Hassenfratz et Adet. Vous voyez l'époque mille sept cent quatre-vingt-sept, donc on est à peu près comme Lavoisier, un petit peu avant la Révolution française. Donc on va d'abord commencer par ce qu'ils proposent eux. Vous avez, ils ont mis en place ces deux types de symboles. Pour le carbone, ils ont trouvé ce symbole là (l'enseignant montre les symboles au tableau). Pour l'oxygène, ce symbole-là (l'enseignant montre au tableau). Lorsqu'ils ont voulu décrire

la molécule par exemple de dioxyde de carbone, ou de gaz carbonique qui est l'ancien nom, ils ont proposé ça (l'enseignant montre le symbole au tableau). Pour la molécule de gaz carbonique, en sachant que, je vous rappelle, que le gaz carbonique, il y a trois parties un atome de carbone et deux atomes d'oxygène. À votre avis, qu'est-ce que vous comprenez justement, qu'est-ce que vous remarquez par rapport à eux ce qu'ils ont proposé pour cette molécule en partant de chaque symbole ? Qu'est-ce que vous remarquez ? (Les symboles sont au tableau).

[>E]: il est.

[>P]: alors lève la main Kimberley, s'il te plait. Matisse oui en premier.

[>E]: non rien.

[>P]: d'accord merci.

[>E]: ils les ont associés.

[>P]: d'accord mais de quelle manière ? Est-ce qu'il a juste mis ça avec ça et c'est tout. Qu'est-ce qu'il a fait concrètement ? Oui Kelly.

[>E]: il a fait un dessin.

[>P]: d'accord, ça on est d'accord. Cela représente un dessin. Oui Matisse.

[>E]: ben il a fait (inaudible), carbone c'est

[>P]: est-ce que déjà on retrouve le symbole du carbone dans cette partie - là ?

[>E]: oui.

[>P]: on est d'accord. (L'enseignant montre au tableau dans le symbole ce qui correspond au carbone). Si vous regardez ici, on retrouve dans cette partie-là le symbole du carbone. Ensuite qu’est-ce qu'il a fait d'autre ?

[>E]: ben il a fait pareil pour l'oxygène.

[>P]: on est d'accord. A quel niveau ?

[>E]: en bas.

[>P]: en bas (l'enseignant montre le trait du bas) .

[>E]: ah non, le truc là comme ça (l'élève montre le trait horizontal).

[>P]: D'accord (l'enseignant montre le trait de côté). Donc il l'a fait combien de fois justement ?

[>E]: deux.

[>P]: deux fois, puisque l'on vient de vous dire qu'il y avait un atome de carbone et deux atomes d'oxygène. Donc ça c'est pour le premier atome d'oxygène et ça pour le deuxième atome d'oxygène. Est-ce que c'est bon Kimberley ? D'accord.

[>E]: oui.

[>P]: d'accord ? L'autre personne qu'on a travaillée, c'est celui dont on a lu le texte précédemment Dalton qui lui propose ça (l'enseignant montre au tableau). Ça, c'est sa façon de représenter le gaz carbonique, toujours avec la même composition, un atome de carbone et deux atomes d'oxygène, il

propose ça. Est-ce que quelqu'un peut m'expliquer comment il a procédé tout simplement pour créer cette molécule de gaz carbonique à partir de ces modèles d'atomes. Oui Anaël ?

[>E]: ben il a mis euh un atome de carbone puis autour deux atomes d'oxygène

[>P]: d'accord il a pris son atome de carbone et il a associé ça avec deux atomes d'oxygène. Donc ça c'est les deux modèles qui ont été proposés au départ. Vous allez les avoir sur feuille et on va pouvoir répondre à la première question.

7 - 09:58 > 10:42 [Transition]

[>P]: en sachant que là ça va dépendre de votre façon de gérer. (L'enseignant distribue les documents) Pour l'instant vous attendez avant de coller on va le faire quand vous aurez tous les documents.

8 - 10:42 > 12:40 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "symbole", "molécule", couleur, nom indéterminé, "représenter"

[>P]: alors, on vous repropose donc les deux modèles avec le texte que l'on a lu tout au départ avec Kelly. Donc vous avez le symbole qui est proposé par Hassenfratz et Adet, puis vous avez les symboles proposés par Dalton. La toute première question, elle est notée au tableau et c'est la toute première question qui est notée sur votre document. Justine, tu peux lire la première question s'il te plaît.

[>E]: parmi les deux exemples de symbole écrit ci-dessus, lequel choisiriez-vous pour représenter la composition du gaz carbonique proposé par le texte de Dalton?

[>P]: d'accord, alors puisque c'est toi qui lit, est-ce que entre les deux, entre cette proposition là et celle-ci (l'enseignant montre au tableau), laquelle tu préfères ? En sachant que le but, c'est de représenter la même molécule, le gaz carbonique. Il y a soit cette façon-là, soit cette façon-là. Personnellement, toi, tu préfères laquelle ? (silence). Non aucun choix possible ? Kimberley, oui

[>E]: la deuxième.

[>P]: la deuxième. Pourquoi tu préfères la deuxième ?

[>E]: ben il est plus facile.

[>P]: plus simple. Pourquoi plus simple ? Parce que.

[>E]: parce que c'est des ronds.

[>P]: c'est des ronds. D'accord donc le terme rond t'intéresse. Oui Kelly ?

[>E]: la deuxième parce qu'on comprend mieux.

[>P]: D'accord. Pourquoi justement tu comprends mieux dans la deuxième par rapport à la première ? Qu'est-ce que tu comprends pas dans la première ?

[>E]: ben le euh

[>P]: qu'est-ce qui te dérange, par exemple ?

[>E]: ben euh, les traits en fait

[>P]: les traits, ça t'embête ? Oui Kimberley

[>E]: moi ce qui m'embête c'est la différence de couleur. On voit pas les différences de couleur entre les deux

[>P]: le fait que là il est colorié plein et celui-là clair, ça t'aide

[>E]: oui c'est plus facile pour différencier

[>P]: d'accord OK pas de problème. Donc en fait après quelqu'un veut donner son sentiment sur l'un ou sur l'autre. Oui Matisse

[>E]: le deuxième

[>P]: le deuxième aussi. D'accord.

9 - 12:40 > 14:02 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique explicite] [Professeur seul]

Tag(s): nom indéterminé, "atome", nom atome, "molécule", nom molécule, "représenter"

[>P]: ce que vous allez faire tout simplement, c'est répondre aux questions numéro deux et aux questions numéro trois, en sachant que dans la question numéro deux, on va vous demander maintenant pas pour le gaz carbonique, c'est-à-dire l'ancien nom du dioxyde de carbone, mais pour l'oxyde carbonique. L'oxyde carbonique dans votre texte est rappelé, la composition c'est binaire. Un atome d'oxygène et un atome de carbone. Donc là tout simplement, vous choisissez le modèle que vous préférez. Si vous préférez celui d'Hassenfratz et Adet, vous essayez de me construire la molécule d'oxyde carbonique avec un atome de carbone, un atome d'oxygène. Si vous préférez le modèle de Dalton avec un carbone et un oxygène toujours, vous me construisez rapidement cette molécule. On fait ça rapidement, vous réfléchissez. Après je vous laisse une ou deux minutes. Si vous avez déjà fini, vous passez à la troisième, sinon on corrigera déjà la première. Donc, vous le faites sur votre cahier. (Les élèves cherchent individuellement. L'enseignant circule parmi les élèves). Kelly, tu choisis un des modèles. T'as dit que tu préférais celui de droite. Avec ce modèle-là tu essaies de représenter la molécule d'oxyde carbonique qui est formée d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène.

10 - 14:02 > 14:15 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Langage symbolique explicite] [questions élèves]

Tag(s): "symbole", "molécule"

[>P]: vous pouvez le faire à la suite sur le cahier à la suite du petit 2.

[>E]: on peut créer la nôtre (élève dit quelque chose) ?

[>P]: comment ?

[>E]: on peut créer notre propre molécule ?

[>P]: non avec ce qui est proposé. Tu choisis avec les symboles que tu as et tu fais.

11 - 14:15 > 15:58 [Travail individuel]

Tag(s): "atome", nom atome, "molécule"

(Les élèves cherchent individuellement.)

[>P]: Emma t'a choisi quel modèle ?

[>E]: le deux.

[>P]: D'accord le deuxième. Thomas, tu vas partir sur lequel ?

[>E]: le deux.

[>P]: le deuxième. Est-ce que par hasard, il y a quelqu'un qui va partir sur le premier modèle. OK très bien Louis. Megane, sur le deuxième aussi ? D'accord. Donc sur le deuxième modèle avec atome de carbone, ce symbole là et atome d'oxygène ce symbole là, vous créez une molécule qui est constituée d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène. (L'enseignant circule dans la classe et discute en aparté).

[>E]: moi je fais les deux, comme ça.

[>P]: OK pas de problème. Tu as laissé la place pour coller la feuille.

[>E]: oui je vais coller là.

[>P]: OK. Donc si tu veux Matisse, tu peux déjà réfléchir à la question trois en attendant les derniers. Ça c'est des petits détails qui peuvent attendre Justine. OK. Est-ce comme on commence d'abord par le premier modèle, celui d'Hassenfratz. Est-ce que tu veux aller faire au tableau ou pas ?

[>E]: mais j'ai pas compris.

[>P]: d'accord à ce moment-là on va envoyer Matisse. Et après t'as pas compris, tu poses une question. Allons-y.

12 - 15:58 > 18:40 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "atome", "élément chimique", nom atome, nom indéterminé, "représenter", chiffre, "molécule"

(Matisse va au tableau représenter avec les symboles d'Hassenfratz)

[>E]: je fais là ?

[>P]: en dessous oui s'il te plaît. (L'élève écrit au tableau sa représentation : un C avec un trait prolongeant le bas du C). Est-ce que tu peux expliquer à Noémie pourquoi tu as fait ça ?

[>E]: ben parce que c'est

[>P]: à Noémie, pas à moi

[>E]: ça c'est le truc de carbone, là c'est le truc d'oxygène.

[>P]: est-ce que tu es d'accord dans la définition, Noémie ? Merci Matisse. On l'a dit tout à l'heure Noémie, combiné, composé, pardon, binaire. Binaire, tu es d'accord qu'il y a deux éléments. Oui. C'est deux atomes, c'est deux éléments, c'est un atome de carbone et c'est un atome d'oxygène. Pour l'instant, est-ce que ça va ?

[>E]: ben oui.

[>P]: OK. Est-ce que tu es d'accord, en sachant qu'en prenant le modèle qui a été proposé par ces personnes, carbone c'est plus ou moins représenté par un C ou par un croissant de lune, comme tu préfères, est-ce que tu es d'accord que, carbone, il est représenté ici ? Son symbole pour l'atome d'oxygène, c'est juste un trait. Quand tu veux mettre les deux ensembles, tout simplement, il a fait le C avec la barre qui représente l'atome d'oxygène. Donc là ça représente cette molécule d'oxyde carbonique. Par contre t'aurais pu le faire d'une autre façon. Allons-y (Matisse retourne au tableau). Tu mets un ou en dessous (Matisse représente le croissant de lune et un trait au bout vertical). Par exemple. Il aurait pu très bien faire ça, limite un C cédille qui représente l'oxyde carbonique. Du moment que vous avez le C et la barre, ça représente l'oxyde carbonique. Oui, non ? D'accord. On y va pour la suivante (un autre élève va au tableau). T'as juste à aller chercher les billes et à faire ce que tu veux. Votre atome de carbone, votre atome d'oxygène, en sachant que tu vas en mettre combien, Kelly ?

[>E]: ben deux

[>P]: Alors est-ce que dans la définition, tu as deux atomes d'oxygène ?

[>E]: non

[>P]: tu en as combien ?

[>E]: un

[>P]: un seul. Donc tu t'arrêtes là. Un carbone, un oxygène. Est-ce que c'est parce que c'est justement des cercles que vous préférez celui-là ?

[>E]: oui

[>E]: oui

[>P]: d'accord. Est-ce que pour les deux modèles proposés, vous avez des questions ?

[>E]: non

13 - 18:40 > 19:48 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique explicite] [Professeur seul]

Tag(s): "molécule", "atome", nom atome, "représenter"

[>P]: pas pour l'instant. OK. On attaque la troisième. Est-ce que tu peux lire la question, s'il te plaît, Kimberley ?

[>E]: on vous demande de représenter une molécule possédant dix atomes. La représentation de cette molécule vous semble-t-elle réalisable avec les modèles proposés ?

[>P]: on suppose une molécule avec dix atomes au total. Vous avez les deux modèles, soit celui d'Hassenfratz avec ce C et cette barre pour l'oxygène, soit les histoires de bille. Pour Dalton. On va partir sur une molécule qui a dix atomes. Pour faire simple, ce que l'on va faire, on va supposer, on va diviser par deux. Vous me mettez une molécule qui contient cinq de carbone, cinq d'oxygène. Avec le modèle que vous avez choisi dans la question petit 2, donc tout dépend lequel vous avez pris, soit celui-là, soit celui-là, vous me faites la représentation de la molécule avec cinq atomes de carbone et cinq atomes d'oxygène. On y va et après on vous corrige.

14 - 19:48 > 20:47 [Travail individuel]

[>E]: on fait les deux modèles ?

[>P]: tu choisis. Tu peux faire les deux Kelly ou sinon tu choisis celui que tu préfères.

[>E]: donc un des deux

[>P]: oui forcément (l'enseignant circule dans la classe). Donc là c'est avec ton modèle, OK. Par exemple, très bien. Toi, tu reviens au deuxième modèle. Tout à l'heure tu avais fait les deux mais là tu reviens au deuxième.

[>E]: non mais

[>P]: pas de problème, tu as le droit de faire que le deuxième. Tu veux faire pour le premier ? Allons-y.

15 - 20:47 > 22:45 [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique non défini] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, symbole indéterminé

(Un élève va corriger au tableau et représente cinq croissants de lune et entre chaque croissant cinq barres verticales reliées).

[>P]: Cinq carbones et cinq oxygènes. Ok. Donc elle peut le faire verticalement, après elle peut le faire aussi.

[>E]: horizontalement

[>P]: horizontalement. Est-ce par contre quelqu'un, pour le premier modèle, quelqu'un a une autre proposition à faire ? Noémie, s'il te plaît.

[>E]: je suis pas sûr aussi

[>P]: pour le premier. Vas-y. On voit s'il y a une erreur et après on rectifiera. (Matisse va au tableau. Il fait une première représentation qui ne le satisfait pas)

[>P]: t'as la gomme sur le côté. Marina, ça se passe au tableau, s'il te plaît.

[>E]: ah ben je fais comme ça mais cinq fois (il représente un C puis une barre verticale puis un C à l'envers ...)

[>P]: D'accord. En fait, tu fais des sortes de S mais à chaque fois ton S représente le C. Donc si j'ai bien compris, tu fais ton C, l'oxygène et tu fais un C dans ce sens-là ?

[>E]: voilà

[>P]: L'oxygène, un C dans ce sens-là, l'oxygène et ainsi de suite ?

[>E]: Oui

[>P]: OK. Un, deux, trois, quatre, cinq, donc j'en ai un en trop et ensuite un, deux, trois, quatre, cinq. OK.

16 - 22:45 > 24:18 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "atome", "représenter"

[>P]: Est-ce que déjà avant d'attaquer le deuxième modèle, avant d'attaquer le modèle de Dalton, on va effacer cette partie-là ? Qu'est-ce que vous remarquez par rapport aux deux, soit ce qu'a représenté Kelly, soit Matisse, qu'est-ce que vous en pensez ? Emma ?

[>E]: je euh

[>P]: d'accord mais qu'est-ce que tu penses ?

[>E]: ben c'est pareil mais ça prend de la place.

[>P]: d'accord, la place mais ensuite ? (silence) Non. Est-ce que vous trouvez ça simple à faire ?

[>E]: non

[>P]: est-ce que si l'on continue à augmenter le nombre d'atomes, si vous en avez pas dix mais vingt à représenter, est-ce que vous trouvez ça simple à faire ?

[>E]: non (tous ensemble).

[>P]: d'accord. Donc on va voir justement que la partie de la limite, c'est que quand vous arrivez à un certain nombre d'atomes, cela va commencer à être délicat à représenter tout ça. Si justement après, on passe à l'autre modèle, c'était toi, allons-y Kimberley. (Elle passe au tableau et fait une ligne horizontale en alternant cercle carbone et cercle oxygène). L'alternance des couleurs, c'est juste pour le côté esthétique.

[>E]: oui

[>P]: d'accord

17 - 24:18 > 25:02 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Langage symbolique explicite] [Professeur seul]

Tag(s): "molécule", "atome", "représenter"

[>P]: en sachant que, même si cette molécule elle n'existe pas l'objectif, c'est de vous faire comprendre qu'à partir d'un moment donné, je pense que Kimberley, elle va pas commencer à faire cent billes comme ça, alternée, pour faire de la tapisserie. Donc il y a un moment donné où vous allez arriver à une certaine limite par rapport à ces deux modèles. Donc quand vous arrivez à un certain nombre d'atomes qui commence à être important, ça va pas être évident. C'est pourquoi il y a un autre scientifique, suédois, qui s'appelle Berzelius, son nom de famille, qui a travaillé aussi sur la représentation des formules chimiques. Je vous donne le texte, on le lit ensemble, et vous voyez ce qu'il propose.

18 - 25:02 > 25:47 [Transition]

(Un nouveau texte est distribué)

[>E]: je peux lire

[>P]: si tu veux. On va attendre que Kelly soit à sa place.

19 - 25:47 > 28:01 [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique non défini] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "corps composé", "atome", nom espèce chimique, nom atome, "molécule", "formule chimique", "représenter"

[>P]: si vous remarquez la date, je vais attendre que vous ayez fini de coller.

[>E]: c'est la même

[>P]: on compare aux deux dates que l'on a données avant. Dalton, c'est quelle année ?

[>E]: mille huit cent huit

[>P]: mille huit cent huit. Là on avance encore un petit peu dans le temps, mille huit cent dix-neuf. Donc là c'est forcément une évolution du modèle qu'on est en train de mettre en place. Je t'écoute Matisse.

[>E]: extrait d'un texte de Berzelius, mille huit cent dix-neuf. Lorsque nous essayons d'exprimer les proportions chimiques d'un corps composé, nous trouvons qu'il est nécessaire d'avoir des signes chimiques pour énoncer brièvement et avec facilité le nombre d'atomes élémentaires de chaque corps composé.

[>P]: stoppe. On va déjà s'arrêter là sur cette première partie. Matisse, dans ce que tu as lu, est-ce que tu as compris des choses ou est-ce que tu as des choses que tu n'as pas comprises ?

[>E]: ben ouais, j'ai compris

[>P]: d'accord. Tu peux essayer d'expliquer, alors, ce qu'il veut dire ? Qu'est-ce qu'il veut essayer d'expliquer alors ?

[>E]: les proportions chimiques d'un composé.

[>P]: d'accord. Première chose, on va parler de proportions (l'enseignant souligne au tableau le passage dans le texte correspondant). Pour toi, c'est quoi les proportions ?

[>E]: ben, c'est ben, je sais pas comment expliquer moi.

[>P]: je sais pas

[>E]: s'il y a beaucoup ou s'il y en a pas beaucoup.

[>P]: d'accord. Par rapport à ce que l'on a travaillé tout à l'heure quand justement on te donnait que le gaz carbonique était constitué d'un atome de carbone et d'un atome d'oxygène. C'est quoi les proportions ?

[>E]: un atome de carbone et deux atomes d'oxygène.

[>P]: d'accord. C'est la quantité d'atomes que vous allez avoir dans chaque molécule. Le but c'est de justement trouver ce que l'on appelle des signes chimiques. Signes chimiques c'est comme ça au départ que Berzelius a appelé la formule chimique. C'est son premier terme. Donc signe chimique,

c'est justement de trouver quelque chose pour représenter la formule chimique, la molécule d'une certaine façon. En sachant que le but, c'est de l'énoncer avec facilité et brièveté, d'être rapide. On passe à la deuxième phrase, Matisse s'il te plaît.

20 - 28:01 > 29:29 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique explicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "atome", symbole atome, "molécule", nom molécule, nom espèce chimique, nom atome, "représenter", chiffre

[>E]: Pour cela les signes chimiques doivent être des lettres alphabétiques pour être plus facilement tracées et imprimées.

[>P]: D'accord. Deuxième partie, donc, on vous indique que vous allez tracer des lettres alphabétiques (L'enseignant souligne la partie du texte correspondant). Est-ce que les lettres alphabétiques, cela vous dit quelque chose ?

[>E]: ben oui, c'est l'alphabet.

[>P]: ça je suis d'accord. Dans l'alphabet, on est d'accord, vous avez appris l'alphabet. Dans le chapitre qu'on est en train de faire, Noémie ?

[>E]: C'est comme dans le tableau (l'élève montre le tableau périodique au fond de la classe).

[>P]: D'accord. Ce que l'on retrouve au fond dans la classification périodique ou sinon sur votre cahier, quand est-ce qu'on a utilisé justement des lettres alphabétiques ?

[>E]: dans les symboles des atomes ?

[>P]: On est d'accord, dans les symboles des atomes. Donc c'est là où ça commence à arriver ce que vous, vous connaissez. Les symboles des atomes qui sont représentés par des lettres et on va commencer à représenter les proportions chimiques. C’est-à-dire les quantités de chaque atome. Avec ça on va vous demander de refaire les deux molécules qu'on a étudiées précédemment, l'oxyde carbonique ou le dioxyde de carbone ou le gaz carbonique, pour l'instant on indique les deux, en fonction de ce qu'on vous indique. Vous devez utiliser les symboles que l'on a vus tout à l'heure ou la fois dernière, et indiquer les proportions. Vous me faites l'oxyde carbonique, un atome de carbone, un atome d'oxygène et vous essayez de me faire après le gaz carbonique, un atome de carbone, deux atomes d'oxygène.

21 - 29:29 > 30:25 [Travail individuel]

Tag(s): nom indéterminé, "formule chimique", symbole indéterminé, nom indéterminé, symbole indéterminé

(Les élèves cherchent individuellement)

[>P]: ça vous ne le notez pas. Vous pouvez noter directement en dessous donc oxyde carbonique et tu essaies de me donner le signe chimique, c’est-à-dire la formule chimique de l'oxyde carbonique.

[>E]: avec les lettres ?

[>P]: avec les lettres. Tu dois utiliser les lettres et les proportions. C'est-à-dire, est-ce qu'il y en a un, deux, trois, quatre, etcetera.

[>E]: donc il faut regarder là-bas (il montre le tableau périodique).

[>P]: ben les lettres, tu les as dans ton tableau. Je te les ai données la fois dernière Matisse.

[>E]: oui mais je m'en rappelle plus.

[>P]: d'accord.

22 - 30:25 > 30:50 [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique non défini] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, "formule chimique", symbole indéterminé, nom indéterminé, symbole indéterminé

[>P]: est-ce que quelqu'un aurait les lettres ? Quelqu'un peut rappeler le symbole du carbone ?

[>E]: C.

[>P]: C. Et Thomas, si c'est oxygène.

[>E]: O.

[>P]: d'accord (l'enseignant note au tableau) donc ça c'est la partie lettres alphabétiques utilisées. Maintenant il faut indiquer les quantités, les proportions chimiques. Tu pourras ranger ton carnet s'il te plaît. Merci. Oui (les élèves cherchent individuellement).

23 - 30:50 > 31:48 [Travail individuel]

Tag(s): nom indéterminé, "formule chimique", symbole indéterminé, nom indéterminé, symbole indéterminé

[>P]: on y a va pour la première (l'enseignant propose le crayon pour le tableau à un élève).

[>E]: ben je sais pas ce que c'est.

[>P]: on va t'aider (l'élève va au tableau).

24 - 31:48 > 36:10 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "atome", nom atome, symbole atome, nom indéterminé, nom molécule, "molécule", "représenter", chiffre

[>P]: Faustine, on t'indique que dans l'oxyde carbonique tu dois avoir deux atomes, un atome de carbone, un atome d'oxygène. En sachant que le but c'est d'utiliser les lettres

[>E]: ben c'est un C et un O.

[>P]: allons-y.

[>E]: là.

[>P]: oui juste à côté (l'élève note au tableau CO). Est-ce que les quantités tu souhaites les noter. C'est-à-dire le fait qu'il y a un atome de carbone, un atome d'oxygène. Est-ce que tu veux les préciser ou pas ?

[>E]: ben non.

[>P]: on laisse juste comme ça ? D'accord, merci. Est-ce que d'abord pour l'oxyde carbonique, vous voyez une autre façon de noter l'oxyde carbonique ? Oui.

[>E]: OC.

[>P]: On peut aussi noter (l'enseignant note au tableau OC) l'oxygène et le carbone. C'est le même principe tout à l'heure les billes avec Dalton, vous mettez l'oxygène avant le carbone ou après. Pour le gaz carbonique, est-ce que quelqu'un veut proposer quelque chose ? Oui vas-y Kelly.

[>E]: le gaz, c'est un G.

[>P]: Le gaz, c'est un G. Je suis d'accord mais là en fait le gaz carbonique c'est ta molécule. Toi ce que tu dois indiquer dans la molécule, c'est que tu dois faire apparaître qu'il y a du carbone et de l'oxygène

[>E]: oui enfin je veux dire le schéma.

[>E]: la lettre ?

[>E]: oui.

[>P]: la lettre je suis d'accord, c'est G pour gaz. Mais dans gaz ?

[>E]: oui j'ai compris mais c'est juste ça j'avais pas compris (l'élève montre le texte posant la question)

[>P]: d'accord. Donc est-ce que tu peux me faire apparaître dans ta formule qu'il y a du carbone et de l'oxygène. Donc c'est ça que tu dois me faire apparaître comme elle a noté tout à l'heure Faustine. Du carbone, il y en a combien ?

[>E]: un.

[>P]: donc tu vas mettre combien de C ?

[>E]: un.

[>P]: d'accord, un seul. Oxygène, il y en a combien ?

[>E]: un.

[>P]: t'es sûr ?

[>E]: deux.

[>P]: deux (l'élève note OCO verticalement). Alors ça vous pouvez noter verticalement, OCO. Par contre, est-ce que tu peux noter aussi, si tu peux le faire verticalement ? (L'élève note horizontalement mais avec le C à l'envers). A part que, ouais ton C il est aussi retourné. C'est ça ? A ce moment-là si ton C tu peux le mettre dans le sens pour qu'on le lise aussi Kelly. Sinon, on va se faire un torticolis.

[>E]: comme ça ?

[>P]: ben entre les deux un C. OCO. Est-ce que quelqu'un veut proposer autre chose, à part noter donc comme ça OCO horizontalement ou verticalement ?

[>E]: COO.

[>P]: par exemple (L'enseignant note au tableau la proposition) . Oui ?

[>E]: OOC.

[>P]: d'accord. Ensuite, c'était, tu levais la main Emma ?

[>E]: c'était ça.

[>P]: c'était ça aussi. D'accord. Si après comme tout à l'heure je vous repropose une molécule avec beaucoup plus d'atomes, ça va être très long aussi. On va commencer à se rapprocher tout doucement de ce qu'on a parlé tout au début et de ce que vous connaissez déjà depuis la sixième. À votre avis, comment on va faire intervenir la quantité, la proportion chimique ? Oui.

[>E]: ben avec des chiffres.

[>P]: oui, d'accord. Donc là ça va donner quoi Justine ?

[>E]: ben CO deux.

[>P]: d'accord (L'enseignant note au tableau CO et le deux en indice) Pour le deux, est-ce que tu notes comme ça, ou est-ce que tu notes comme ça ? Ou est-ce que le notes comme ça ? (L'enseignant note le 2 en grand ou en exposant).

[>E]: le deuxième.

[>E]: le premier.

[>E]: le troisième.

[>P]: alors on va faire par le troisième, celui qui est pas bon. Donc si vous le mettez comme cela (exposant), cela vous fait penser plus à quoi en mathématique ?

[>E]: au carré.

25 - 36:10 > 38:31 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur seul]

Tag(s): chiffre, "indice", formule indéterminée, "molécule", "formule chimique", "atome", nom atome

[>P]: on va pas se mélanger. Déjà que vous avez énormément de choses à retenir dans votre tête, celui-là on va le laisser tomber. Entre les deux, c'est le premier qu'on va utiliser. On va laisser le chiffre en indice en bas à droite. Si vous remarquez par contre la façon dont c'est noté, le CO2 avec le 2 majuscule juste à côté. Ça revient exactement à ce qu'on avait tout à l'heure. Si vous remarquez eux, dans la façon de noter, pour bien indiquer CO2, ils mettent bien en grand le 2. Le 2 il est pas très bien noté, il devrait être noté en indice. La façon de noter, ça c'est plus publicitaire pour bien montrer que dans cette bombonne vous avez du dioxyde de carbone qui est présent. D'accord. Donc lorsque vous allez utiliser les formules chimiques, c'est tout un travail qui a été mis en place au fur à mesure par différents scientifiques pour aboutir après par ce modèle qui a été proposé par Berzelius et qui a été adopté donc à partir de ça c'est ce modèle-là qui a été utilisé pour établir les formules chimiques des molécules que vous allez représenter. Donc le but c'est d'indiquer quels types d'atomes vous avez : du carbone, de

l'oxygène et en quelle quantité ? Il y a juste quelque chose qui n'a pas été noté tout à l'heure mais qui est sous-entendu. C'est qu'à chaque fois vous avez un atome de carbone. Donc le 1 qui est mis à côté du C, il est entre guillemets pour l'instant sous-entendu. On fait le point sur la partie cours sur les deux façons de noter avec les modèles moléculaires avec les formules chimiques. Et ensuite après, on voit d'autres exemples pour voir si c'est compris. Vous me collez les deux feuilles si ce n'est pas déjà fait et on fait le point sur les exemples. Ce qui va apparaître au tableau, les deux premiers exemples, vous les notez pas. C'est la synthèse de ce que l'on vient de voir.

26 - 38:31 > 40:32 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, "atome", nom atome, chiffre, formule indéterminée

[>P]: si on prend le terme que vous connaissez, que vous avez appris, dioxyde de carbone (par contre l'exemple au tableau est monoxyde de carbone). En fait dans la plupart des noms, c'est pour ça justement que le nom a été changé, qu'on parle plus de gaz carbonique mais de dioxyde de carbone. Dans dioxyde de carbone, Noémie, quel est un des atomes qui te dit quelque chose ?

[>E]: carbone.

[>P]: carbone. Donc déjà vous savez qu'il y a du carbone. Est-ce que la partie oxyde, ça peut te dire quelque chose ?

[>E]: dioxyde.

[>P]: dioxyde ?

[>E]: oxygène.

[>P]: oxygène. D’accord. Et est-ce que le préfixe mono devant, tu sais pourquoi, pour combiner, quelle est la proportion ?

[>E]: un.

[>P]: un seul, tout à fait. Donc en fait lorsqu'on parle de monoxyde de carbone, vous avez en fait dans le nom du monoxyde de carbone, les quantités qui sont précisées et les atomes qui sont présents. Donc vous allez avoir un atome de carbone, donc un seul atome de carbone et un atome d'oxygène. Et vous retrouvez la formule que tout à l'heure Faustine a notée CO. La seule chose c'est que là les 1 ont été précisés (au tableau l'enseignant a noté C (1) O (1)). Donc vous avez dans la composition un atome de carbone et un atome d'oxygène. Tout à l'heure Faustine n'a pas noté les 1. Elle a noté directement CO. On est d'accord Marina que les 1 sont sous-entendus. Quand c'est la quantité 1, vous n'êtes pas obligés de les mettre. Si au départ, vous voulez les préciser C1O1 vous avez tout à fait le droit. Même chose aussi pour l'ordre, vous pouvez aussi inverser, noter OC. Vous pouvez aussi très bien noter de cette manière. Est-ce que Mégane, ça va ?

[>E]: oui.

27 - 40:32 > 41:15 [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique explicite] [Modèles moléculaires] [Professeur-Élèves]

Tag(s): couleur, "atome", nom atome, "molécule", modèle moléculaire

[>P]: juste après pour votre prochain TP, lorsque l'on se retrouvera la semaine prochaine, pour ceux qui seront encore là, est-ce que dans ton tableau au-dessus tu peux me rappeler la couleur de ton atome de carbone.

[>E]: euh, noir

[>P]: noir. Et la couleur pour l'atome d'oxygène

[>E]: rouge

[>P]: rouge

[>P]: tout simplement lorsqu'on vous demandera de construire cette molécule, lorsqu'on vous demandera de faire le schéma, vous mettrez tout simplement un atome de carbone, c'est-à-dire une bille noire, avec un atome d'oxygène c'est-à-dire une bille rouge. Si on vous demande de la construire. Donc les couleurs servent à ça, à construire les molécules que l'on vous présentera. Donc ça vous ne le notez pas, je vous le donne juste après. On fait tout de suite le deuxième qu'on vient de voir, le dioxyde de carbone.

28 - 41:15 > 42:55 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, "atome", chiffre, "molécule"

[>P]: même chose, si vous décortiquez le mot, dioxyde de carbone. On va reprendre avec Noémie, quel atome tu peux retrouver ?

[>E]: carbone

[>P]: carbone. Combien a ton avis ?

[>E]: deux

[>P]: est-ce que devant carbone, on précise quelque chose ? Une quantité ou pas ? Donc si on précise pas de quantité, à ton avis la quantité la plus simple ?

[>E]: un atome

[>P]: Si c'était zéro, est-ce que tu es d'accord, si c'était zéro il y aurait pas de carbone. Donc on aurait juste dit dioxyde. Comme tu précises le mot, ça veut dire qu'il est quand même présent. Donc t'auras un carbone dans la molécule. Après dans la suite, le dioxyde, ça veut dire quoi pour toi ?

[>E]: deux quelque chose

[>P]: le di c'est pour deux on est d'accord. Et oxyde, tu me l'as dit tout à l'heure, c'est pour ?

[>E]: oxygène

[>P]: oxygène, tout à fait. Donc vous allez avoir deux atomes d'oxygène.

[>P]: donc dans votre molécule de dioxyde de carbone, vous allez avoir un atome de carbone et deux atomes d'oxygène. Tout à l'heure, je me suis trompée quand j'étais sur le premier exemple. C'est là que cela a changé. Quand avant on vous parlait du gaz carbonique, vous aviez juste le terme carbone dans gaz carbonique. Il y avait pas présence de dioxyde. Donc c'est pour ça qu'ils ont changé le terme. Au lieu d'appeler gaz carbonique, ils ont appelé cela dioxyde de carbone. Ça vous permet dans le nom

de repérer les atomes qui sont présents et qui constituent votre molécule. Avez-vous des questions jusque-là ?

[>E]: non

[>P]: non parfait Mégane.

29 - 42:55 > 44:30 [Transition]

[>P]: vous avez les deux exemples qui sont notés les uns en dessous des autres. Vous collez ces deux-là. Et celui que l'on va faire ensuite, ce sera à noter. (Les élèves collent dans leur cahier) Pour le schéma, on verra quand on construira la molécule que vous aurez un atome de carbone avec deux atomes d'oxygène. Ça on le reverra quand on commencera les modèles moléculaires la semaine prochaine. (Un élève distribue le nouvel exemple)

30 - 44:30 > 47:17 [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique non défini] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "molécule", nom molécule, empirique, nom indéterminé, formule indéterminée, formule molécule, "formule chimique", symbole indéterminé, "atome", nom atome

[>P]: on passe à une dernière molécule pour finir, en sachant que là c'est pas la peine de lire Kelly parce qu'on va le faire ensemble. Une autre molécule qui est très souvent utilisée dans pas mal de produits (l'enseignant montre au tableau des publicités de cosmétique et produits alimentaires). Si on vous présente ce produit-là quelle est la molécule qui ressort ?

[>E]: H2O

[>P]: d'accord. Que vous avez pour ce produit-là. Que vous avez pour des boissons. Ou si on vous demande par exemple pour une boisson chocolatée, on va vous indiquer par exemple de dissoudre votre produit chocolaté dans de l'eau chaude. Donc le terme H2O revient assez fréquemment dans pas mal de produits alimentaires ou de produits cosmétiques.

[>E]: c'est de l'eau ?

[>P]: C'est de l'eau tout à fait. H2O, c'est l'eau. Si tu dois me donner la composition, qu'est-ce que tu me dirais pour la constitution de la molécule d'eau ? Quelles lettres tu vois sur la formule chimique ? Est-ce que H tu te souviens de ce que ça veut dire ? Sinon tu fais un petit retour en arrière dans ton tableau.

[>E]: ah oui d'accord en arrière.

[>P]: non mais si elle a placé sa feuille à la fin. J'ai pas entendu.

[>E]: hydrogène.

[>P]: hydrogène d'accord. Et l'autre lettre O.

[>E]: l'oxygène.

[>P]: oxygène. Donc là on vient de préciser par rapport à ce qu'on avait dit, les lettres alphabétiques. Tu sais qu'il y a de l'hydrogène et de l'oxygène. Est-ce que maintenant tu peux me préciser les proportions. C’est - à - dire les quantités de chaque atome ?

[>E]: deux hydrogène et un oxygène

[>P]: d'accord. Essaie au départ de préciser plus : deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène. Au fur et à mesure. Donc le but c'est de donner la composition de la molécule d'eau.

[>P]: donc ça par contre vous le notez à la suite. C'est l'exemple 3 : la molécule d'eau. Je vous laisse noter la formule au centre et on indique la composition que Noémie a précisée. (L'enseignant montre au tableau la molécule d'eau) les deux premières parties donc H2. Vous allez avoir donc H c'est pour l'atome d'hydrogène et le 2 en quantité donc 2. C'est-à-dire que vous aurez deux atomes d'hydrogène. Le O qui est seul à côté, vous aurez donc un seul atome d'oxygène. Matisse, il y a quelque chose qui t'embête

[>E]: non (inaudible)

[>P]: d'accord

31 - 47:17 > 49:45 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique explicite] [Travail individuel]

Tag(s): "molécule", chiffre, "atome", nom atome, formule molécule

(Les élèves recopient ce qu'il y a écrit au tableau)

[>P]: (l'enseignant passe parmi les élèves) Au fur et à mesure que vous noterez après pour les suivantes mettez un petit moins de place entre les deux si c'est possible. Pour indiquer que tu as quelque chose de bien groupé. (Les élèves travaillent individuellement). Encore une fois pour la molécule, si vous précisez pas le 1 dans O1, c'est la même chose, il est sous-entendu. (L'enseignant intervient pour redonner les consignes) Donc soit au départ vous le précisez pour vous habituer, si après vous avez compris que le 1 était sous-entendu, vous l'enlevez, vous mettez juste H2O. Par contre bien sur le 2 vous le sous-entendez pas. Il est bien présent, il faut pas l'oublier. Il y a deux atomes d'hydrogène dans la molécule d'eau. (Les élèves finissent le travail sur la molécule d'eau). Ceux qui ont fini de noter, vous me ferez rapidement le dernier exemple.

32 - 49:45 > 51:18 [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Langage symbolique implicite] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom indéterminé, "atome", symbole atome, chiffre

[>P]: dihydrogène, est-ce que dans le mot dihydrogène il y a un atome qui ressort, Mégane ?

[>E]: hydrogène.

[>P]: quel est le symbole ?

[>E]: H

[>P]: H. devant le mot hydrogène tu as quel préfixe ?

[>E]: di.

[>P]: le di on avait par rapport à ce qu'on avait déjà parlé tout à l'heure ce que ça représente quelle quantité ?

[>E]: non

[>P]: dans dioxyde, on avait dit qu'il y avait deux atomes d'oxygène donc di c'est pour ?

[>E]: 2.

[>P]: le deux, je vais le placer où Mégane ?

[>E]: après.

[>P]: en haut, à droite, à gauche.

[>E]: en bas.

[>P]: en bas. Et tout simplement, si on te demande la composition, le dihydrogène c'est constitué de ?

[>E]: deux.

[>P]: deux atomes ? Et le H c'est pour ?

[>E]: hydrogène.

[>P]: Hydrogène. Tu as deux atomes d'hydrogène. OK. (Les élèves notent le dernier exemple). Donc votre molécule de dihydrogène, elle est constituée de deux atomes d'hydrogène.

33 - 51:18 > 51:36 [Professeur seul]

Tag(s): "molécule", "formule chimique", modèle moléculaire

[>P]: vous revoyez bien ce que l'on a fait aujourd'hui sur la partie formule chimique des molécules puisqu'on s'en servira pour construire les modèles moléculaires. Donc voir visuellement les molécules ce que ça donne, les construire et après finir le chapitre.

Annexe 24 : Entretien 3 avec Mathieu

[>I]: alors toute première question, c'est ce que tu as fait avant et ce que tu comptes faire après.

[>P]: juste avant, j'avais attaqué les atomes, comme quoi les plus petites particules, donc les atomes, avec les symboles pour attaquer la définition des molécules et là après ça, comme je leur ai indiqué, on fait la partie TP sur les modèles moléculaires. Après je finis avec l'interprétation des transformations chimiques.

[>I]: et l'objectif de ta séance ?

[>P]: C'est la formule chimique de la molécule

[>I]: et par rapport à la séance de l'an dernier, tu as gardé quoi ?

[>P]: j'ai gardé juste la même partie sur la fin, lorsque je présentais les différentes molécules avec le diaporama. Ça j'avais gardé pour faire le point avec les deux parties oxyde carbonique et dioxyde de carbone. Et après pour enchaîner avec deux ou trois autres exemples, suivant le temps que j'avais.

[>I]: et au niveau des objectifs, tu as gardé les mêmes que ceux de la séance que nous avions vue l'an dernier ?

[>P]: ben là en fait, il y avait l'objectif entre guillemets que tu m'avais demandé d'essayer de faire, proposer les modèles qui ont été travaillés avant pour essayer de leur faire comprendre l'évolution et ensuite après avoir le modèle que l'on a actuellement.

[>I]: et donc dans ce que tu as changé, est-ce que tu peux dire pourquoi tu as fait ces changements ?

[>P]: dans les changements et bien c'est ce dont on avait parlé l'année dernière : pourquoi on met le C avant ou le O. Leur montrer qu'il y avait plusieurs possibilités. Après c'était juste une norme qu'on plaçait le carbone. Après c'est vrai que le fait de proposer comme cela historiquement, c'était la partie qui m'intéressait dans les documents que tu m'avais donnés. C'était comment on est arrivé petit à petit à la partie de Berzelius. Voilà.

[>I]: et donc justement puisque tu parles des documents, il y avait beaucoup de choses.

[>P]: oui beaucoup de choses

[>I]: justement pourquoi tu as fait ces choix ?

[>P]: alors dans ce que tu avais proposé, il y avait aussi une partie temps où je savais que je ne pouvais pas tout faire. Ce qui m'embêtait dans la partie où justement. Enfin c'était intéressant de travailler avec justement les proportions ave la partie de Lavoisier. La seule chose, ben on en avait discuté un petit peu, c'était par rapport à la partie expérimentale. C'est vrai que le but était d'essayer de montrer qu'il y avait deux fois plus de tel produit, d'hydrogène ou d'oxygène, c'est ça, par rapport à la synthèse de l'eau. Et on avait dit que justement en proposant l'expérience c'était pas évident de faire la synthèse de l'eau. Cela commence à devenir dangereux. C'est pour ça dans cette partie-là j'aurais bien voulu voir plus à partir d'une expérience. Et là après la partie synthèse, je me voyais mal faire la synthèse de l'eau. [...] C'est pour ça que je suis plus partie les modèles qui étaient proposés. Et après aussi honnêtement je sais que ça ça va plus les intéresser que ce qui était proposé ailleurs dans ce que tu m'as donné.

[>I]: et alors qu'est-ce que tu penses des changements ?

[>P]: de tels modèles, ils ont réussi à comprendre plus ou moins comment ça s'est construit au fur et à mesure. Ça je pense que ça a accroché. Comme je parle aussi du côté esthétique, ça aussi forcément ça accroche. Donc même après avec cette forme-là. Mais moi ce que je voulais voir après avec la question trois c'était les limites des modèles de passer à quelque chose de plus simple pour éviter de traîner toutes les billes ou tous les traits. Voilà.

[>I]: et par rapport à la séance de l'an dernier ? Puisque c'est la première fois que tu essaies.

[>P]: en sachant que je l'avais travaillé déjà une première fois avec une autre classe de quatrième. Ben globalement, ben ils ont plus de questions lorsque l'on travaille avec les modèles moléculaires. Puisqu'avec les autres quatrièmes j'ai une séance de décalage avec eux, et c'est vrai que quand ils construisent les modèles moléculaires, par exemple avec ce qu'on avait fait, ils se rendent compte qu'ils peuvent pas mettre par exemple cinq hydrogènes à la suite avec après du carbone. Cela leur permet peut-être de mieux comprendre ça.

[>I]: je ne comprends pas, cela leur permet de mieux comprendre ça ?

[>P]: ben par exemple quand je leur demande de construire la molécule de méthane, il y en a certains qui dessinent un carbone, un hydrogène, un hydrogène, un hydrogène, un hydrogène. Avec le modèle par exemple de Dalton, au départ je ne leur demande pas de faire une construction rigoureuse, comme tout à l'heure lorsqu'elle a fait son choix esthétique. Voilà pour l'instant je garde sa représentation et après en passant aux modèles moléculaires, ils se rendent compte qu'il y a des contraintes pour la constitution.

[>I]: oui et comment tu les expliques ces contraintes.

[>P]: après je leur explique tout simplement que pour l'hydrogène il peut se lier qu'une seule fois. Je m'arrête juste là.

[>I]: et tu parles de liaison

[>P]: oui.

[>I]: et c'est indispensable ?

[>P]: après on en avait parlé l'an dernier soit de liaison soit de regroupement. Mais j'emploie le terme liaison, oui. Il faut vraiment le bannir ce terme de liaison ?

[>I]: je sais pas.

[>P]: Parce qu'après quand ils mettent la tige entre les, ils voient bien qu'il y

[>I]: mais faut-il qu'ils mettent des tiges entre deux boules ?

[>P]: d'accord. Donc à ce moment-là, tu partirais qu'avec les modèles compacts ?

[>I]: mais même sans modèle.

[>P]: d'accord.

[>I]: ben ou parce que là c'avait l'air de leur plaire les boules.

[>P]: oui tout à fait. Mais après le fait qu'après le fait on soit pas dans la réalité, ça pose problème ou pas ? Parce qu'après s'il y a un élève qui me dessine le dioxyde de carbone justement avec oxygène, oxygène, carbone.

[>I]: ben tant qu'on a pas parlé de liaison.

[>P]: peu importe. D’accord.

[>I]: tant qu'on a pas parlé de liaison, il y a pas de contrat.

[>P]: c'est quelque chose qui peut venir après.

[>I]: ben oui. Je ne crois pas que ce soit un des objectifs clairs du programme. Cela en devient un en lycée.

[>P]: parce que je sais comme avec les modèles que je leur donne avec les tiges, j'ai les deux représentations. J’ai même une représentation coudée. Ils dessinent ça et j'accepte. Après, ce que j'aime bien aussi c'est qu’ils soient intéressés quand ils construisent les molécules comme dioxyde de soufre ou l'eau avec la tête de Mickey, là tout de suite ils accrochent aussi. C’est pour ça que le côté réaliste, moi ça m'intéresse. Quand on peut les accrocher avec quelque chose d'un petit peu marrant c'est intéressant. Voilà pourquoi je respecte la réalité. Parce qu'après quand vous derrière vous étudiez tout ça, vous estimez que ça les embête ou que ça peut les perturber ?

[>I]: je sais pas. On n'a pas vraiment travaillé sur ce point. On peut trouver que le modèle moléculaire devient une réalité pour les élèves.

[>P]: ils ont pas encore assez de recul entre modèle et réalité.

[>I]: oui mais il faudrait sans doute appeler autrement les modèles moléculaires car ce n'est pas un modèle, au sens épistémologique du terme. Je sais bien que cela leur fait faire quelque chose mais est-ce qu’il ne vaudrait mieux pas bannir ces boules et ces billes pour qu'ils fassent effectivement des transformations chimiques. Après pour eux une molécule ce sont ces boules et ils peuvent construire les molécules.

[>P]: et même par exemple l'explication lorsque l'on fait la combustion du méthane, les deux molécules avec une molécule de dioxygène pour se rendre compte que quand ils les détruisent toutes pour après un réarrangement pendant la transformation chimique et qu'ils se rendent compte qu'il manque quelque chose.

[>I]: mais on peut très bien le faire avec les boules comme tout à l'heure, s'il y a le bon nombre. [...] Qu'est-ce que cela apporte de plus qu'ils manipulent les modèles moléculaires ?

[>P]: juste le côté ludique. Après il y a toujours manipulation mais cela me permet aussi de vérifier s'ils ont bien compris la partie composition et formule chimique. Parce que des fois, je leur donne seulement le nom et je leur demande de trouver la composition. Après je peux bannir la colonne schéma.

[>I]: dans quel registre tu te situes microscopique, macroscopique celui des représentations et empirique. À quel niveau tu penses te situer dans ce que tu as proposé aujourd'hui et l'an dernier également ?

[>P]: pour moi l'année dernière on était microscopique après forcément avec les modèles. Par contre après cette année, je resterais dans le microscopique. Pour moi ça reste dans le même registre.

[>I]: est-ce que tu te rappelles les questions que tu posais l'an dernier et est-ce les mêmes ?

[>P]: c'est les mêmes. Globalement, c'est les mêmes. Il y a des questions différentes sur la partie historique parce que je travaillais sur la façon dont ça s'est mis en place. L’année dernière je faisais pas cette partie. Et je ne connaissais pas Berzelius, Hassenfratz, Dalton oui.

[>I]: qu'est-ce que tu as supprimé dans ce que tu faisais l'an dernier pour proposer la partie historique.

[>P]: par rapport à l'an dernier, j'ai supprimé le côté très rigoureux où il fallait absolument C, absolument O. Là, plus de liberté dans la façon de noter leur formule chimique. Surtout ça. Leur laisser plus de liberté sur la façon de noter leur formule chimique.

[>I]: qu'est-ce que tu penses de l'intérêt de travailler à partir de textes historiques ?

[>P]: ben moi ce qui m'a intéressé, c'est de reprendre justement comment on le travaille avec l'air même si l'année prochaine on en parle plus trop sauf un tout petit peu de la composition de l'air à partir de Lavoisier. Après ça permettait de leur expliquer déjà une première fois que c'est là qu'il y a eu pas mal d'évolution pour la chimie moderne et donc c'est ça qui m'a intéressé.

[>I]: qu'est-ce que tu penses du travail sur les différents langages ?

[>P]: les différents modèles tu veux dire ?

[>I]: oui Hassenfratz, Dalton, Berzelius. Est-ce que tu as eu l'impression que cela avait un intérêt ?

[>P]: ceux qui ont été interrogés, c'est Dalton avec les billes.

[>I]: non mais toi l'intérêt de faire travailler les élèves sur ces sujets.

[>P]: l'intérêt, c'est tout simplement leur montrer que c'est pas venu comme cela du jour au lendemain. Qu'il y a un travail très important derrière qui a été mis en place et pendant plusieurs années. Pour essayer de leur expliquer comment ça arrive progressivement l'idée de formule chimique.

[>I]: est-ce que tu penses que cela peut aider les élèves.

[>P]: ça pour l'instant je peux pas te répondre. Il faudra que je voie l'année prochaine quand je les aurai en troisième.

[>I]: "et dans l'autre classe.

[>P]: oui ils ont en tête justement. Ils m'ont reparlé des billes de Dalton. C'est vrai qu'ils ont dit, tiens ça fait pas comme ce qu'on avait vu avec tel ou tel modèle. Ils indiquaient qu'ils avaient plus de liberté que lorsqu'ils utilisaient les modèles moléculaires.

[>I]: l'eau apparaît dans ce que je t'ai proposé et est-ce que tu vois pourquoi on propose l'eau et un travail autour de cette réaction avec l'eau.

[>P]: ben le travail c'est surtout le travail par rapport à la proportion. Par rapport à la transformation chimique, non.

[>I]: oui mais pas que. Tu n'as jamais un élève qui te dit pourquoi H2 et pas H ?

[>P]: pourquoi il y a deux atomes d'hydrogène ? Non ça non. Pourquoi c'est pas HO ?

[>I]: mais H pour le dihydrogène.

[>P]: non ça non. À la rigueur, ce que je peux avoir c'est D majuscule pour le dihydrogène mais après non j'ai jamais posé cette question-là.

[>I]: parce qu'est-ce qui justifie qu’une molécule est composée de deux atomes ?

[>P]: ça c'est du domaine de l'empirique. C’est d'après les résultats expérimentaux.

[>I]: mais là on le donne aux élèves et on le justifie pas.

[>P]: oui je le donne sans le justifier. Donc toi après le travail c'est ça, c'est de trouver la justification. [...]

[>I]: jamais les élèves t'interrogent là -dessus. Pourquoi c'est CO2, CO ?

[>P]: non ça j'ai pas ces questions-là.

[>I]: tu présentes les symboles qui peuvent être utilisés mais tu les as déjà introduits ?

[>P]: avec les atomes, j'en ai déjà parlé une première fois oui. Donc j'ai déjà parlé du modèle de Berzelius. Ça c'était pour présenter les atomes. Après comme je sépare atomes et molécules, c'est pour ça que j'avais déjà introduit les symboles des atomes. Parce que je savais aussi que quand j'allais faire cette séance-là, Berzelius avait déjà parlé des lettres alphabétiques, c'était pour me raccrocher par rapport à ça.

[>I]: parce que tu aurais pu introduire les symboles dans cette séance sans les faire avant ?

[>P]: oui j'aurais pu aussi. C'est vrai qu'après j'aurais pu directement partir. C'est vrai.

[>I]: Parce que là finalement tu leur as fait utiliser d'autres symboles des atomes. Je ne sais plus si tu as parlé de symbole des atomes quand tu as parlé des autres symboles.

[>P]: pour l'instant j'ai évité de parler symbole mais par contre j'ai essayé plus de reprendre dans le texte de Berzelius, le terme de lettres alphabétiques. [...] (L'interviewer reprend le développement historique des formules de l'eau et des gaz dihydrogène et dioxygène ce qui fait réagir l'enseignant). Je pense que j'ai bien fait d'être resté là -dessus car j'ai pas autant développé ce dont tu es en train de me parler par rapport à HO. Je pense que je n'aurais pas fait cette partie-là. [...]

[>I]: on observe une difficulté des élèves pour associer aux formules des critères macroscopiques et dans les livres le glissement du microscopique au macroscopique se fait de façon implicite au moment des formules.

[>P]: et c'est quelque chose sur lequel il faudrait plus insister ?

[>I]: sans doute. Justement le gaz carbonique. Gaz c'est un état de la matière

[>P]: oui.

[>I]: donc on est nécessairement au niveau macroscopique. Alors que quand on passe à dioxyde de carbone, là ça peut aussi bien vouloir dire l'espèce que la molécule. Alors qu'avec le gaz carbonique, on sait que c'est du niveau macro.

[>P]: c'est donc à nous de le préciser ?

[>I]: ah oui, les élèves ne peuvent pas savoir que cela peut vouloir dire les deux. Ils ne peuvent pas deviner. Il faut les aider à ce niveau.

[>P]: OK d'accord. Chose que je ne fais pas.

[>I]: quand tu mets des images publicitaires, tu es bien au niveau macro.

[>P]: on est d'accord.

[>I]: pour les publicitaires, c'est une façon de désigner l'eau.

[>P]: le produit qu'ils utilisent. Non mais je vais, d'accord, plus insister sur la partie.

[>I]: et Hassenfratz et Adet sont sur des symboles macroscopiques. Dalton on est dans le micro

[>P]: et est-ce que pour après pas faire d'erreur, est-ce que toi tu proposes une façon de glisser du microscopique vers le macroscopique ? Est-ce qu'il y a une façon de présenter ?

[>I]: on pourrait mettre les symboles des états de la matière. Et suivant le contexte, cela désigne une espèce chimique, donc une quantité énorme de molécules ou d'atomes. Et il y a des moments où on s'intéresse à deux ou trois seulement.

[>P]: d'accord. Donc c'est juste à préciser en fonction du contexte.

[>I]: oui de savoir de quoi on parle et que les élèves le sachent.

[>P]: donc là par contre si dans l'équation de réaction, si tu proposes avec les états de la matière.

[>I]: alors les équations, c'est forcément l'espèce chimique.

[>P]: et donc là on est dans le macroscopique. D'accord.

[>I]: c'est des bilans de matière. Et on pourrait alors ajouter les symboles des états de la matière.

[>P]: et ça pour l'année prochaine dans les programmes, c'est des lignes très simples et tu mets un peu ce que tu veux. Donc nous honnêtement on nage. Et est-ce que c'est demandé implicitement d'essayer de le faire.

[>I]: non. Objectifs de deux trois ans de diffuser des propositions construites.

[>P]: Par contre là ce qui a été fait, est-ce que cela correspondait à ce que tu voulais ? Ou est-ce que c'est en décalage ?

[>I]: c'est pas ce que je veux ou je ne veux pas. C'est ce qui est possible de faire. Ce que les enseignants peuvent faire de ces outils. C'est vous qui avez l'habitude des élèves. [...]

[>I]: j'ai vu que tu parlais aux élèves du tableau périodique.

[>P]: j'en parle mais je leur indique pas de différence entre éléments et atomes. Faire la différence avec eux au collège, si peut-être si ça se met en place, mais sinon je leur dis que c'est les atomes qui sont regroupés dans la classification périodique.

[>I]: cela pourrait peut-être s'introduire dès la cinquième avec la notion de corps pur qui pourrait être travaillée avec la notion de corps simple et de corps composé. Corps simple : un élément, corps composé deux éléments

[>P]: d'accord.

[>I]: et là il pourrait y avoir introduction des symboles, sans parler de molécules ou d'atomes et qui serait une introduction macroscopique. Un nom serait associé un symbole. On pourrait dire que l'eau est composée de l'élément oxygène et de l'élément hydrogène.

[>P]: l'eau pure est un corps composé de l'élément oxygène et de l'élément hydrogène.

[>I]: oui.

[>P]: d'accord. Et par contre comme dans le nouveau programme, ils en parlent pas mal de faire la différence entre transformation physique et transformation chimique et mélange aussi. Donc transformation physique on est d'accord qu'on garde le même corps, on change juste d'état.

[>I]: mélange c'est une transformation physique.

[>P]: on est d'accord.

[>I]: transformation, en thermodynamique, tu as au moins un paramètre caractéristique de l'état qui change. Transformation physique, cela ne change pas la nature des espèces chimiques. Par exemple un mélange eau - éthanol, c'est une transformation physique.

[>P]: mais par contre donc là lorsque tu mets de l'eau et de l'éthanol ensemble, quel est le paramètre qui change, juste le volume ?

[>I]: la masse volumique par exemple.

[>P]: mais est-ce que pour l'eau et l'huile, c'est un mélange hétérogène, est-ce que tu dis aussi que c'est une transformation physique ?

[>I]: on peut si on veut. C'est vrai que j'associais plutôt à mélange homogène. De l'eau avec de l'huile, tu gardes les deux liquides séparés.

[>P]: moi j'étais surtout sur les changements d'état. Et sur mélange, j'étais entre guillemets sur le terme inerte mais je ne sais pas si c'est intéressant à dire ou pas. Si c'est une faute ?

[>I]: c’est-à-dire ?

[>P]: que par rapport à la transformation chimique, il n'y a pas de réaction entre les deux.

[>I]: mais mélange c'est une réunion. Tu pars a priori de deux corps différents et tu les mets ensemble et sans que l'intégrité de ces corps change.

[>P]: d'accord.

[>I]: en transformation chimique, les entités changent mais je ne mettrais pas inerte. Il s'en passe des choses dans les dissolutions par exemple. Des liaisons intra moléculaires, des contractions de volume, etc.

[>P]: alcool- eau il y a une contraction de volume.

[>I]: oui il se passe pas mal de choses. Mais c'est difficile au collège de donner des définitions correctes aux élèves.

[>P]: c'est comme là quand tu parles d'espèces chimiques, espèces chimiques c'est le terme le plus général pour caractériser quelque chose.

[>I]: on dit substance. C’est un corps pur. Une espèce chimique c'est un corps pur. Substance, espèce chimique, corps pur, tout ça c'est pareil.

[>P]: et après quand tu parles de corps pur, tu es plus en microscopique

[>I]: non macro. Les trois mots on est sur du macro.

[>P]: parce que l'année prochaine, ils insistent bien sur la différence entre transformation physique et transformation chimique. [...] Le modèle particulaire pourrait être fait dès la cinquième

[>P]: ben moi je vais le remettre en cinquième parce qu'il l'avait enlevé. Mais je vais commencer à le retravailler tout doucement en cinquième.

[>I]: corps pur mélange sans modèle particulaire ce n'est pas facile.

[>P]: oui bien sûr.

[>I]: et donc faire les deux, le macro et le micro.

[>P]: on est bien obligé quand on fait au niveau du modèle de revenir au niveau microscopique

[>I]: on pourrait rester au niveau macro

[>P]: mais après pour justement expliquer toutes ces petites entités qui ont plus d'espace.

[>I]: pour l'interprétation microscopique, oui mais on peut déjà commencer par le présenter macroscopiquement.

[>P]: le macroscopique ce sera le point de départ et après pour l'interprétation.

Annexes 25 : Documents donnés aux élèves - Séance 3 (Mathieu)

Annexe 25.1 Document 1

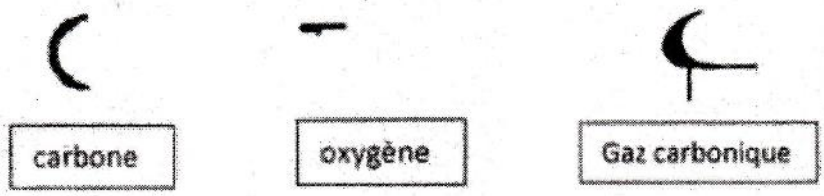
Extrait d'un texte de Dalton (1808) (texte transformé)

« L'oxyde carbonique est un composé binaire, formé d'un atome de carbone et d'un oxygène ;

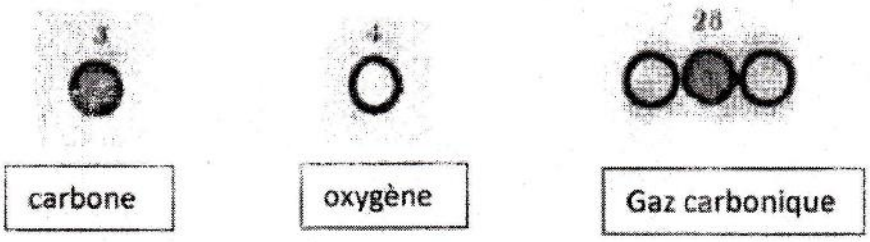
Le gaz carbonique (ancien nom du dioxyde de carbone) est un composé ternaire formé d'un atome de carbone et de deux d'oxygène. »

Deux exemples de symboles sont proposés pour représenter ces deux molécules :

Exemple de symboles n ° 1 : Symboles proposés par Hassenfratz et Adet (1787)



Exemple de symboles n ° 2 : Symboles proposés par Dalton (1808)



1) Parmi les deux exemples de symboles proposés ci-dessus, lequel choisiriez-vous pour représenter la composition du gaz carbonique proposé dans le texte de Dalton.

2) Après avoir choisi votre modèle, quelle représentation proposeriez-vous pour l'oxyde carbonique ?

3) On vous demande de représenter une molécule possédant dix atomes.
La représentation de cette molécule vous semble – t'elle réalisable avec les modèles proposés ?

Annexe 25.2 Document 2

Extrait d'un texte de Berzélius (1819) (texte transformé) :

« Lorsque nous essayons d'exprimer les proportions chimiques d'un corps composé, nous trouvons qu'il est nécessaire d'avoir des signes chimiques pour énoncer brièvement et avec facilité le nombre d'atomes élémentaires qui se trouve dans chaque corps composé.
Pour cela, les signes chimiques doivent être des lettres alphabétiques pour pouvoir être facilement tracés et imprimés. »

A partir de la proposition de Berzélius ci-dessus, donner la formule de l'oxyde carbonique (ou monoxyde de carbone) et du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone).

Annexe 26 : Documents donnés aux élèves - Séance 4.1 (Benjamin)

Physique-Chimie *4ème*

Formule des molécules des corps composés.

Sagredo: N'est-il pas vrai que monsieur Lavoisier a réussi à décomposer de l'eau en gaz oxygène et en gaz hydrogène?

Salviati: C'est parfaitement exact. Tous les chimistes sont maintenant d'accord sur ce point. L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé. Dans le nouveau système proposé par monsieur Dalton, tout corps est formé d'un assemblage de particules qui peuvent être elles-mêmes des combinaisons d'autres particules ultimes appelées atomes. Un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3 etc. atomes d'un autre élément, toujours avec des nombres entiers d'atomes jamais avec des fractions d'atomes. La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène H et d'atomes d'oxygène O. La combinaison de ces atomes forme une molécule d'eau.

Questions:

** Donner la différence entre un corps simple et un corps composé.*

** L'atome d'hydrogène est représenté par la lettre H. Celui d'oxygène, par la lettre O. Ces lettres écrites en majuscule d'imprimerie sont les **symboles** de ces éléments chimiques. On peut être tenté de retenir que les symboles des éléments chimiques sont formés par la première lettre de leur nom, écrite en majuscule. Pour le carbone ce sera C, le soufre S, le fluor F, l'iode I,... Ce n'est pas toujours le cas car le calcium sera représenté par Ca, le chlore Cl. Le sodium a pour symbole Na (nom latin: natrium) et l'azote N (nom latin: nitrium). Les symboles seront donc appris par cœur car il n'y a pas de règles à appliquer. Une molécule qui est un assemblage d'atomes, est représentée par une **formule** chimique.*
Nous avons vu que l'air est constitué d'un mélange de différents gaz qui sont entre autres: le dioxygène (de formule O_2), le diazote (de formule N_2), le dioxyde de carbone (de formule CO_2). Classer ces espèces chimiques en corps simples et composés.

Sagredo: Et dans ce cas, comment pourrions-nous écrire la formule de cette molécule d'eau?

Simplicio: Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée comme guide dans toutes les recherches sur la synthèse chimique: quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire, à moins qu'une certaine cause indique le contraire. de l'application de cette règle, nous pouvons tirer la conclusion suivante: la molécule d'eau est une combinaison binaire d'atome d'hydrogène et d'atome d'oxygène.

** Quelle formule chimique correspondant à la molécule d'eau peut-on proposer à ce stade du dialogue?*

Séquence: Formules chimiques à partir d'un dialogue. *1*

Salviati: Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience, et n'a peut-être pas agi avec assez de précaution en appliquant sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie. Monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène. Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il parait plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

** Rappeler les différents volumes de chaque gaz utilisé pour obtenir de l'eau:*

** Ecrire la formule chimique de l'eau proposée par monsieur Berzelius:*

Simplicio: La formule HO peut très bien s'expliquer. 2 volumes de gaz hydrogène se combine avec 1 volume de gaz oxygène. Comme nous avons admis que la molécule d'eau est formée d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, il est clair que l'on peut dire que l'atome d'oxygène est représenté par 1 volume de gaz oxygène et que l'atome d'hydrogène est représenté par 2 volumes de gaz hydrogène.

Sagredo: Mais ceci n'est-il pas une supposition gratuite?

Salviati: En effet, nous connaissons aujourd'hui un grand nombre d'exemples contraires à la règle des combinaisons de monsieur Dalton et notamment la molécule d'eau. De nombreux chimistes semblent s'accorder pour la formule H_2O. Ils s'appuient pour cela sur de nouvelles règles plus en accord avec l'ensemble des théories et des résultats expérimentaux à propos de la combinaison des atomes. Je vous présenterai ces règles un peu plus tard.

** Quelle formule chimique retenir pour représenter la molécule d'eau?*

** Peut-on retenir qu'il y a une relation entre les volumes des espèces chimiques et leurs formules traduisant une réaction chimique?*

Nom: .....Prénom:.....Classe:.....Date:.....

Annexe 27 : Documents donnés aux élèves - Séance 4.2 (Benjamin)

Physique-Chimie *4ème*

Comportement des Atomes et des Molécules lors des transformations chimiques.

I.- Quelques rappels.

- *La matière est constituée de particules identiques de taille extrêmement petite appelées atomes ou molécules.*
- *La taille des atomes est plus petite que celle des molécules.*
- *Une molécule se présente en générale comme un assemblage d'atomes liés.*
- *Les Chimistes représentent les atomes par des symboles*

Atome	*Hydrogène*	*Oxygène*	*Carbone*	*Azote*	*Chlore*
Symbole	**H**	**O**	**C**	**N**	**Cl**

N.B: On peut être tenté de croire que les symboles des atomes sont les premières lettres de leur nom.

On doit apprendre par cœur les symboles des atomes.

II.- Les molécules et leurs formules.

Si les Chimistes utilisent des symboles pour désigner les atomes, les molécules sont représentées par des formules qui sont des ***associations de symboles.***

Quelques exemples:
Quelles sont les formules des quelques espèces chimiques suivantes ?

✓ - eau:

✓ gaz carbonique (ou dioxyde de carbone) :

✓ gaz oxygène (ou dioxygène) :

✓ gaz hydrogène (ou dihydrogène) :

Remarque:
On peut constater que ces formules sont formées par une association de symboles des atomes suivis quelquefois d'indices numériques qui ***désignent le nombre des atomes.***

- La molécule d'eau est constituée de : ..... .
- La molécule de dioxygène est constituée de :.....
- La molécule de dihydrogène est constituée de : .....

III.- Interprétation des transformations chimiques par des réarrangements des atomes dans les structures des espèces chimiques.

- Donner trois exemples de réactions (transformations) chimiques que nous avons vus en classe. Justifier les réponses (dire pourquoi ce qui est proposé est une réaction chimique).

- Compléter les cases précédentes par les noms des espèces chimiques qui réagissent (celles qui disparaissent) et celles qui se forment (celles qui apparaissent).

- Par quel nom désigne-t-on les espèces chimiques qui disparaissent ?

- Par quel nom désigne-t-on les espèces chimiques qui apparaissent ?

IV.- Notion d'équation chimique

➢ Ecrire les bilans des trois transformations (réactions) chimiques proposées précédemment:

*

*

*

*Au lieu d'écrire les bilans des réactions par les noms en toutes lettres des **réactifs** et des **produits**, les Chimistes utilisent leurs formules moléculaires et leurs symboles atomiques.*

Comment procéder ?

Rappelons que la formation des produits des réactions est due à la recombinaison des atomes des espèces chimiques qui constituent les réactifs.

Etude historique des équations de quelques réactions chimiques : *cas de la formation du gaz chlorhydrique.*

Sagreto
La mise en contact du gaz hydrogène et du gaz chlore permet d'obtenir le gaz chlorhydrique (le Chlorure d'hydrogène). Comment représentez-vous cela avec les formules de Monsieur Berzelius?

** Ecrire la formule chimique du gaz hydrogène : ……*

** Proposer la formule chimique du gaz chlore : ……*

**Proposer la formule chimique du gaz azote:……*

Simplicio:
C'est très simple. En me basant sur les combinaisons de Monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl.

** Ecrire le bilan de cette réaction chimique:*

……

** Ecrire en utilisant les formules, le bilan de cette réaction chimique (écrire l'équation chimique de cette réaction) :*

.....

** Y a-t-il le même nombre d'atomes de même type entre les réactifs et les produits ? Justifier.*

.....
.....

** La loi sur la conservation de la masse lors d'une transformation chimique est-elle observée dans ce cas ?*

.....

Salvati:
Monsieur Gay-Lussac, qui a posé en 1808 ses lois mémorables sur les volumes des gaz qui se combinent, a trouvé qu'un (1) volume de gaz hydrogène s'unit à un (1) volume de gaz chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique.

** Ecrire le bilan de la réaction précédente. En dessous de chaque réactif et du produit formé, noter le nombre de volume utilisé:*

Sagredo:
N'y a-t-il pas alors contradiction entre le fait d'obtenir une molécule de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur **Simplicio**, et deux volumes de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur **Salvati** ?

** Donner son avis en le justifiant.*

Simplicio:
L'explication la plus simple est qu'**1 volume** de gaz hydrogène plus **1 volume** de gaz chlore donne **2 volumes** de gaz chlorhydrique.

** Réécrire le bilan de la réaction chimique comme précédemment et noter les volumes utilisés pour chaque espèce chimique.*

.....

** Sachant qu'une réaction chimique se traduit par :*
- *un réarrangement des atomes des réactifs pour donner des produits ;*
- *une conservation du nombre et du type de chaque atome ;*
- *une conservation de la masse ;*

Proposer les formules des réactifs et notamment du produit dans l'équation de la réaction précédente.

**** Application :***

À ce stade de notre étude, la théorie des volumes paraît utilisable pour ***équilibrer*** *les équations chimiques : la combustion du carbone nécessite un volume de dioxygène et conduit à la formation de 1 volume de dioxyde de carbone.*

- Ecrire le bilan de cette réaction :

……

- Proposer les formules des réactifs et notamment du produit dans l'équation de cette réaction.

……

Annexe 28 : Transcription de la séance 4.1 à partir des dialogues historiques (Benjamin)

1 - 00:00 > 06:07 [Transition]

2 - 06:07 > 11:09 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "molécule", "matière", dimension, "particule", nom indéterminé, "élément", "atome", substance chimique, empirique

[>P]: nous allons faire un chapitre de rappel que nous avons appelé chapitre zéro. Nous avons abordé la notion de molécules, que nous avions vue en cinquième.

[>E]: ah oui.

[>P]: toute matière est constituée ? De quoi ?

[>E]: de molécules

[>P]: de molécules. Est-ce une très grosse particule de matière ou une très petite particule de matière ?

[>E]: très minuscule. On ne peut pas voir à l'œil nu.

[>P]: très minuscule. On ne peut pas voir à l'œil nu. On ne peut plus diviser

[>E]: insécable.

[>P]: insécable, c'est très bien.

[>P]: et alors cette idée de la matière qui est constituée de particules de taille extrêmement petite et nommées molécules. Qui a été le premier scientifique qui a proposé cette idée ?

[>E]: Démocrite.

[>P]: Démocrite. Démocrite a proposé que la matière était constituée de particules de taille extrêmement petite, invisibles à l'œil nu, insécables appelées molécules. Est-ce que cette idée a été partagée tout le temps ?

[>E]: il y a Aristote qui a écrit que la matière est composée d'eau et des quatre éléments.

[>P]: Aristote qui a proposé que la matière était constituée de quatre éléments donc une proposition différente de celle de ?

[>E]: Démocrite.

[>P]: quels sont les éléments qu'Aristote a proposés pour constituer la matière ?

[>E]: la terre, l'eau, le feu et l'air.

[>P]: donc la terre, l'eau, le feu et l'air. Quatre éléments qui constituent la matière. Et après, est que cela a été accepté indéfiniment ?

[>E]: oui cela a été confirmé par Dalton.

[>P]: cela a été confirmé ?

[>E]: parce qu'il a fait des expériences.

[>P]: qui a fait des expériences ?

[>E]: Dalton.

[>P]: Dalton a fait des expériences et a dit que l'idée d'Aristote était bonne ?

[>E]: oui.

[>P]: qui d'autre que lui ?

[>E]: Antoine Lavoisier avant il avait dit que la théorie des quatre éléments est fausse.

[>P]: donc voilà la théorie était fausse parce que ?

[>E]: parce qu'il avait réussi à décomposer l'eau et qui n'est donc pas un élément.

[>P]: il a réussi à décomposer l'eau donc l'eau ne peut pas être un élément. Et qu'est-ce qu'il a obtenu dans la décomposition de l'eau ?

[>E]: ben euh trois atomes, dans la molécule d'eau.

[>P]: alors dans la décomposition de l'eau, qu'est-ce que l'on a obtenu ? L'eau est formée de ?

[>E]: d'un atome d'oxygène et de deux atomes d'hydrogène.

[>P]: Il a dit il y a un atome ? Vérifiez bien. Oui que la molécule d'eau. Que l'eau était constituée de quoi dans sa décomposition ? D'autres éléments qui sont ? Oui.

[>E]: un seul type de particules.

[>E]: des atomes.

[>P]: dans la décomposition de l'eau, qu'est-ce que l'on a obtenu ?

[>E]: des atomes.

[>P]: qu'est-ce que Lavoisier a dit ?

[>E]: il a dit qu'il avait réussi à décomposer l'eau.

[>P]: oui en quoi ? Il a pas dit en ceci, en cela.

[>E]: non.

[>P]: Donc il a réussi à décomposer l'eau et il a dit que l'eau n'est plus un élément. D'accord ? Donc qu'est-ce que l'on a retenu finalement ? Que la matière était constituée de molécules et les molécules elles-mêmes étaient constituées d'autres particules de taille plus petite, appelées comment ?

[>E]: atomes.

[>P]: atomes. D'accord ? Donc cet historique nous montre qu'il y a eu un long débat. Est-ce que cela s'est passé en un seul jour ? Non.

[>E]: en plusieurs siècles.

[>E]: des siècles.

[>P]: des siècles. C'est donc un long débat, jusqu'à ce que l'on retienne au jour d'aujourd'hui que la matière est constituée de particules de taille extrêmement petite appelées des molécules elles-mêmes constituées de particules encore plus petites appelées.

[>E]: atomes.

[>P]: atomes.

3 - 11:09 > 11:31 [Transition]

4 - 11:31 > 12:25 [Modèle micro] [Professeur seul]

Tag(s): "modèle", "formule chimique"

[>P]: nous allons développer des notions en nous replongeant sur l'historique. Donc voir que les scientifiques ne débouchent pas directement comme cela à une notion. Cela est toujours l'objet d'un long débat, d'un échange de connaissances, d'expériences jusqu'à ce qu'une notion soit retenue comme exacte. D'accord. Alors. Aujourd'hui nous allons apprendre ce que c'est que la formule chimique d'une molécule.

5 - 12:25 > 15:26 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s): empirique, "mélange", nom indéterminé, formule indéterminée,

[>P]: nous avons vu dans le chapitre A , sur la composition de l'air, que l'air était constitué de quoi ? Qui peut me le rappeler ?

[>E]: de gaz.

[>P]: de gaz. Lesquels ? Attendez, je vais noter. L'air est un mélange constitué de ?

[>E]: diazote.

[>P]: de diazote. Quoi d'autre ?

[>E]: dioxygène.

[>P]: dioxygène. Quoi d'autre ? Est-ce que vous avez encore une autre idée ? Oui ?

[>E]: de l'argon.

[>P]: oui quoi d'autre ?

[>E]: de dioxyde de carbone.

[>P]: de dioxyde de carbone. De dioxyde de carbone. Et puis encore d'autres gaz. De dioxyde de carbone. Qui peut me donner un nom que nous pourrons utiliser pour désigner le dioxyde de carbone ?

[>E]: le CO2.

[>P]: ah le CO2 ! Donc dioxyde de carbone, est-ce que je vous ai déjà parlé du CO2 ?

[>E]: non (ensemble des élèves unanime).

[>P]: ou est-ce que vous l'avez appris ?

[>E]: l'an dernier en cinquième, en sciences.

[>P]: en SVT. Donc le prof de SVT vous a dit que le dioxyde de carbone, c'est le CO2. C'est ça ?

[>E]: oui (ensemble).

[>P]: Si je dis CO2, c'est la même chose que dioxyde de carbone.

[>E]: oui (ensemble).

[>E]: c'est juste l'abréviation.

[>P]: c'est quoi ?

[>E]: l'abréviation (ensemble).

[>E]: c'est une formule.

[>P]: qu'est-ce qui est une formule ? CO2 c'est ?

[>E]: une formule.

[>P]: une formule. C'est ce que nous allons apprendre aujourd'hui. Comment est-ce que l'on est arrivé à la formule. Comment on est arrivé à proposer cet ensemble de lettres suivi d'un nombre, de chiffres. Nous allons le voir dans le cas de l'eau. Je sais que pour l'eau je vous en ai parlé un peu. D'accord. Alors je redistribue ce document. Nous allons écrire ensemble.

6 - 15:26 > 18:40 [Transition]

(Distribution des photocopies)

7 - 18:40 > 20:16 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): formule indéterminée, nom indéterminé, substance chimique, "espèce chimique", "formule chimique", empirique

[>P]: alors nous avons vu que le dioxyde de carbone, vous l'avez vu en SVT, c'est le CO2. Il y a encore un autre nom pour désigner le dioxyde de carbone.

[>E]: (inaudible).

[>P]: plus simplement.

[>E]: le gaz carbonique.

[>P]: le gaz carbonique. Vous voyez, il y a un nom courant. Le gaz carbonique et lorsque vous avez fait un petit peu d'études vous rencontrez le mot dioxyde de carbone pour désigner la même

substance. Si vous avez encore un peu plus fait des études, vous rencontrez CO2, la formule. Comment arrive-t-on à proposer une formule à une substance chimique, à une espèce chimique ? C'est ce que nous allons voir aujourd'hui. Est-ce que cela a été fait en un seul jour ou bien c'est l'objet d'un débat, d'un échange entre les scientifiques comme nous l'avons vu dans la composition de la constitution de la matière. Ici je vous propose un dialogue avec des échanges entre des scientifiques ou ce que les scientifiques ont découvert. Paul, tu peux lire.

8 - 20:16 > 21:13 [Travail individuel]

(Lecture du texte par deux élèves)

9 - 21:13 > 22:27 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): nom indéterminé, "particule", "atome", "corps composé", nom atome, symbole atome, nom molécule, empirique

[>P]: bien donc là Salviati a dit c'est parfaitement exact. Tous les chimistes sont maintenant d'accord sur ce point. L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé. Vous pouvez le noter. Dans le nouveau système proposé par monsieur Dalton, tout corps est composé d'un assemblage de particules. Ça, nous l'avons vu, nous le savons. Donc les particules de taille plus petite appelées les atomes. Et on précise ici que les atomes se combinent entre eux et en nombre entier. D'accord. La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène désignés par la lettre H, grand H, et d'atome d'oxygène désigné par la lettre O. La combinaison de ces atomes forme donc la molécule d'eau.

10 - 22:27 > 23:20 [Empirique] [Modèle micro] [Professeur-Élèves]

Tag(s): "atome", "corps composé"

[>P]: question. Est-ce que vous savez ce que c'est qu'un corps simple ou qu'un corps composé ? Qui peut donner la différence après avoir lu ce premier paragraphe ? Qu'est-ce que l'on peut dire d'un corps simple par rapport à un corps composé ou l'inverse ? Oui.

[>E]: par exemple un corps simple, il est constitué que d'une seule sorte d'atome.

[>P]: un corps simple est constitué.

[>E]: d'une seule sorte d'atome.

[>P]: d'une seule sorte d'atome.

[>E]: et un corps composé de plusieurs sortes d'atomes.

[>P]: et un corps composé de plusieurs sortes d'atomes. Est-ce que c'est clair ? Question suivante, chacun note avant cette réponse sur la feuille.

11 - 23:20 > 25:58 [Travail individuel]

[>P]: qui veut bien continuer la lecture ? Paul ?

(élèves lisent la suite du texte)

12 - 25:58 > 26:26 [Langage symbolique non défini] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): nom indéterminé, symbole indéterminé, "élément chimique"

[>P]: nous allons apprendre les symboles des éléments chimiques. Nous allons donc les retenir. Le symbole du chlore, ce n'est pas C mais Cl. Il faut donc l'apprendre par cœur.

13 - 26:26 > 26:40 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Symbolique (nom)] [Questions élèves]

Tag(s): empirique, nom indéterminé

[>E]: Monsieur le chlore c'est ce qui est dans la piscine ?

[>P]: c'est ce que l'on retrouve dans la piscine. Dans l'eau de javel aussi.

14 - 26:40 > 27:10 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): "symbole", "atome", "molécule", "formule chimique", nom molécule

[>P]: alors pour désigner un atome on utilise un symbole. Pour désigner une molécule, une molécule est représentée par sa formule. Donc ce sera une association de lettres. Et ici le dioxyde de carbone c'est une molécule, c'est une association de symboles.

15 - 27:10 > 27:27 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Questions élèves]

[>E]: ça veut dire que c'est constitué d'une molécule de carbone et de deux molécules d'oxygène, en fait de deux atomes d'oxygène ?

[>P]: c'est déjà une très bonne idée. Là vous voyez déjà pour le dioxyde de carbone il sera donc constitué, la molécule sera donc constituée d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène.

16 - 27:27 > 28:48 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): "mélange", empirique, "gaz", nom indéterminé, "espèce chimique", "corps composé", "formule chimique", "molécule"

[>P]: nous avons vu que c'est l'eau, que l'eau est constituée d'un mélange de différents. Non c'est l'air pardon. Nous avons vu que l'air est constitué d'un mélange de différents gaz qui sont entre autres ? (…) Nous avons vu que l'air est constitué d'un mélange de différents gaz qui sont entre autres du dioxygène O2, du diazote N2, du dioxyde de carbone CO2. Alors à partir de là, classez ces espèces chimiques en corps simples et en corps composés, puisque vous m'avez dit que vous avez

bien défini ce que c'est qu'un corps simple et qu'un corps composé. Vous avez donc les espèces chimiques qui sont données avec leur formule de leur molécule. Comment reconnaître un corps simple d'un corps composé et un corps composé d'un corps simple. Chacun répond.

17 - 28:48 > 30:57 [Travail individuel]

[>E]: comment on peut savoir ?

[>P]: ben on relit. Comment savoir si le dioxyde de carbone est un corps simple ou un corps composé ? Le dioxygène, le diazote. Tu réponds sur ta copie.

18 - 30:57 > 31:12 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Professeur seul]

Tag(s): "atome", "élément", "symbole"

[>P]: nous avons bien vu que les lettres qui sont des symboles désignent quoi ? C'est la représentation de chaque élément, chaque type d'atomes.

19 - 31:12 > 33:17 [Travail individuel]

Tag(s): nom indéterminé, "formule chimique"

[>P]: alors que dit Sagredo ?

(Élève lit la phrase de Sagredo)

20 - 33:17 > 34:09 [Langage symbolique implicite] [Modèle micro] [Symbolique (formule)] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): nom indéterminé, "formule chimique", "particule", nom atome, "atome", nom molécule, "molécule"

[>P]: vous proposez une formule par rapport à tout ce que nous avons vu avant (Benjamin demande trop tôt la formule de l'eau aux élèves avant de lire le texte de Simplicio. Les élèves doivent alors la deviner). Quelle est la formule que l'on peut proposer pour l'eau ? (...) La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène désignés par la lette H et d'atomes d'oxygène désignés par la lettre O. La combinaison de ces atomes forme une molécule d'eau. Alors vous me proposez donc la formule.

21 - 34:09 > 37:52 [Travail individuel]

(Recherche individuelle des élèves puis lecture de la suite du texte)

[>P]: j'étais un peu trop pressé c'était à ce niveau qu'il fallait proposer la formule.

22 - 37:52 > 38:51 [Langage symbolique explicite] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): réaction, "atome", "élément", "molécule", nom molécule, nom atome, "formule chimique"

[>P]: pour monsieur Dalton, la règle générale suivant peut être adoptée comme guide pour toutes les recherches sur la synthèse chimique. Quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire. C'est-à-dire qu'il y a deux éléments qui rentrent en contact. À moins qu'une certaine cause indique le contraire à l'application de cette règle. Nous pouvons tirer la conclusion suivante la molécule d'eau est une combinaison binaire donc de deux (inaudible), deux éléments, deux espèces. Donc la molécule d'eau est une combinaison binaire d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène. Quelle formule chimique correspondant à la molécule d'eau peut-on proposer à ce stade du dialogue ? C'est la réponse que vous avez apportée juste au-dessus. C'est là qu'il faut écrire la réponse.

23 - 38:51 > 43:29 [Travail individuel]

Tag(s): "gaz", empirique, nom espèce chimique

(Lecture début de la page 2)

[>P]: qu'est-ce qu'il avait proposé comme règle de combinaison ? Qui en lisant bien le texte peut trouver la réponse ? Oui. Tout est marqué sur la copie. On cherche la réponse. On cherche ce que Dalton a proposé.

[>E]: trois volumes de gaz.

[>P]: non qu'est-ce que tu es en train de lire ?

[>E]: monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène.

24 - 43:29 > 44:53 [Langage symbolique non défini] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur seul]

Tag(s): "gaz", nom espèce chimique, nom molécule, "molécule"

[>P]: pour monsieur Berzelius monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience et n'a peut-être pas agi avec assez de précautions en appliquant sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie. Qu'est-ce qu'il avait proposé monsieur Dalton ? Qu'est-ce qu'il a proposé ? C'est Simplicio qui l'a dit. Qu'est-ce qu'il a dit monsieur Dalton, qu'est-ce qu'il a proposé ? Il a dit les combinaisons se feraient de façon binaire. Donc il a pas tenu compte d'autres possibilités. D'accord ? Monsieur Lavoisier, il donne l'exemple de monsieur Lavoisier et il dit, monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène. Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il paraît plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de ?

25 - 44:53 > 45:45 [Langage symbolique explicite] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Professeur-Élèves]

Tag(s): nom molécule, nom atome, "gaz", nom espèce chimique

[>P]: de quoi ? La molécule d'eau composée de quoi ? Oui

[>E]: de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

[>P]: et alors quelle est la question que je vous pose ? Quelle est la question posée ?

[>E]: rappeler pour chaque gaz, les volumes utilisés pour obtenir de l'eau.

[>P]: alors pour chaque gaz, vous vous rappelez les volumes utilisés et les noms des gaz. Qui peut donner un exemple ? Qui peut donner un exemple ? Oui. Par exemple le gaz hydrogène, on marquera combien de volume ?

[>E]: deux.

[>P]: continuez pour le reste.

26 - 45:45 > 46:48 [Langage symbolique implicite] [Empirique] [Modèle micro] [Symbolique (nom)] [Questions élèves]

Tag(s): "gaz", nom indéterminé, "atome", nom espèce chimique, "formule chimique", "modèle"

[>E]: qu'est-ce qu'il faut faire ?

[>P]: qu'est-ce qu'on t'a posé comme question ? Qu'est-ce qui est écrit ?

[>E]: (L'élève relit la question)

[>P]: est-ce que tu as compris la question ?

[>E]: oui.

[>P]: voilà. Donc tu l'écris.

[>E]: j'écris les gaz qui sont dans l'eau ?

[>P]: qu'est-ce que tu as compris de cette phrase ?

[>E]: les gaz qui sont dans l'eau.

[>P]: ah non, on a dit les gaz qui composaient l'eau. Les gaz utilisés pour faire l'eau et puis de donner les atomes. On parle uniquement de gaz et de volume. On dit « donner les volumes de gaz utilisés pour obtenir l'eau ». On a utilisé quels gaz ici ?

[>E]: et bien gaz hydrogène et dioxygène.

[>P]: ben alors et on a utilisé un volume de combien pour le gaz hydrogène ?

[>E]: deux volumes.

[>P]: ben alors, où est la difficulté. Vous répondez à la question posée et pas à ce que vous supposez et après il y a une autre qui suit. Quelle formule chimique proposez-vous suite à la proposition de monsieur Berzelius ? On écrit sur sa copie.

27 - 46:48 > 53:56 [Travail individuel]

(Les élèves cherchent individuellement. Un élève ne comprend pas ce qu'il faut faire)

[>P]: par rapport à tout ce que nous avons vu avant. On a bien dit à ce stade du dialogue, quelle est la formule que vous proposez D'accord et le dialogue a continué. Cette fois quelle est l'autre formule

que vous proposez quand vous avez fini de répondre ? Cela peut être la même. Elle peut être différente et par rapport à ce que vous avez compris, qu'est-ce qu'il faut proposer comme formule ?

(Lecture de la suite du texte puis recherche individuelle. L'enseignant relit le dialogue et la question)

28 - 53:56 > 54:50 [Empirique] [Professeur seul]

Tag(s): empirique, réaction, "espèce chimique"

[>P]: une dernière question que je vous pose. Peut-on retenir qu'il y a une relation entre les volumes. Alors vous allez ajouter là entre parenthèses. Entre les volumes, il faut ajouter les quantités de matière. Et on continue des espèces chimiques et leurs formules traduisant une réaction chimique (la cloche sonne). Est-ce que vous voyez qu'il peut y avoir une relation entre les volumes et les formules chimiques. Est-ce que, non chacun marque sa réponse. Et voilà nous sommes arrivés à la fin. Vous marquez votre nom et la date.

Annexe 29 : Protocole pour les élèves de quatrième

Les dialogues

Extrait 1

Sagredo : Si je récapitule ce que disent les chimistes, les espèces chimiques sont constituées de particules que nous appelons molécules et ces molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes.

Salviati : C'est cela. Pour monsieur Gaudin, si l'on voulait compter le nombre de molécules contenues dans une grosse tête d'épingle, en en détachant chaque seconde un milliard, il faudrait continuer cette opération pendant plus de deux cent cinquante mille ans. Une espèce chimique est donc constituée d'un nombre incalculable de toujours la même molécule. Et chacune de ces molécules est constituée d'atomes.

Sagredo : Donc deux espèces chimiques différentes doivent être constituées de deux types de molécules différentes. Mais qu'est-ce qui différencient ces molécules ?

Extrait 2 :

Salviati : le type et le nombre d'atomes dans la molécule

Sagredo : Il existe donc différents types d'atomes.

Salviati : Oui et chaque atome se différencie par sa masse. Par exemple, l'atome de chlore est plus lourd que l'atome d'oxygène qui est plus lourd que l'atome d'azote. L'atome d'hydrogène est le plus léger de tous les atomes. Et pour les représenter, on utilise des lettres. H pour hydrogène, O pour oxygène, Cl pour chlore car la lettre C est déjà prise pour le carbone et N pour azote car il s'est aussi appelé nitrogène.

Sagredo : Et comment représentez-vous les molécules ?

Extrait 3 :

Salviati : Les molécules sont des combinaisons d'atomes. On écrit une formule qui représente cette combinaison en associant les lettres. Nous connaissons par exemple la molécule du gaz carbonique qui est constitué d'un atome de carbone et de deux atomes d'oxygène. On écrit la formule de la molécule CO_2. On l'appelle alors aussi molécule de dioxyde de carbone.

Sagredo : Donc vous avez une formule pour représenter la molécule de dioxyde de carbone : CO_2. Mais comment faites-vous pour représenter le gaz dioxyde de carbone. Avez-vous une formule pour représenter l'espèce chimique ?

Extrait 4

Salviati : On a dit qu'une espèce chimique est constituée d'un nombre incalculable de toujours la même molécule. Il semble donc pertinent de garder la même formule pour la molécule et pour l'espèce chimique. Et si on veut vraiment faire la différence entre la molécule invisible et l'espèce chimique accessible à nos sens, nous pouvons ajouter un indice à la formule qui désigne l'espèce chimique : un « g » pour gaz, un « l » pour liquide et un « s » pour solide. On peut donc écrire pour le gaz dioxyde de carbone $CO_2(g)$. Et on donne le même nom à la molécule et à l'espèce chimique.

Sagredo : Et connaissez-vous les formules d'autres gaz ?

Simplicio : Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée : quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons supposer qu'elle est binaire (un atome de chaque). Par exemple, la molécule de l'eau est une combinaison binaire d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Sa formule chimique sera donc HO.

Salviati : Ce n'est pas si simple. Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience. Monsieur Lavoisier a réussi à former de la vapeur d'eau. Pour cela, il a dû employer deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène. Monsieur Berzelius propose alors que la molécule d'eau soit composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

Extrait 5 :

Sagredo : Et connaît-on alors d'autres combinaisons avec les gaz ?

Salviati : Monsieur Gay-Lussac, qui a étudié les réactions avec les gaz, a trouvé qu'1 volume de gaz hydrogène s'unit à 1 volume de gaz chlore pour donner le gaz chlorhydrique, que 2 volumes de gaz hydrogène s'unissent à 1 volume de gaz oxygène pour donner le gaz eau et que 3 volumes de gaz hydrogène s'unissent à un volume d'azote pour donner le gaz ammoniac.

Sagredo : Vous nous dites alors que l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène et d'azote.

Salviati : Tout à fait. De la même façon que les atomes diffèrent par leur masse, ils diffèrent aussi par leur façon de se combiner. Notamment les atomes, de chlore, d'oxygène, d'azote ne se combinent pas de la même façon avec l'hydrogène.

Sagredo : Quelles sont alors pour vous les formules de la molécule constituant le gaz chlorhydrique et de la molécule constituant le gaz ammoniac ?

Extrait 6

Salviati : On a déjà vu que la formule de la molécule d'eau est H_2O. Avec la même méthode, la formule de la molécule de gaz chlorhydrique est HCl et celle de gaz ammoniac est NH_3.

Sagredo : Est-ce que je peux alors représenter avec les formules la combinaison entre le gaz hydrogène et le gaz chlore qui donne le gaz chlorhydrique ?

Extrait 7 :

Simplicio : C'est très simple. En me basant sur les combinaisons de monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl. Je peux alors écrire pour les gaz : $H(g) + Cl(g) \rightarrow HCl(g)$

Salviati : Ce n'est pas si simple. Monsieur Gay-Lussac a trouvé qu'1 volume de gaz hydrogène s'unit à 1 volume de gaz chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique.

Simplicio : L'explication la plus simple est qu'1 volume plus 1 volume donne 2 volumes au final.

Salviati : Oui mais pour l'eau monsieur Gay-Lussac a trouvé que 2 volumes de gaz hydrogène plus 1 volume de gaz oxygène donnent deux volumes de gaz eau.

Sagredo : Le raisonnement de monsieur Simplicio ne semble plus applicable.

Extrait 8

Salviati : Nous allons supposer que les molécules d'hydrogène et de chlore ne sont donc pas des atomes mais qu'elles sont biatomiques. Nous allons d'ailleurs les rebaptiser et les appeler molécule de dichlore et molécule de dihydrogène. Et nous appellerons les gaz correspondant : le dichlore et le dihydrogène.
Simplicio : Vous êtes en train de nous dire que les formules H et H_2 ne représentent pas la même chose alors que l'une est tout simplement le double de l'autre et qu'il serait plus simple de garder H plutôt que H_2.

Salviati : Parce que nous établissons une distinction bien tranchée entre les atomes et les molécules qui sont des combinaisons des atomes. Cette hypothèse nous permet d'interpréter l'ensemble des faits.
Sagredo : Dans ce cas, comment écrivez-vous la combinaison entre 1 volume de gaz hydrogène et 1 volume de gaz chlore permettant d'obtenir 2 volumes de gaz chlorhydrique ?

Extrait 9

Salviati : Pendant le processus de combinaison chimique, les molécules échangent leurs atomes de manière à donner de nouvelles molécules. On peut alors représenter cela sous la forme d'une équation :

$$HH + ClCl \rightarrow HCl + HCl \quad \text{ou avec les gaz } H_2(g) + Cl_2(g) \rightarrow 2\ HCl(g)$$

Sagredo : Cette théorie semble également permettre d'interpréter la formation de l'eau et de l'ammoniac et d'expliquer les volumes de gaz trouvés par monsieur Gay-Lussac.

Scénario

- **1ère étape : lecture premier Extrait**
  - Répondre à la question de Sagredo

- **2ème étape : lecture deuxième Extrait**
  - Comparer éventuellement leurs réponses avec celle de Salviati
  - Répondre à la question de Sagredo

- **3ème étape : Lecture troisième Extrait**
  - Comparer éventuellement leurs réponses avec celle de Salviati
  - Répondre à la question de Sagredo

- **4ème étape : Lecture quatrième Extrait**
  - Comparer éventuellement leurs réponses avec celle de Salviati
  - Demander aux élèves de donner les formules proposées par les chimistes cités par Simplicio et Salviati et les arguments proposés par chacun d'eux.

- **5ème étape : Lecture cinquième Extrait**

- Répondre à la question de Sagredo en donnant leurs arguments (faire écrire sur la feuille) et comparer

- **6ème étape : Lecture sixième Extrait**
  - Comparer éventuellement leurs réponses avec Salviati
  - Leur faire écrire les équations (faire écrire sur la feuille) et comparer

- **7ème étape : Lecture septième Extrait**
  - Comparer la proposition de Simplicio avec les résultats expérimentaux. Qu'en pensent-ils ?
  - Pourquoi Sagredo pense-t-il que le raisonnement de Simplicio n'est pas applicable. Est-ce qu'ils sont d'accord ? Ont-ils une proposition à faire ?

- **8ème étape : Lecture huitième Extrait**
  - Que pensent-ils de la proposition de Salviati et de la réponse de Simplicio à cette proposition ?
  - Répondre à la question de Sagredo (sur leur feuille) et comparer.

- **9ème étape : Lecture neuvième Extrait**
  - Revenir sur leurs formules
  - Leur demander d'écrire la même chose pour l'eau et pour l'ammoniac (feuille puis ensemble)
  - Si vous doublez les formules, est-ce alors toujours la même molécule ?

Annexe 30 : Transcription des échanges : élèves de quatrième

[>I]: première étape est-ce qu'il y a des choses que vous ne comprenez pas ? Dans les mots, le vocabulaire.

[>E1]: non non.

[>E2]: non.

[>I]: cela vous paraît clair.

[>E2]: oui.

[>I]: alors est-ce que vous comprenez ce que dit Salviati, quand il dit que dans une espèce chimique il y a un nombre.

[>E2]: il y a beaucoup de molécules.

[>I]:oui beaucoup ? C'est quoi beaucoup ?

[>E2]: heu ben y en a des milliards et des milliards.

[>I]: oui on pourrait les compter ?

[>E1]: non.

[>E2]: non.

[>I]: donc ça c’est l'atome et la molécule. Je suppose que vous en avez entendu parler en classe ?

[>E1]: oui.

[>E2]: oui.

[>I]: et donc on va essayer de comprendre la différence entre atome et molécule. Vous avez trois personnages qui vont dialoguer, Sagredo qui veut chercher à comprendre, Simplicio qui va donner les réponses les plus simples et Salviati.

[>E2]: c'est le professeur

[>I]: oui si on veut c'est le professeur. Et donc quand il y a deux espèces chimiques différentes monsieur Salviati dit qu'il y a deux molécules différentes et à votre avis en quoi peuvent-elles être différentes ?

[>E2]: euh ben c'est la composition des atomes, c'est pas les mêmes atomes.

[>E1]: ben oui pour moi c'est les atomes cela dépend des nombres des atomes et de quels atomes ils sont constitués.

[>I]: OK. Pour l'instant c'est juste pour vérifier ce que vous savez sur atome et molécule. Donc on peut continuer dans le texte. Donc il y a la réponse de Salviati qui correspond à ce que vous venez de dire. C'est le type et le nombre d'atomes dans la molécule. Première question : est-ce que cela vous paraît toujours clair ? Pas de difficultés ?

[>E1]: non non.

[>E2]: non non.

[>I]: alors en quoi ils sont différents les atomes.

[>E2]: leur masse.

[>I]: d'accord donc il va y avoir des petits atomes et des plus gros atomes. Le plus léger ?

[>E2]: c'est l'atome d'hydrogène.

[>I]: oui alors est-ce que vous avez déjà vu les symboles des atomes en classe ?

[>E1]: oui.

[>E2]: rapidement.

[>I]: donc qu'est-ce que l'on utilise pour les représenter.

[>E1]: des lettres.

[>I]: oui et laquelle ?

[>E2]: ben la première plus la deuxième en minuscule. Pour chlore on prend C et l parce que

[>I]: d'accord. C'est ce qu'ils disent dans le texte. Donc c'est Berzelius qui a décidé d'utiliser des lettres parce que c'était plus simple à imprimer. D'autres chimistes utilisaient des ronds des triangles, des symboles. Mais pour imprimer, les lettres c'est plus facile. Donc c'est devenu la notation pour tous les chimistes et que l'on continue à utiliser aujourd'hui. Donc pour les atomes, ce sont des lettres et alors comment représenteriez-vous une molécule ?

[>E2]: plusieurs petits ronds. Le rond c'est un atome. Plusieurs tous collés.

[>I]: vous pouvez faire vos réponses sur les feuilles (les élèves répondent sur leur feuille et représentent des modèles moléculaires : E1 un modèle éclaté et E2 un modèle compact)

[>E2]: on avait mis en classe rouge noir rouge, quelque chose comme ça.

[>I]: rouge - noir - rouge ?

[>E1]: oui.

[>I]: OK donc vous avez utilisé ce que l'on appelle des modèles moléculaires

[>E1]: oui.

[>E2]: oui.

[>I]: et on ne vous a pas donné de formules avec ?

[>E1]: non.

[>I]: et vous savez ce que cela représente ce que vous avez dessiné ?

[>E1]: ben là j'ai pas mis de couleur. C'était un exemple.

[>I]: donc là c'était juste un exemple au hasard. Mais le rouge noir rouge, tu as vu cela en classe mais cela ne te dit rien ?

[>E2]: je ne sais plus ce que c'est le rouge.

[>E1]: euh je ne sais pas. Dioxyde de carbone ?

[>I]: oui effectivement c'est comme cela que l'on représente le dioxyde de carbone. Alors ça justement c'est monsieur Dalton qui a utilisé des cercles ou des ronds pour représenter mais ce n'est pas très pratique. Vous savez combien on connaît d'atomes différents ?

[>E1]: euh 100 quelque chose.

[>E2]: 300.

[>I]: ah non 300 c'est trop.

[>E2]: non 152 quelque chose comme cela.

[>I]: non un peu moins[>I]: dans ce qui nous entoure, il y en a surtout une vingtaine vraiment importants et surtout trois le carbone, l'hydrogène et l'oxygène. Tous ces atomes si j'en ai une centaine, est-ce que je peux les représenter avec des cercles seulement ?

[>E1]: non il y en a plus. Ben là on fait avec des couleurs mais du coup on n'a pas assez de couleurs

[>E2]: après on peut mettre deux atomes ensemble comme deux rouges à côté.

[>I]: alors on va lire la suite.

[>I]:(lecture extrait 3) je vous laisse lire. Donc justement il donne l'exemple que vous m'avez donné Alors on ne regarde pas tout de suite la question de monsieur Sagredo.

[>I]: donc finalement ce que vous avez représenté.

[>E2]: c'est du CO2.

[>I]: dans ce que vous avez représenté vous avez mis un atome de carbone

[>E2]: C.

[>I]: voilà et vous avez mis deux atomes d'oxygène ?

[>E1]: oui.

[>I]: donc on met le petit deux pour représenter. Donc ça c'est une convention. On aurait pu aussi faire des cercles. Mais c'est compliqué pour une centaine d'atomes et pour des molécules il y en a des milliards avec parfois des molécules où vous avez plus de 20, 30, 40, 50 atomes et même plus. Donc si je mets des lettres avec des chiffres, c'est quand même plus facile. Si j'ai 20 hydrogènes, il faut que je fasse 20 ronds alors que si je mets H20 ?

[>E2]: c'est plus rapide.

[>I]: voilà. Monsieur Sagredo a la molécule de dioxyde de carbone qui constitue le gaz.

[>E1]: oui.

[>E2]: oui.

[>I]: du dioxyde de carbone on en a dans l'air. Donc c'est un gaz. La molécule, on la représente CO2 mais comment peut-on faire pour le gaz ? C'est que demande monsieur Sagredo. Est-ce que l'on a une formule pour représenter l'espèce chimique, c’est-à-dire le gaz que l'on trouve dans l'air ?

[>E2]: euh je sais pas. Euh si je ah non.

[>I]: si n'hésite pas.

[>E2]: ben j'ai entendu parler d'une transformation chimique. Il y a pas de lien ?

[>I]: je ne sais pas. Vas-y.

[>E2]: ben j'ai pas beaucoup d'idées.

[>E1]: je sais pas du tout.

[>I]: si on reprend ce que dit monsieur Gaudin au tout début dans le paragraphe 1. Qu'est-ce qu'il vous dit pour le gaz ? Qu'il y a quoi dans le gaz ? Des molécules ?

[>E2]: ah oui.

[>E1]: oui donc.

[>I]: et combien ? Est-ce qu'on peut les compter ?

[>E1]: non.

[>E2]: non.

[>I]: et donc l'espèce chimique c'est le gaz ?

[>E1]: oui.

[>I]: il va être constitué de quoi ?

[>E1]: de molécules.

[>I]: donc d'un très grand nombre de molécules. Donc vous avez une formule pour la molécule, quelle formule vous pourriez mettre pour l'espèce chimique ? Comment vous allez l'appeler ?

[>E2]: ce ne serait pas une lettre avec un petit plusieurs petits chiffres ? Cela me dit quelque chose.

[>I]: ce serait quoi alors ?

[>E2]: quelque chose comme ça (écrit m avec à droite 1 en exposant et 0 en indice)

[>I]: tu as vu des choses bien savantes là.

[>E2]: ah oui mais j'ai rien compris. Il a fait du bourrage de crâne.

[>I]: il a sans doute voulu te représenter ce que l'on a dans un atome.

[>E2]: ah oui un électron.

[>I]: donc tu as vu que dans un atome, il y a encore d'autres choses.

[>E1]: oui on s'est arrêté juste là. Enfin moi en tout cas.

[>I]: donc même dans l'atome, il y a encore d'autres choses. Mais on ne va pas s'intéresser à cela aujourd'hui.

[>I]: vous verrez cela plus tard. Donc vous ne voyez pas comment on pourrait écrire. On va vous aider avec la suite du texte. (Lecture extrait n°4). On va s'arrêter au premier paragraphe et même à la deuxième phrase.

[>I]: qu'est-ce que vous propose monsieur Salviati ?

[>E2]: de garder les mêmes formules.

[>E1]: pour la molécule et l'espèce chimique.

[>I]: et alors vous pensez qu'il a raison et c'est une bonne idée ?

[>E2]: ben non parce que l'on peut pas faire la différence entre les deux.

[>I]: mais est-ce qu'il y a quelque chose d'intéressant dans ce qu'il propose ?

[>E1]: ben (...)

[>E2]: ben oui parce que s'il y a plein plein plein de molécules c'est trop compliqué à tout tout tout écrire.

[>I]: oui effectivement on ne peut pas. On ne peut pas les compter, c'est impossible à compter.

[>E2]: donc ben comme ça on va juste écrire CO2. On va pas écrire toutes les molécules.

[>I]: oui c'est un peu ce qu'il vous propose.

[>E1]: oui.

[>I]: Donc plutôt que d'écrire des milliards de CO2, on l'écrit qu'une seule fois. Tu as donc raison en disant que l'on ne peut pas les différencier. Je vous laisse lire la suite. (Lecture suite extrait 4)

[>E2]: on lit tout.

[>I]: jusqu'à Sagredo.

[>E1]: on peut pas différencier. On connaît pas le .... l'état, ce qu'on met juste.

[>I]: ce n'est pas la molécule qui est solide, liquide ou gazeuse mais l'espèce chimique.

[>E1]: ah oui

[>I]: Vous avez déjà étudié une espèce chimique que l'on peut trouver sous ses trois formes

[>E2]: ben l'eau.

[>I]: l'eau oui et c'est la même molécule mais cela peut être un solide, un liquide ou un gaz. Donc justement comment vous allez écrire la molécule et le gaz ?

[>E1]: ben avec un g entre parenthèse.

[>E2]: oui.

[>I]: donc dans un cas on parle du gaz et qui est constitué des molécules de CO2 et dans l'autre cas on ne parle que de la molécule de CO2.

[>I]: ce que demande Sagredo ensuite, c'est est-ce que vous connaissez d'autres formules de gaz ?

[>E2]: non.

[>E1]: non.

[>I]: je vous propose alors de lire la suite (extrait 4). On va d'abord s'arrêter à Simplicio..

[>E2]: non c'est pas vrai la molécule d'eau c'est deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène.

[>I]: comment tu dirais.

[>E1]: c'est H2O

[>I]: je vous laisse lire alors jusqu'à monsieur Salviati

[>I]: pourquoi monsieur Simplicio, il s'appuie sur monsieur Dalton. Vous avez déjà entendu parler de monsieur Dalton ?

[>E1]: moi un peu.

[>E2]: moi un petit peu.

[>I]: donc qu'est-ce qu'il dit en fait ? Comment il fait ses formules monsieur Dalton ?

[>E1]: ben il met juste les espèces chimiques présentes. Il met pas le nombre.

[>I]: ou alors il dit s'il y en a qu'une.

[>E2]: on met juste la lettre et s'il y en deux, on met la lettre et un petit deux à côté.

[>I]: en fait quelle formule il choisit ? Une formule compliquée ?

[>E1]: non.

[>E2]: ben non la plus simple possible.

[>I]: donc il choisit la simplicité et donc monsieur Berzelius ?

[>I]: que dit monsieur Berzelius ? Pourquoi ne veut-il pas de la formule HO ? Vous m'avez dit c'est pas vrai c'est pas HO Mais comment on sait que c'est pas HO ?

[>E2]: parce que j'ai beaucoup travaillé sur H2O ?

[>I]: oui vous l'avez appris mais comment on trouve que c'est pas HO ?

(Pas de réponse).

[>E2]: euh.

[>I]: finalement qu'est-ce que cela change HO ou H2O pour vous ?

[>E2]: ah ben c'est bon. ben HO c'est deux molécules comme ça (montre la formule) et H2O c'est comme ça. C'est pas du tout la même chose.

[>I]: et donc pourquoi monsieur Berzelius que c'est plutôt H2O. Sur quoi il s'appuie pour dire cela ?

[>E1]: ben il a dit que monsieur Lavoisier il a fait la vapeur d'eau avec deux volumes de gaz d'hydrogène et un d'oxygène.

[>I]: et comment il le traduit ce deux volumes de gaz hydrogène et un volume de gaz oxygène

[>E2]: ben euh H2O.

[>I]: deux H et un O. Il s'appuie sur le résultat de l'expérience

[>E1]: oui voilà.

[>I]: alors que Dalton part au plus simple.

[>E2]: oui mais c'est pas le plus détaillé.

[>I]: c'est quoi la meilleure méthode ?

[>E1]: ben faut être précis ?

[>I]: seulement précis ou sur quoi on doit s'appuyer ?

[>E1]: ben des expériences.

[>I]: donc monsieur Berzelius propose une formule à partir de l'expérience. Lavoisier vous le connaissez ?

[>E1]: oui.

[>E2]: oui.

[>I]: donc Lavoisier est le premier à avoir réussi à décomposer l'eau. Sagredo demande si on connaît d'autres combinaisons avec des gaz. Je vous laisse lire ce que propose Salviati. (Extrait 5) Vous allez essayer de répondre à la question de Sagredo. Vous pouvez échanger, tester. Vous pouvez aussi vous aider de ce que l'on a fait avec l'eau juste avant.

[>E2]: alors.

[>E1]: les formules c'est avec les lettres.

[>I]: tu peux faire des dessins au départ si tu préfères et si c'est plus facile.

[>E2]: non non je vais faire un schéma parce que je comprends rien (E2 dessine des cercles mais sans précision trois cercles et deux cercles - E1 écrit HCl et H3N)

[>E2]: euh chlorhydrique cela fait quoi comme formule ?

[>I]: c'est ce que je te demande.

[>E1]: le chlore c'est Cl ?

[>I]: oui mais si tu préfères faire les cercles.

[>E1]: non.

[>E1]: en fait j'ai mis C et l en minuscule.

[>I]: c'est pas grave.

[>E2]: et azote c'est un grand A majuscule ?

[>I]: azote c'est un grand N. Vous avez déjà vu ce qu'il y a dans l'air ?

[>E1]: non.

[>I]: non vous n'avez jamais vu. Il y a du dioxygène et du diazote.

[>E2]: l'azote en fait c'est du monoxyde de carbone.

[>I]: ah non c'est encore autre chose. Monoxyde de carbone à ton avis, il a quoi dans le monoxyde de carbone.

[>E2]: ben du carbone. De l'oxygène.

[>I]: et de l'oxygène oui. Et l'azote c'est encore un autre type d'atome. Et le symbole c'est grand N.

[>I]: c'est un atome qui va être différent du carbone, avec une autre masse et des propriétés différentes.

[>E1]: l'azote ou le monoxyde de carbone ?

[>I]: l'azote et le carbone cela ne donne pas les même formules.

[>E2]: d'accord.

[>I]: vous êtes arrivées aux mêmes ?

[>E2]: quelque chose comme ça.

[>I]: vous avez déjà fait la question qui va suivre (E1 écrit sur sa feuille HCl, H3N et l'équation H + Cl = HCl E2 écrit sur sa feuille H + Cl = HCl puis H2O puis H3N. E2 ajoutera ensuite une flèche pour déplacer le N avant le H3 dans le H3N) (lecture extrait 6).

[>I]: déjà on regarde ce que Salviati propose, est-ce que cela correspond à vos formules ?

[>E2]: non moi je me suis trompée j'ai (a écrit H3N au lieu de NH3 et ajoute une flèche).

[>I]: alors est-ce que tu penses que c'est grave.

[>E2]: non.

[>I]: toutes les deux vous avez inversé. Est-ce que vous pensez que c'est grave ?

[>E2]: non.

[>E1]: je sais pas. Je me souviens que ma prof de physique elle avait dit qu'il fallait si on pouvait mettre dans l'ordre "chon".

[>I]: il y a un ordre que l'on a pris par habitude.

[>I]: on écrit par habitude toujours dans un certain ordre mais la formule cela vous permet d'indiquer combien il y a d'atomes et donc dans un sens ou dans l'autre vous savez qu'il y a trois atomes d'hydrogène et un atome d'azote.

[>E2]: donc H2O cela aurait aussi très pu dire OH2.

[>I]: tu peux dire OH2.

[>E1]: d'accord.

[>I]:tu pourrais même dire HOH.

[>E2]: ah oui ?

[>E1]: les deux oui.

[>I]: oui tu retrouves les mêmes atomes.

[>I]: ce qui est important c'est que vous ayez les bonnes lettres, les bons atomes, et le bon nombre d'atomes. Mais il y a des habitudes pour l'ordre. Donc ensuite on vous demande si vous pouvez écrire ou représenter la combinaison entre le gaz hydrogène et le gaz chlore. Et donc ça vous l'avez presque fait.

[>E1]: cela fait un truc comme ça (sur la feuille a écrit H + Cl flèche HCl). C'est pas le bilan littéral.

[>I]: tu l'as peut être appelé comme cela en classe mais sinon on peut l'appeler l'équation chimique.

[>E1]: d'accord.

[>I]:et si je veux que ce soit entre les gaz qu'est-ce qu'il faudrait ajouter à ce que tu as écrit ?

[>E2]: un g là.

[>E1]: oui les noms (les ajoutent toutes les deux dans leur équation).

[>E1]: on met H g entre parenthèses et Cl g entre parenthèses.

[>I]: oui.

[>I] : vous avez donc écrit une équation chimique et vous avez mis une flèche spontanément. Vous avez donc répondu très vite à cette partie. Donc on va regarder la suite (lecture extrait 7). Donc avec simplicio c'est ce que vous avez déjà écrit. Que dit par contre Salviati ?

[>E2]: c'est affreux.

[>E1]: oui.

[>I]: donc on a bien un volume qui réagit avec un volume mais on obtient deux volumes. Donc que propose Simplicio ?

[>E2]: euh (...) ça fait référence à la phrase "rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme.

[>I]: oui on pourrait voir cette phrase. C’est-à-dire un volume plus un volume donnent ?

[>E2]: deux volumes de chlorhydrique.

[>I]: donc ça c'est la réponse de monsieur Simplicio.

[>I]: je vous laisse continuer (suite de l'extrait 7).

[>I]: alors, c'est là où cela se complique.

[>E1]: oui.

[>I]: mais on est presqu'à la fin. Alors que pensez-vous de ce que dit monsieur Salviati ?

[>E2]: oh voilà c'est ça, c'est une équation, c'est euh donc là alors (...) H2 plus O (écrit H2 + O donnent H2O).

[>E1]: ah je crois qu'on l'avait fait.

[>I]: essaie et vous comparerez vos idées.

[>E2]: (inaudible) (cherche sur leur feuille) (E1 écrit sur sa feuille H + Cl = 2 HCl) (E2 écrit sur sa feuille H2 + O = H2O)

[>E2]: je sais pas si ça s'écrit comme cela.

[>E1]: on fait avec l'eau ou le ?

[>I]: avec celui que tu veux.

[>E1]: OK.

[>E2]: y a un truc comme ça où on rajoute un deux devant.

[>E1]: ah oui ça s'appelle les nombres stoech

[>I]: oui c'est stœchiométriques mais ce n'est pas grave si vous ne vous rappelez pas du nom.

[>E1]: alors du coup (écrit 2H + 2Cl = 2 HCl)

[>E2]: je suis sûre que c'est pas ça.

[>I]: par rapport à ce que vous avez écrit tout à l'heure, c'est quoi le problème ?

[>E2]: ben c'est qu'il y avait deux volumes et euh il y avait trois volumes en tout et on en a plus que deux. Il y en a un qui a disparu.

[>I]: donc la première réponse de Simplicio ne marche plus ?

[>E1]: non.

[>I]: pourtant cela avait l'air d'être bien un volume plus un volume donnent deux volumes. et avec l'eau vous avez un volume plus deux volumes et ça donne deux volumes.

[>E1]: oui ça donne deux volumes.

[>I]: si j'applique le raisonnement de Simplicio, je devrais avoir.

[>E2]: ben trois volumes.

[>E1]: trois volumes.

[>I]: donc on ne peut pas additionner les volumes.

[>I]: alors ?

[>E2]: je suis sûre que je vais trouver mais

[>I]: alors est-ce que vous avez écrit, cela vous satisfait ?

[>E1]: non pas vraiment.

[>I]: donc toi tu as mis des deux devant (E1 a écrit en premier H + Cl = 2 HCl puis 2H + 2Cl = 2 HCl)

[>I]: cela te donne bien les deux volumes de HCl mais tu trouves alors deux volumes de l'autre côté ?

[>E1]: ah ben oui.

[>I]: pourquoi pour mettre deux HCl, tu as mis des deux de l'autre côté ?

[>E1]: ben puisque dans HCl il y a deux HCl, ben du coup il y a deux fois le H et deux fois le Cl.

[>I]: d'accord donc tu cherches à avoir quoi de chaque côté de la flèche ?

[>E1]: ben les mêmes nombres d'atomes.

[>I]: c'est ce que tu avais dit tout à l'heure ?

[>E2]: si euh ben on rajoute des atomes. Ah oui rien ne se perd rien ne se crée tout se transforme.

[>I]: et donc c'est ce que tu fais quand tu as deux H d'un côté, tu en mets deux de l'autre côté ?

[>E1]: oui.

[>E2]: je suis pas trop là. Mais à ce moment-là si on fait deux plus deux, il y en a quatre (2H et 2 Cl)

[>I]: mais il y a bien deux H à gauche et deux H de l'autre côté dans la formule ?

[>E2]: ah euh cela donnerait alors H2Cl2 ?

[>I]: est-ce que 2 HCl c'est la même chose que H2Cl2 ?

[>E1]: ben peut-être que H2Cl2 cela peut être une autre molécule.

[>E2]: non, non.

[>E1]: alors que deux HCl c'est deux fois la molécule de HCl

[>I]: et pour toi ?

[>E2]: euh il y a une différence entre molécule et atome, Je sais euh après H2 ça je sais que c'est une molécule. 2H comme cela je sais que c'est deux atomes mais pas liés entre eux

[>I]: d'accord 2HCl tu penses que c'est toujours pareil que H2Cl2.

[>E2]: non.

[>I]: et alors c'est quoi là ? (en montrant le 2H).

[>E2]: ben c'est une molécule, une molécule d'hydrogène. Non c'est deux atomes d'hydrogène formant une molécule parce qu'ils sont liés entre eux. Une molécule, c'est un groupe d'atomes liés entre eux.

[>I]: là tu as écrit H2 (feuille E2) mais ici tu as bien écrit 2H (feuille E1) . Est-ce l'atome ou la molécule qui réagit ?

[>E2]: c'est l'atome (élève qui a mis H2).

[>I]: de quoi sont faites les espèces chimiques ? Des atomes ou des molécules ?

[>E2]: Des atomes, je sais pas. Ben je crois que c'est des atomes

[>E1]: moi aussi je pense que c'est des atomes

[>I]: revenons au premier paragraphe

[>E1]: ben les espèces chimiques c'est constitué d'atomes, non, espèces chimiques de molécules et les molécules d'atomes.

[>I]: donc la réaction elle se fait entre quoi ?

[>E1]: ben les molécules.

[>E2]: les molécules, ah on a un problème alors.

[>E1]: oui.

[>I]: et donc que faudrait-il écrire ? On va continuer la lecture. (Lecture de l'extrait 8) on s'arrête au premier paragraphe de Salviati.

[>E2]: c'est quoi biatomique.

[>E1]: c'est deux non ?

[>I]: oui c'est deux. Comme dans bis ou dans bicyclette. Donc bi atomique cela veut dire ?

[>E2]: c'est eux , c'est euh .

[>I]: dans bicyclette.

[>E2]: ben deux roues.

367 [>I]: donc dans biatomique, tu as deux atomes.

368 [>E2]: d'accord (lecture extrait 8 suite).

369 [>I]: donc le gaz que l'on a appelé tout à l'heure le chlore et l'hydrogène. En fait, ils sont constitués de
370 quelles molécules ?

371 [>E2]: de dihydrogène et de dichlore ?

372 [>I]: quelles sont les formules alors ?

373 [>E1]: ben c'est Cl2 et H2.

374 [>I]: et donc on les appelle, puisqu'il y en a deux, plutôt que gaz chlore et gaz hydrogène ou molécule
375 chlore et molécule hydrogène ?

376 [>E2]: deux Cl.

377 [>E1]: dichlore et dihydrogène

378 [>I]:il n'y a pas un autre gaz que vous connaissez.

379 [>E1]: le dioxygène.

380 [>I]:et la formule ?

381 [>E1]: c'est O2

382 [>I]: donc l'atome d'oxygène s'associe avec un autre atome d'oxygène pour donner la molécule de
383 dioxygène. Alors est-ce que vous pouvez reprendre vos équations ? Mais avant que dit Simplicio ?

384 [>E2]: Simplicio c'est un traître (suite lecture extrait 8).

385 [>I]: est-ce que vous pensez comme Simplicio ?

386 [>E2]: ce serait chouette de penser comme lui mais je suis sûre que ce n'est pas ça.

387 [>E1]: ben si c'est H tout court c'est pas pareil que H2.

388 [>I]: alors que dit Salviati ? (lecture suite extrait 8)

389 [>E1]: oui parce que H tout court c'est l'atome et H2 c'est la molécule.

390 [>I]: oui. Donc Sagredo, il demande comment on réécrit la combinaison entre le gaz hydrogène. Alors
391 il ne faudrait plus dire gaz hydrogène mais gaz.

392 [>E2]: dioxygène non dihydrogène.

393 [>I]:et donc non plus chlore.

394 [>E1]: de dichlore.

395 [>I]: permettant d'obtenir deux volumes de gaz chlorhydrique.

396 [>I]: donc est-ce que vous pourriez reprendre l'équation que vous avez écrite tout à l'heure (équation
397 pour donner le gaz chlorhydrique) (Les élèves reprennent leurs équations E1 écrit H2 + Cl2 = 2 HCl -
398 E2 ne sait pas).

399 [>I]: est-ce que cela marche ce que tu as écrit avec les volumes ?

[>E1]: non c'est HCl tout court (barre le 2 devant HCl dans son équation)

[>I]: rappelle-toi les volumes. cela disait quoi ?

[>E2]: ben là on pourrait faire comme monsieur Simplico et faire un plus un égal deux (écrit Cl + H = 2 ClH)

[>I]: c’est-à-dire ?

[>E2]: ben là il y a un volume de gaz hydrogène et un volume de gaz de chlore. Ben gaz dihydrogène, chlore et hydrogène, si on les met ensemble cela donne du chlorhydrique. Donc comme on a un volume d'hydrogène et un volume de chlore on met les deux ensemble. On fait la technique de Simplicio.

[>I]: mais elle ne marche pas pour tout. Tu (E1) avais mis le deux (devant HCl) . Pourquoi tu l'as barré ?

[>E1]: ben je sais pas trop. (...) (Les élèves réfléchissent)

[>I]: alors plutôt que de te demander pourquoi tu l'as barré, dis-moi plutôt pourquoi tu l'avais mis ?

[>I]: parce qu'en plus c'était bon.

[>E1]: ah d'accord.

[>I]: alors pourquoi tu l'avais mis ?

[>E1]: et ben parce qu'il disait que cela faisait deux atomes de gaz

[>I]: deux volumes ?

[>E1]: oui voilà de gaz chlorhydrique

[>I]:et là est-ce que cela marche en comptant les atomes ?

[>E1]: ben du coup-là ... Oui !

[>I]: alors qu'est-ce que tu penses de son équation (question à E2) ?

[>E2]: (...)

[>I]: qu'est-ce que tu en penses ? (Question à E2)

[>E2]: moi je suis sûre que c'est le raisonnement mais je suis pas sûre que ce soit bon c'est en fait, c'est deux atomes, non c'est deux molécules là il y a deux atomes.

[>I]: c'est-à-dire ?

[>E2]: là (montre l'équation de E1 : H2 + Cl2 = 2 HCl) c'est deux molécules et deux HCl c'est deux deux deux combinaisons d'atomes. Donc je trouve cela un peu bizarre qu'on additionne deux molécules pour trouver deux atomes

[>I]: alors qu'est-ce qui se passe dans cette réaction, à ton avis ?

[>E2]: y a des trucs qui se déchirent enfin je sais pas, qui se transforment spécial

[>E1]: oui parce que le dihydrogène et ben et le dichlore et ben ils se séparent pour faire euh euh deux atomes séparés d'hydrogène et deux atomes de chlore séparés

[>I]: oui. Donc les atomes ils se réarrangent ?

[>E2]: ah ben voilà c'est une transformation chimique.

[>I]: vous avez vu transformation chimique en classe, c'est ça ?

[>E2]: non mais en fait on a eu un contrôle surprise et du coup il y avait quelle est la différence entre une transformation chimique et une transformation.

[>E1]: physique.

[>E2]: non non une autre transformation.

[>I]: donc je vous donne le dernier extrait. Et en fait vous n'avez pas besoin de monsieur Salviati. (lecture extrait 9).

[>E1]: je comprends pas trop ce qu'il dit la dernière phrase.

[>I]: de Sagredo

[>E1]: oui voilà

[>I]: la théorie c'est quoi ? Donc pendant le processus de combinaison chimique, toi tu l'as appelé comment ?

[>E2]: ben une transformation chimique.

[>I]: et donc qu’est-ce qui se passe pendant les combinaisons ? Que font les molécules ?

[>E1]: elles échangent leurs atomes de manière de donner une nouvelle molécule.

[>I]: c'est bien ce que tu as écrit avec H2 et Cl2.

[>E2]: mais là je ne comprends pas l'ammoniac.

[>I]: alors cela devrait aussi permettre d'expliquer la formation de l'eau et de l'ammoniac.

[>E2]: c'est quoi l'ammoniac.

[>E1]: ah oui.

[>I]: on va commencer par celle de l'eau. L'ammoniac on l'a vu au début. Paragraphe 5.

[>E1]: ils disent trois volumes de gaz hydrogène s'unissent avec un volume de gaz d'azote pour former un volume de gaz ammoniac.

[>I]: oui. C'est donc la toute dernière question. Comment on peut écrire la combinaison qui donne l'eau et la combinaison qui donne l'ammoniac ? Vous venez d'écrire la combinaison qui donne l'acide chlorhydrique. Est-ce que je peux faire la même chose avec l'eau et avec l'ammoniac ?

[>E1]: quand ils disent que trois volumes de gaz d'hydrogène s'unissent avec un volume d'azote pour donner le gaz ammoniac c'est euh enfin euh c'est un seul ?

[>I]: c'est deux volumes de gaz ammoniac.

[>E2]: j'aurais voulu savoir si c'est un truc comme cela.

[>I]: l'équation que tu proposes pour l'eau, c'est ça (a écrit H2 + O = H2O) ?

[>E2]: Oui c'est ça mais je suis pas sûre.

[>I]: qu'est-ce que tu en penses ? (En demandant à E1)

[>E1]: euh je sais pas trop.

[>E2]: moi non plus je sais pas trop du tout.

[>I]: alors pourquoi tu sais pas trop.

[>E1]: ben parce que là c'est une molécule (en montrant H2) et là c'est un atome (en montrant O)

[>I]: d'accord alors il faudrait mettre quoi ?

[>E1]: ben peut-être. Mais si on met O2 après il y a après c'est pas pareil ?

[>I]: alors si tu mets O2 ?

[>E2]: ben ça va pas donner de l'eau.

[>I]: pourquoi ?

[>E2]: parce que la formule de l'eau c'est H2O, c'est pas H2O2.

[>I]: mais si je regarde les volumes, combien je suis censée obtenir d'eau.

[>E2]: ben deux volumes.

[>I]: donc il faudrait que tu mettes quoi dans l'équation ?

[>E1]: ah oui.

[>E2]: un deux là (ajoute un deux devant H2O)

[>E1]: oui deux H2.

[>E2]: ça fait que ici on a.

[>E1]: ah je crois que tu te ...

[>I]: alors pourquoi tu le mets de ce côté pour l'oxygène (écrit 2 devant l'oxygène) et ici pour l'eau tu ne veux pas le mettre devant (écrit H2O2. L'équation est alors : H2 + 2 O = H2O2).

[>E2]: euh euh ....

[>E1]: moi je pense que c'est comme ça (a écrit 2H2 + O2 = 2H2O)

[>I]: alors qu'est-ce que tu penses de son équation ?

[>E2]: je trouve que c'est bien.

[>I]: est-ce que cela marche pour les volumes ?

[>E2]: oui pour les volumes oui. Par contre ben l'oxygène il a disparu. Ah ben oui parce que cela fait fois 2 donc ... non je comprends pas.

[>I]: alors qu'est-ce que tu comprends pas ?

[>E2]: euh ben là (montre les oxygène avec d'un côté O2 et de l'autre O dans H2O) . Pourquoi elle a pas mis deux là (dans H2O pour le O).

[>I]: alors pourquoi ? Si on met cela est-ce que cela te paraît plus clair (chercheur ajoute des parenthèses autour de H2 et autour de H2O dans l'équation de E1. ce qui donne : 2 (H2) + O2 = 2 (H2O)) ?

[>E2]: euh, non mais je le voyais déjà mais je vois pas pourquoi ?

[>I]: le 2 volumes c'est pour quoi ? C'est pour 2 molécules d'eau ?

[>E2]: oui ah ben oui mais là c'est deux molécules d'hydrogène plus plus ça fait, ça fait deux fois deux ça fait quatre volumes quatre atomes d'hydrogène plus deux atomes d'oxygène, ça donne ben normalement cela devrait donner H4O2.

[>I]: en tout pour les atomes effectivement. On est d'accord.

[>E2]: ah oui donc on fait en fait c'est 2 fois H2... . H fois 2 ça fait quatre et H2 fois 1 ça fait deux hydrogène.

[>I]: tu me dis donc que H2O et H4O2, c'est la même chose. H et H2, c'est pareil alors aussi ?

[>E2]: oui.

[>I]: oui ?

[>E2]: ce que j'ai compris. Ben pour moi en fait ça fonctionne qu'avec des fois donc. Je peux écrire ?

[>I]:oui bien sur.

[>E2]: et ben pour moi ça fait ici deux fois deux. Donc ça donne 4 (montre le 2 H2 dans l'équation de E1) . Et deux fois, ici ça fait deux (montre le 2 (H2O) et ajoute une flèche partant du 2 vers le 2 de Hé avec un signe multiplié sous la flèche) et donc ça fait H4 donc ça fait H4O2 et ben donc ben là c'est comme s’il y avait écrit 4. C'est bon en fait.

[>I]:et donc si je fais la même chose pour l'ammoniac.

[>E1]: euh j'ai pas trop compris là par contre (écrit 2H3 + N2 donne 2NH3)

[>I]: (E2 écrit H2 + O = H2O et H3 + N = H3N) là tu as remis ce que tu avais écrit ?

[>E2]: oui c'est parce que (...)

[>E1]: ah 2 volumes alors.

[>I]: alors de quoi est constitué le gaz hydrogène ? la molécule c'est H ou c'est H2 ?

[>E2]: c'est H. La molécule c'est H3 ?

[>I]: C’est H3 ?

[>E2]: oui.

[>I]: l'atome d'hydrogène il peut s'associer trois fois ?

[>E2]: euh non l'atome c'est H mais la molécule c'est H3.

[>E1]: ah oui houlala, c'est trop dur là[>E1]: euh

[>E2]: euh, H3 c'est une molécule ? Pour moi c'est, c'est, c’est. Je sais plus ça m'embrouille.

[>I]: qu'est-ce que l'on vient de voir au niveau des molécules ?

[>E2]: pour moi une molécule c'est un groupe d'atomes liés entre eux. Après qu'est-ce que ...

[>I]: est-ce que je peux mettre n'importe quel nombre d'atomes ?

[>E2]: oui ! On peut mettre 500 atomes cela fera une molécule.

[>I]: cela fait toujours la même molécule.

[>E2]: oui.

[>I]: H, H2, H50.

[>E1]: ben non c'est des molécules différentes non ? Je ne sais pas trop en fait

[>I]: ce sont des molécules différentes ou pas ?

[>E2]: euh

[>E1]: ben parce que si on a trois atomes d'hydrogène, c'est plus du dihydrogène du coup.

[>I]: ah oui c'est plus du dihydrogène.

[>E2]: en fait si on mélange trois atomes d'hydrogène, cela fait un énorme atome d'hydrogène mais cela ne fait pas une molécule ? Enfin. Pour moi Monsieur (nom de son professeur) il m'a fait rentrer une définition et je voudrais savoir si elle est bonne ou pas. Une molécule est un groupe d'atomes liés entre eux. C'est ça. Elle est complète ?

[>I]: c'est ce que l'on a dit au tout début.

[>E1]: mais alors est-ce que l'on peut mettre n'importe quel atome ensemble ?

[>I]: c'est bien la question que je vous pose ?

[>E1]: ah, ah.

[>I]: On a dit au départ les espèces chimiques sont constituées de molécules, elles-mêmes constituées d'atomes. Et Sagredo demandait comment on peut distinguer deux molécules et vous m'avez dit le type d'atomes et le nombre d'atomes.

[>E2]: ben là le type c'est hydrogène et le nombre c'est ...

[>I]: donc si t'écris H3, cela va pas être la même chose que H2 ?

[>E1]: ah non du coup.

[>E2]: je suis sûre qu' H3 c'est une molécule en fait.

[>I]: ah non elle n'existe pas.

[>E1]: c'est impossible de mettre H3. Cela n'existe pas ?

[>I]: non. On ne met pas nous on observe.

[>E2]: ah.

[>E1]: c'est un peu des maths là du coup.

[>I]: non c'est ce que l'on observe dans la nature. Et les chimistes ont eu du mal à trouver les formules.

566 [>E1]: mais dihydrogène il y en a dans l'air ?

567 [>I]: très peu.

568 [>E1]: parce que du coup comment ils font pour associer des atomes alors qu'il y en a un peu
569 partout, ils peuvent pas deviner euh. C'est un peu compliqué la question mais s'ils veulent associer
570 trois atomes d'hydrogène pour voir si cela peut créer une molécule ben comment ils peuvent faire
571 parce qu'il y a plein d'autres atomes autour dans l'air.

572 [>I]: on peut isoler le gaz sur lequel on veut travailler .

573 [>E1]: ah.

574 [>I]: on peut isoler du dioxygène et faire un récipient de dioxygène seul

575 [>E1]: ah d'accord.

576 [>I]:on peut isoler les gaz, les mettre en contact et les faire réagir. Mais ils vont réagir d'une certaine
577 façon. On ne peut pas imposer les molécules

578 [>E1]: oui.

579 [>I]: les atomes s'associent d'une certaine façon. Et le problème des chimistes est de comprendre
580 comment ils s'associent. Alors de quoi les chimistes vont s'aider ? Qu'est-ce que l'on étudie depuis le
581 début.

582 [>E2]: mais j'ai une petite question sur le paragraphe 9, c'est des molécules ou des atomes ?

583 [>I]: comme ils sont ensemble.

584 [>E2]: donc c'est des molécules mais là c'est deux atomes d'hydrogène.

585 [>I]: oui que je peux écrire HH ou ?

586 [>E2]: H2. Donc en fait H3 c'est une molécule ?

587 [>I]: oui sauf que est-ce qu'elle existe ?

588 [>E2]: ah ah je sais pas.

589 [>E1]: du coup on peut pas.

590 [>I]: effectivement tu peux écrire H3 + N donne NH3 mais si je reprends les volumes ? Qu'est-ce que
591 l'on dit ?

592 [>E2]: il en faut deux.

593 [>E1]: trois.

594 [>I]: trois volumes d'hydrogène, un volume d'azote et cela donne deux volumes d'ammoniac

595 [>E2]: ben on met un deux-là (E2 ajoute un deux devant NH3.)

596 [>E2]: ben un truc comme ça non (a écrit 2H3 + N = 2 NH3).

597 [>I]: oui cela se pourrait et pour l'azote ça marche ?

598 [>E2]: euh l'azote ? alors ?

599 [>I]: là quand tu écris 2NH3, tu as combien de N ?

[>E2]: j'en ai deux. Non. Oui deux.

[>I]: donc l'azote cela donnerait quoi ?

[>E2]: euh N2H6.

[>I]: ici (côté réactif de la réaction) . Là tu dis que tu as 2 N (côté produit de la réaction) et de l'autre côté ?

[>E2]: ah non il faut mettre un deux ici (ajoute un grand 2 devant le N).

[>I]: mais tu as deux volumes d'azote ?

[>E2]: euh.

[>E2]: deux.

[>E1]: ils disent 1.

[>I]: oui ils disent 1 et donc ?

[>E2]: (...) alors.

[>E1]: faut pas alors ça se dit faire du diazote ?

[>I]: oui cela peut être une solution. Les nombres que vous mettez devant, cela représente quoi pour les gaz ?

[>E2]: ben.

[>E1]: ben le nombre de molécules.

[>I]: oui et dans le texte, cela représente quoi ? Les grands nombres que vous mettez dans l'équation ?

[>E1]: le volume de gaz.

[>I]: oui donc là tu ne peux pas décider des volumes. C'est l'expérience qui te dit.

[>E2]: mais alors là il faut juste que j'en ai un un volume de (montre côté réactif le NH3)

[>I]: là on te dit que c'est deux volumes d'ammoniac.

[>E2]: ben là j'en ai deux.

[>E1]: ah non ça marche pas ça (reprend son équation pour écrire au final l'équation correcte)

[>I]: on peut refaire. (Écrit les bilans en volume) On dit c'est deux volumes d'hydrogène, un volume d'azote qui donnent deux volumes d'ammoniac.

[>E2]: d'accord.

[>E1]: je suis pas sûre du tout mais.

[>I]: alors qu'est-ce que tu proposes. Si je lis en volume, combien tu lis.

[>E1]: les volumes, ben il y a trois volumes d'hydrogène, et deux d'azote (a écrit 2H3 + N2 donnent 2H3N).

[>I]:tu lis deux volumes d'hydrogène ?

[>E1]: ah ben du coup il y a le deux et donc ça fait 6.

[>I]: alors dans celle que tu as écrit, ici tu lis combien de volumes ? (Montre l'équation correcte avec le gaz chlorhydrique)

[>E1]: et ben il y avait un volume de dichlore plus un volume de dihydrogène et cela faisait deux volumes de euh.

[>I]:et donc là comment tu lis celle-ci ?

[>E1]: eh ben deux volumes de H3.

[>I]: oui mais il dit quoi monsieur Salviati ?

[>E1]: ah oui il dit qu'il y en a trois.

[>I]: oui c'est trois volumes.

[>E1]: euh.

[>E2]: je comprends plus rien avec les volumes moi une fois on dit qu'il en faut deux, une fois qu'il en faut trois.

[>I]: ah non on trouve cela dans l'expérience.

[>I]:si je reprends les trois expériences. Monsieur Gay - Lussac a fait trois expériences pour les gaz. Donc il dit qu'un volume de gaz hydrogène et un volume de chlore donnent deux volumes de gaz chlorhydrique. Pour le gaz chlorhydrique, vous avez écrit H2 + Cl2 donne 2 HCl

[>E2]: j'ai beaucoup de mal.

[>I]:je les remets là (écrit sur une feuille les réactions en volume) . Un volume hydrogène plus un volume chlore cela donne deux volumes chlorhydrique. Deux volumes hydrogène plus un volume oxygène cela donne deux volumes d'eau. Et oui il dit trois volumes hydrogène plus un volume azote, cela donne deux volumes d'ammoniac.

[>E1]: je crois que j'ai trouvé.

[>E1]: C’est ça non ? (a écrit 3H2 + N2 = 2 NH3)

[>E2]: ah d'accord.

[>I]: Alors ça est-ce que cela te semble coller ?

[>E1]: ben ils disent qu'il y a trois volumes du coup. Pas sûr mais.

[>I]: qu'est-ce que tu en penses de cette équation ? (Question posée à E2) (temps de réflexion)

[>E2]: ben je trouve ça bien.

[>I]: cela te va ? Donc ici hydrogène c'est H2 et je dois le mettre partout. On garde partout la même formule ?

[>E2]: donc là en fait c'est pas un trois c'est un deux ? (Montre H3)

[>I]: là effectivement c'est un deux.

[>E2]: donc là je mets un trois et je mets un trois devant.

[>I]: donc ici on met Cl2 ici O2 et là N2 (écrit les équations à côté de celles des volumes) . C'est ce que tu as écrit (élève 1).

[>E1]: d'accord.

[>E2]: je crois que j'ai compris.

Annexe 31 : Protocole pour les élèves de troisième

Dialogues

Extrait 1

Sagredo : N'est-il pas vrai que monsieur Lavoisier a réussi à décomposer de l'eau en gaz oxygène et en gaz hydrogène ?

Salviati : C'est parfaitement exact. Tous les chimistes sont maintenant d'accord sur ce point. L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé. Dans le nouveau système proposé par monsieur Dalton, tout corps est formé d'un assemblage de particules qui peuvent être elles-mêmes des combinaisons d'autres particules ultimes appelées atomes. Un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre élément, toujours avec des nombres entiers d'atomes jamais avec des fractions d'atomes. La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène H et d'atomes d'oxygène O. La combinaison de ces atomes forme une molécule d'eau.

Sagredo : Et dans ce cas, comment pourrions-nous écrire la formule de cette molécule d'eau ?

Extrait 2

Simplicio : Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée comme guide dans toutes les recherches sur la synthèse chimique : quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons supposer qu'elle est binaire (un atome de chaque). De l'application de cette règle, nous pouvons tirer la conclusion suivante : la molécule d'eau est une combinaison binaire d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Sa formule chimique sera donc HO.

Salviati : Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience, et n'a peut-être pas pris assez de précaution avec sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie. Monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène. Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il parait plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.

Extrait 3

Sagredo : Je souhaiterais étudier maintenant avec vous d'autres cas de réaction avec les gaz. Par exemple, la mise en contact du gaz hydrogène et du gaz chlore permet d'obtenir le gaz chlorhydrique. Comment représentez-vous cela avec les formules de monsieur Berzelius ?

Simplicio : C'est très simple. En me basant sur les combinaisons de monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl.

Extrait 4

Salviati : Monsieur Gay-Lussac, qui a posé en 1808 ses lois mémorables sur les volumes des gaz qui se combinent, a trouvé qu'1 volume de gaz hydrogène s'unit à 1 volume de gaz chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique.

Sagredo : N'y a -t-il pas alors contradiction entre le fait d'obtenir une molécule de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Simplicio, et deux volumes de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Salviati ?

Extrait 5

Simplicio : L'explication la plus simple est qu'1 volume de gaz hydrogène plus 1 volume de gaz chlore donne 2 volumes de gaz chlorhydrique.

Salviati : Mais pour l'eau monsieur Gay-Lussac a trouvé que 2 volumes de gaz hydrogène plus 1 volume de gaz oxygène donnent deux volumes de gaz eau. Et nous connaissons également l'action entre le gaz hydrogène et le gaz azote où monsieur Gay-Lussac trouve que 3 volumes de gaz hydrogène plus 2 volumes de gaz azote donnent 2 volumes de gaz ammoniac. Votre raisonnement ne semble plus applicable.

Extrait 6

Simplicio : Je vous l'accorde, ma première explication était trop simple. Mais des chimistes comme monsieur Berthelot proposent de prendre les poids équivalents des corps simples ou composés et de considérer que ceux-ci occupent des volumes différents mais qu'ils sont entre eux dans des rapports simples comme :

- 1 équivalent d'oxygène occupe 1 volume
- 1 équivalent de chlore, d'hydrogène, 2 volumes
- 1 équivalent de gaz chlorhydrique, 4 volumes.

Sagredo : Cela me semble bien compliqué et je ne comprends pas trop ce que représente l'équivalent. De plus, monsieur Simplicio est reparti des formules de monsieur Dalton. Mais on a vu précédemment que celui-ci s'est déjà trompé pour la formule de l'eau.

Salviati : Vous avez tout à fait raison. J'utilise pour ma part avec d'autres chimistes l'hypothèse de messieurs Ampère et Avogadro : si la température et la pression ne changent pas, le volume de gaz représente la molécule de gaz. Nous supposons alors que les molécules qui constituent un corps simple ne sont pas formées d'un seul atome, comme l'a d'abord suggéré monsieur Dalton, mais sont composés de plusieurs atomes réunis. Monsieur Wurtz change alors l'énoncé de monsieur Berthelot par : un même volume de gaz renferme un même nombre de molécules mais la molécule peut être formée soit :

- par 1 atome (Hélium)
- par 2 atomes (hydrogène, chlore, oxygène, azote)
- par 3 atomes (ozone) …

Extrait 7

Simplicio : Vous êtes en train de nous dire que les formules H et H_2 ne représentent pas la même chose alors que l'une est tout simplement le double de l'autre. En quoi cet énoncé est-il plus clair ?

Salviati : Parce que nous établissons une distinction bien tranchée entre les mots atome et molécule. Cette théorie permet d'interpréter l'ensemble des faits. De nombreux chimistes, messieurs Dumas, Gaudin, Gerhardt, Laurent, pensent que pendant le processus de combinaison chimique, les molécules échangent leurs atomes de manière à donner de nouvelles molécules. Monsieur Wurtz représente cela sous la forme d'une équation : HH + ClCl = HCl + HCl.

Extrait 8

Sagredo : Cette théorie semble se tenir. Donc si je récapitule ce que dit monsieur Salviati, les espèces chimiques sont constituées de particules que nous appelons molécules et ces molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes.

Salviati : C'est tout à fait cela, quoi qu'en dise monsieur Berthelot par la voix de monsieur Simplico. Les molécules d'hydrogène et de chlore ne sont donc pas des atomes ; elles sont biatomiques. Nous allons d'ailleurs les rebaptiser et les appeler molécule de dichlore et molécule de dihydrogène. Et nous appellerons les gaz correspondant : le dichlore et le dihydrogène.

Sagredo : Et on interprète alors la transformation chimique comme un échange d'atomes entre les molécules qui constituent les espèces chimiques.

Salviati : Tout à fait. Cette théorie permet également d'interpréter la formation de l'eau et de l'ammoniac et d'expliquer les volumes de gaz trouvés par monsieur Gay-Lussac.

Extrait 9

Sagredo : Mais alors l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène et d'azote.

Salviati : Exact. Les atomes, de chlore, d'oxygène, d'azote ne se combinent pas de la même façon avec l'hydrogène. Les combinaisons ainsi formées sont : HCl, H_2O, NH_3 et nous pouvons y ajouter CH_4 pour la molécule de méthane. Ainsi, les atomes C, Cl, N et O ne sont pas équivalents entre eux puisqu'ils s'unissent à un même atome dans des quantités différentes.

Extrait 10

Sagredo : Il me reste une dernière question. Maintenant que vous avez une formule pour représenter la molécule, comment faites-vous pour représenter l'espèce chimique ?

Extrait 11

Salviati : Monsieur Gaudin trouve que si l'on voulait compter le nombre des atomes contenus dans une grosse tête d'épingle, en en détachant chaque seconde un milliard, il faudrait continuer cette opération pendant plus de deux cent cinquante mille ans. Une espèce chimique est donc constituée d'un nombre incalculable de toujours la même molécule. Il semble donc pertinent de garder la même formule pour la molécule et pour l'espèce chimique. Par contre pour faire la différence entre la molécule, invisible et l'espèce chimique accessible à nos sens, nous pouvons ajouter un indice à la formule qui désigne l'espèce chimique : un « g » pour gaz, un « l » pour liquide et un « s » pour solide.

Scénario

- **Question sur les Prérequis :**

Ont-ils déjà entendu parler des atomes et c'est quoi pour eux ? Connaissent-ils quelques symboles permettant de représenter les atomes ?

Des molécules ? Connaissent-ils quelques exemples de molécules et quelques formules ? Quelles différences font-ils entre atome et molécule ? Savent-ils comment on représente la formule d'une molécule ?

Avant lecture du texte, faire écrire sur leur feuille une définition de corps simple et corps composé. Faire échanger sur leurs réponses

- **1ère étape : lecture premier Extrait**
  - Que signifie pour vous : « L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé » ? A votre avis pourquoi n'est « plus » ?
  - Revenir sur leur définition corps simple – corps composés
  - Demander aux élèves de répondre à la question de Sagredo en faisant des propositions sur la formule de l'eau et en justifiant leur proposition.
  - Faire comparer leurs propositions et échanger. Leur demander s'ils ont tous la même d'expliquer leur choix

- **2ème étape : lecture deuxième Extrait**
  - Demander aux élèves de donner les formules proposées par les chimistes cités par Simplicio et Salviati et les arguments proposés par chacun d'eux.
  - A quoi Monsieur Berzelius associe-t-il la molécule ?
  - Qu'est-ce qu'ils pensent des formules proposées ? Peuvent-ils choisir ? Quelle formule au final ils choisissent et pourquoi ?
  - Leur faire écrire sur leur feuille par des formules la combinaison de l'hydrogène et de l'oxygène donnant l'eau.

- **3ème étape : Lecture troisième Extrait**
  - Faire écrire aux élèves l'équation de réaction supposée de la transformation chimique entre le gaz hydrogène et le gaz chlore.
  - Faire comparer.

- **4ème étape : Lecture quatrième Extrait**
  - Que pensez-vous des résultats de monsieur Gay Lussac. Est-ce que cela change quelque chose pour la réaction que vous avez écrite ? Et si cela ne change rien que faites – vous de ces résultats ? Est-ce qu'il faut en tenir compte ?

- **5ème étape : Lecture cinquième Extrait**
  - Que pensez-vous de l'explication de Simplico avec l'ensemble des réactions proposées par Salviati ?
  - Avez-vous une explication pour faire le lien avec les observations de Gay-Lussac ?

- **6ème étape : Lecture sixième Extrait**
  - Que pensent-t-ils des arguments des uns et des autres ?
  - Peuvent-ils écrire l'équation entre le gaz hydrogène et gaz chlore en utilisant la proposition de M Wurtz ?

- **7ème étape : Lecture septième Extrait**
  - Reprendre les échanges précédents et comparer à la réaction qu'ils ont écrite.
  - Peut-on dire que H et H2 sont identiques ? Pour quelles raisons les chimistes ont eu besoin de les distinguer ?

- **8ème étape : Lecture huitième Extrait**
  - Faire échanger sur la définition atome et molécule.
  - Que se passe-t-il alors au cours d'une réaction chimique ?
  - Leur faire écrire sur la feuille les équations de formation de l'eau et de formation de l'ammoniac.

- **9ème étape : Lecture neuvième Extrait**
  - Revenir sur leurs formules
  - Comment les atomes sont-ils alors disposés dans la molécule pour H2O, NH3 et CH4 ?
  - Si vous doublez les formules, est-ce alors toujours la même molécule ?

- **10ème étape : Lecture dixième Extrait**
  - Les faire échanger sur cette question.

- **11ème étape : Lecture onzième Extrait**
  - Revenir sur les échanges précédents.

Annexe 32 : Transcription des échanges : élèves de troisième

[>E1]: c'est ce qui compose une molécule et il est composé de protons, de neutrons et d'électrons

[>E2]: et il y a pas juste des protons et des électrons

[>E3]: électrons c'est autour et protons

[>E4]: protons et neutrons ça fait ça fait neutron

[>E2]: neutrons

[>E4]: neutre. Non protons et neutrons ça fait neutron

[>E3]: le noyau

[>I]: et alors tu as parlé de molécules

[>E1]: oui puisque les molécules sont faites d'atomes

[>I]: oui

[>E1]: je vais pas donner d'exemple sur la feuille

[>I]: au dos c'est possible

[>E1]: ben l'eau

[>E2]: tu sais que c'est pas un contrôle rassure moi[>E1]: oui je sais ben par exemple deux hydrogène et un oxygène

[>E2]: c'est quoi la formule

[>E3]: moi je sais. On peut l'écrire ou pas

[>I]: cela tombe bien je vais vous la demander pour l'eau. Je crois que c'est demandé un peu plus loin

[>E4]: ben vous mettez pas le 2 en gros ?

[>E2]: si il faut mettre en gros

[>E4]: en gros ? parce que le carré c'est en haut. Le pour moi

[>E3]: non le petit 2

[>E2]: n'importe quoi il faut mettre un grand 2 ?

[>E4]: bon ben je vais être le seul à mettre un grand 2 c'est pas grave

[>I]: justement vous devez la proposer la formule de l'eau donc allez-y

[>E4]: peut-être que j'ai tort mais c'est ce que je pense

[>I]: là vous mettez votre formule

[>E2]: David il avait eu tous les points parce qu'il avait mis un ...

[>E1]: grand 2

[>E3]: c'est un petit deux mais je ne sais plus pourquoi

[>E2]: parce qu'il y a

[>E1]: deux hydrogènes et un oxygène

[>E3]: c'est tout

[>E1]: c'est tout

[>I]: l'eau d'accord vous avez mis une formule et donc est-ce que corps simple et corps composé

[>E3]: on l'écrit maintenant

[>I]: vous écrivez ce que vous pensez[>E3]:

un corps avec 6 bras c'est un corps composé

[>I]: une définition de corps simple et corps composé

[>E4]: corps composé c'est de l'eau avec du sirop à la menthe. cela fait du sirop composé

[>E2]: euh corps simple ben genre (rires)

[>I]: vous pouvez aussi si vous ne voyez pas de définition, donner des exemples

[>E2]: ben de l'eau (....) corps composé ben je sais pas mojito. ben oui c'est composé. Y a du rhum

[>E1]: c'est quoi votre définition

[>E2]: oui dans le mojito y a de la menthe, de l'eau, des glaçons, y a du rhum et y a quoi d'autre. je sais j'ai vu la recette y a pas longtemps à Buffalo grill

[>I]: et ça c'est un corps composé pour vous

[>E2]: ben oui

[>E1]: enfin si mais bon

[>E2]: oasis tropical. Y a l'eau et des aromes

[>I]: vous êtes tous d'accord avec ça

[>E1]: ben non

[>E3]: j'ai pas entendu

[>E2]: je parlais de mojito

[>I]: ce serait quoi pour toi

[>E1]: un objet qui ne contient qu'un seul type de molécules

[>E4]: oui c'est ce que j'ai mis

[>E2]: ben c'est comme H2O. Y un seul type de molécules

[>E4]: H2O

[>E2]: non en fait j'ai rien dit

[>E4]: H2O c'est une molécule

[>E2]: oui je sais

[>E4]: alors pourquoi tu dis que c'est plusieurs

[>E2]: je me suis trompée

[>E1]: l'eau c'est bien un corps simple car il y a qu'un seul type

[>E2]: ben c'est ce que j'ai dit

[>E1]: c'est ce que j'ai dit

[>E1]: dans le mojito tu as tout

[>E2]: oui c'est un corps composé

[>E1]: la menthe en elle-même est un corps composé

[>E2]: ben voilà ça marche

[>I]: est-ce que vous voyez la différence ou est-ce qu'il y a une différence pour vous entre corps composé et mélange

[>E1]: oui

[>E2]: et mais la menthe il n'y a que de la menthe. Pourquoi tu dis que c'est un corps composé

[>E4]: dans la menthe il n'y a pas que des atomes de menthe. Y a différents types de molécules

[>E2]: tu donnes des exemples

[>E1]: je connais pas les molécules de la menthe

[>E2]: ben comment tu sais qu'il y en a plusieurs alors

[>E2]: ben la menthe c'est de la menthe. Genre tu mets des graines, ça pousse et ça fait de la menthe

[>I]: donc mélange - corps composé

[>E2]: corps composé mojito et corps simple eau

[>E2]: mais on demande pas trucs on demande des définitions

[>E2]: non elle a dit que des exemples c'est bon

[>I]: je vais vous faire lire un texte avec trois personnages : Simplicio, Sagredo et Salviati. Les dialogues sont reconstruits à partir de textes de chimistes du XIXe siècle au moment où les formules sont apparues. Donc on va voir dans ces dialogues comment les chimistes ont mis cela en place. Je vais vous donner plusieurs extraits au fur et à mesure et je vais vous poser des questions sur ces dialogues. Le premier texte parle de l'eau et de corps simple et de corps composé.

(Travail à partir de l'extrait 1)

[>E3]: ah l'eau c'est un corps composé. C'est ce que j'avais mis avant

[>E4]: dans ce cas c'est un seul type d'atomes

[>I]: c'est ce que vous pensiez au début

[>E3]: comme ça pas de couleur je pensais que c'était

[>E2]: ben la menthe si

[>E3]: la menthe pourquoi tu me parles de la menthe

[>E2]: ben parce que regarde du double vitrage ben c'est transparent , ça a pas de couleur et pourtant entre les deux y a du gaz

[>E4]: hein hein

[>I]: à votre avis avec ce texte, est-ce que vous changez ce que vous pensiez de corps composé et de corps simple ?

[>E3]: ah oui. C’est un peu ce que j'avais mis. Dans corps simple j'avais mis qu'il y a qu'un seul, j'ai mis noyau mais qu'un seul un truc. Et corps composé il y en a plusieurs

[>I]: donc qu'un seul atome et corps composé il y en a plusieurs atomes

[>E4]: un seul type d'atome pour un corps simple. Plusieurs types d'atomes pour un corps composé. Moi je dirais

[>E2]: pour le coup j'ai plus d'exemple. Il faut que je trouve un autre exemple

[>E4]: l'air l'oxygène. L'oxygène O2

[>E2]: ah l'hydrogène

[>E1]: en fait je dirai que la molécule d'eau est un corps composé mais que l'eau en tant qu'objet est un corps simple. Il y a une différence entre les deux. Une molécule peut être composée mais un amas de molécules un corps simple

[>I]: alors est-ce que vous êtes d'accord avec ce qu'il dit ou vous réagissez

[>E2]: tu peux répéter s'il te plaît

[>E1]: la molécule d'eau est un corps composé puisqu'elle contient plusieurs types d'atomes mais l'eau en elle-même, ben je sais pas dans la baignoire. L'eau qu'il y a dans une baignoire c'est un corps simple qui contient qu'un seul type de molécules.

[>E4]: je suis pas d'accord

[>E2]: je suis pas d'accord non plus

[>E4]: puisque justement l'eau elle est composée de molécules d'eau.

[>E2]: c'est H2O

[>E4]: ce que tu appelles l'eau, c'est

[>E3]: mais pourquoi l'eau dans une baignoire

[>E1]: comme ça

[>E2]: et il y a de la mousse

[>I]: on va dire que l'on a pas ajouté de savon encore

[>E2]: oui mais dans la baignoire y a toujours des petits résidus

[>E1]: non mais je prends la baignoire comme exemple. Un bécher on va prendre un bécher. L'eau qu'il y a dans ce bécher c'est un milliard d'ensembles de molécules mais d'un seul type de molécule.

[>E2]: pourquoi milliard

[>E1]: j'ai dit plusieurs milliards

[>E2]: oui mais pourquoi milliard justement

[>E3]: parce qu'il y en a beaucoup. Attends laisse-le expliquer.

[>E1]: mais si on parle de la . Si on parle de savoir que l'eau est un corps simple ou un corps composé on peut dire que c'est un corps composé car il contient plusieurs atomes

[>E3]: mais du coup c'est quoi les atomes ... de l'eau

[>E1]: deux hydrogène et un oxygène.

[>E2]: de quoi

[>E1]: deux hydrogène et un oxygène

[>E2]: mais non mais pour moi l'eau c'est un corps composé

[>E1]: c'est un corps composé

[>E4]: l'eau que ce soit dans une baignoire ou dans un bécher c'est rempli de molécules d'eau. Or une molécule d'eau c'est H. C'est deux H plus O. On est d'accord. Donc ça fait deux atomes donc c'est un corps composé

[>E1]: mais moi je parle de la molécule d'eau, de la molécule d'eau en elle-même

[>E2]: mais la molécule d'eau en elle-même c'est H2O

[>E1]: pas de ce qui compose la molécule d'eau comme si c'était un corps uni.

[>E2]: ben la molécule d'eau c'est H2O pour moi

[>I]: alors est-ce que Lavoisier dans le texte, est-ce qu'il parle de la molécule d'eau ? Est-ce que cela parle de molécule ?

[>E2]: non. Ah si

[>E1]: oui

[>E4]: non

[>E2]: non

[>E4]: il parle d'eau

[>E2]: ah si tout à la fin

[>I]: quand il dit l'eau n'est pas un corps simple mais bien un corps composé, est-ce qu'il parle de molécules ? À votre avis.

[>E2]: non c'est l'atome

[>I]: et quand on dit monsieur Lavoisier a réussi à décomposer de l'eau. Ce qu'il décompose c'est quoi, c'est la molécule ?

[>E1]: la molécule

[>E2]: les atomes. C’est la molécule qu'il décompose en atome.

[>I]: il parle de quoi quand il fait la réaction ? d'une molécule ou du liquide ?

[>E1]: d'une molécule j'imagine

[>I]: vous êtes capable de partir d'une molécule lorsque vous faites des manipulations ? On est capable de manipuler les molécules ?

[>E1]: non pas encore

[>I]: Donc Lavoisier il parle de quoi ?

[>E1]: du liquide

[>I]: Pourquoi on dit dans le texte que l'eau n'est plus un corps simple ?

[>E1]: parce qu'avant on considérait l'eau comme un corps simple

[>I]: vous savez ce que pensait les Grecs des états de la matière ?

[>E4]: que chaque chose était composée de quatre, de quatre éléments différents et c'était l'eau, le feu, la terre et l'air et qu'ils se partageaient, qu'il y avait un pourcentage de chaque dans chaque chose.

[>I]: et donc en fait ce que fait Lavoisier et qui est le premier à faire cela c'est qu'il arrive à faire une réaction avec l'eau et qu'avec l'eau il obtient

[>E4]: deux gaz

[>I]: deux gaz qui ne sont plus de l'eau et donc d'où vient cette définition de corps composé.

[>I]: On continue. La formule vous avez déjà écrite celle que vous pensiez pour l'eau (...) donc je vous laisse lire cette nouvelle partie (travail sur extrait 2)

[>I]: est-ce clair ? Est-ce qu'il y a des mots que vous ne comprenez pas ? On fait d'abord une explication de texte

[>E1]: ça va à peu près

[>I]: je vérifie si le texte est accessible

[>E2]: ah par contre en cours je ne pense pas que les autres vont comprendre

[>E1]: oui je ne pense pas qu'il y ait beaucoup de personnes qui comprennent

[>E2]: parce qu'en cours c'est déjà galère de suivre. Là je suis dans le truc mais si je suis en cours je vais avoir du mal à suivre

[>E1]: j'en connais certains dans la classe qui seraient paumés dès le départ

[>E2]: là je lis et dès que je comprends pas je repasse dessus mais en cours cela va aller vite, etc.

[>I]: donc cela vous paraît trop compliqué

[>E2]: un peu quand même

[>E1]: ouais

[>E2]: pas pour nous mais on pourrait décrocher en fait

[>E3]: mais c'est pas compliqué en fait car les mots ils sont faciles à comprendre et il y a pas des choses compliquées. Sauf qu'il parle d'atomes et tout ça

[>E2]: oui mais là on pourrait décrocher

[>E1]: il faut quand même essayer à comprendre

[>E2]: même si les mots sont simples faut comprendre la chose

[>E1]: il y a des choses comme "de l'application de cette règle" je suis sûr qu'il y en a certains qui ne comprendraient pas

[>E4]: déjà que binaire, il y a la moitié de la classe qui ne sait pas ce que cela veut dire.

[>E1]: un peu plus de la moitié

[>I]: justement pour entrer un peu plus dans le texte si je regarde ce que disent Simplicio et Salviati, on voit que Simplicio s'appuie sur monsieur Dalton. Je suppose que vous connaissez monsieur Dalton ?

[>I]: je suppose par contre que vous ne connaissez pas Berzelius ?

[>E4]: non

[>E1]: de nom j'en ai entendu une ou deux fois parlé

[>E2]: c'est qui ?

[>E1]: un chimiste. J'en ai entendu une fois parler.

[>I]: et Dalton

[>E2]: si ça me dit quelque chose mais je ne sais pas si c'est à cause de la BD ou c'est parce que j'ai entendu le nom

[>I]: c'est lui qui relance la théorie atomique

[>E1]: j'en ai entendu parler dans un, dans le livre de classe

[>I]: si je regarde ces deux savants, ils sont de la même époque. Dalton relance la théorie atomique et les formules que vous utilisez sont de Berzelius. C'est lui qui donne les symboles de la chimie. Quelle est pour vous la formule proposée par Dalton et celle proposée par Berzelius ?

[>E1]: la formule proposée par Dalton c'est HO et par Berzelius c'est H2O

[>I]: Tout le monde est d'accord.

[>I]: Et alors qu'est-ce qu'ils utilisent comme raisonnement l'un et l'autre. Pourquoi c'est HO pour Dalton et pourquoi pour Berzelius c'est H2O ?

[>E1]: Dalton, il a regardé quels sont les deux gaz qui en sont sortis alors que Berzelius il a regardé la quantité de gaz qui en est sorti de chaque côté.

[>I]: tout le monde est d'accord avec ça

[>E4]: oui

[>I]: et donc la formule pour Berzelius c'est quoi

[>E1]: H2O. C’est-à-dire deux volumes d'hydrogène pour un volume d'oxygène

[>I]: d'accord donc pour Berzelius il s'appuie sur quelque chose qui provient de quoi ? de la théorie de l'expérience ?

[>E3]: ben ils ont tous les deux fait des expériences

[>I]: alors est-ce que Dalton fait une expérience ?

[>E4]: non par rapport aux expériences des autres, je crois

[>E2]: ah oui

[>I]: Quelle est la règle de Dalton pour choisir les formules

[>E1]: il a regardé les expériences des autres et il en a tiré une théorie

[>I]: mais pourquoi lui il fait HO et pas H2O

[>E1]: parce qu'il a vu qu'il y avait deux gaz mais il s'est pas intéressé sur quel est la quantité de chaque gaz

[>I]: et alors est-ce que cela peut être HO ou H2O ? Est-ce que cela a une importance pour vous ?

[>E2]: ben oui ça change tout

[>I]: alors qu'est-ce que cela change ?

[>E2]: ben si c'est HO cela peut-être autre chose que de l'eau ça peut correspondre à autre chose alors qu'H2O on sait qu'habituellement c'est de l'eau. Si on dit HO cela peut correspondre à autre chose, une autre comment cela s'appelle, une autre combi enfin un autre atome enfin une autre molécule plutôt. Cela pourrait être une autre molécule

[>I]: et alors est-ce que je peux doubler. Si je fais deux fois H2O, cela fait H4O2 ? Est- ce que cela reste de l'eau ?

[>E4]: ben oui

[>E1]: oui

[>E2]: oui il y en a deux fois plus

[>E3]: H4O2 ?

[>E1]: oui mais l'atome se fissurerait, il y aurait deux atomes

[>E3]: Non

[>E1]: ah je sais en fait chaque atome on va dire a un nombre de bras qui peut accrocher et je sais que l'atome d'hydrogène n'en a qu'un seul, enfin je crois

[>I]: et pour vous autres ?

[>E3]: ben pour moi cela ne pourrait pas marcher parce qu'il y a qu'un atome d'oxygène et qu’il peut pas y en avoir plusieurs

[>I]: si la formule de l'eau c'est H2O, est-ce que peux la doubler, la tripler, etc ?

[>E4]: pour moi on aurait pas un atome H4O2 on aurait 2 H2O ou 3 H2O

[>I]: et pour toi

[>E3]: oui pareil

[>E4]: c'est que que l'on a vu l'année dernière. L'année dernière on a jamais vu un truc qui fait H4O2 par contre à chaque fois qu'on avait dès que l'on passait de certaines molécules à d'autres et pour ça il fallait trouver certaines molécules par exemple quand on dédoublait l'eau on ne mettait pas H4O2 on mettait 2H2O

[>E2]: j'ai pas compris. Ah oui le grand 2 devant

[>E4]: oui le grand 2 devant. Avec monsieur ... On écrivait en rouge

[>E3]: quand on double on met un 2 devant

[>E4]: oui pour moi aussi

[>I]: on continue les dialogues. Vous avez une nouvelle réaction (extrait 3)

[>I]: avant d'échanger à nouveau je vais vous demander de répondre aux questions 3 et 4 de la feuille re réponse. Question 3 vous allez symboliser la réaction qui permet de former l'eau

[>E3]: et j'ai pas compris la question 3

[>I]: oui dis moi

[>E3]: Proposez, à l'aide de formules, la combinaison entre le gaz hydrogène et le gaz oxygène qui permet d'obtenir de l'eau

[>I]: oui ?

[>E3]: on écrit la formule de l'eau ?

[>I]: il faut essayer d'écrire cela avec les formules. Est-ce que tu es capable d'écrire quelque chose qui permettrait de symboliser la phrase ? Plutôt que de mettre des mots, peux-tu les remplacer par des symboles ? tu peux commencer si tu préfères par la question 4.

[>E4]: hydrogène c'est H le chlore c'est Cl

[>E2]: oui mais je connais pas moi. Mais moi l'eau je sais que c'est H2O mais le truc chlorhy chlorhydrique, je connais pas moi

(Extrait 5)

[>E4]: C'est compliqué ça. C'est bizarre

[>E2]: deux volumes oh c 'est deux HCl

[>E4]: houais c'est bizarre

[>E3]: attendez

[>E4]: je trouve ça super bizarre. Un H plus Cl = 2 HCl. C'est bizarre

[>E2]: ben peut-être c'est quand il rentre en collision

[>E2]: ben c'est comme les bombes nucléaires. ça part en cacahuètes

[>I]: alors est-ce que cela change quelque chose à la réaction que vous avez écrite

[>I]: et alors est-ce que cela pose un problème le fait que vous ayez que 4 H et que là il y ait 8 H

[>E2]: ben c'est parce que

[>E1]: euh ...

[>E2]: oui mais sinon c'est 7 ça marche comme 5

[>E1]: comment ?

[>E4]: je viens de t'expliquer que c'était obligé d'être un nombre pair parce qu'il y en a autant de chaque. Attends non non

[>E2]: ben non c'est 3,5

[>E4]: alors tu vois

[>E1]: ça fait 3,25

[>E4]: on dit que c'est impossible d'avoir des fractions d'atomes, ça on l'a dit au début

[>E2]: c'est ce que je viens de dire

[>E1]: regarde juste je pense que ça fait 5 si jamais t'as ça (il écrit) hop hop t'as une grosse bulle là donc ça fait 6 HCl

[>E2]: tu veux dire que 4 et 3 ça fait 6

[>E1]: et attend et regarde bien et là à côté tu as le petit H qui part

[>E2]: et donc

[>E1]: et bien donc c'est comme si tu en enlevais un

[>E2]: et il va où l'autre

[>E3]: ah oui et puis il en y a quatre et quatre

[>E4]: non mais c'est deux poches de gaz de la même taille

[>E2]: mais faut bien qu'il aille quelque part

[>E4]: deux poches de gaz de la même taille

[>E1]: sauf que là il y a deux poches de gaz différentes

[>E2]: oui mais il va où l'hydrogène. Il va pas se promener dans les airs tranquille

[>E1]: si

[>E2]: ben non

[>E1]: si

[>E2]: ben non

[>E1]: il va rester bloqué sur un côté comme ça

[>E3]: pourquoi il va là et il va pas là

[>E4]: et après il va chercher un autre atome. il va chercher un deuxième atome

[>E2]: pourquoi il a fait un schéma avec le H ici alors pourquoi pas ici

[>E1]: il y a plus la place

[>E4]: parce qu'il faut qu'il y ait un nombre pair

[>E2]: ben 7 c'est pas un nombre pair

[>E3]: justement

[>E4]: oui c'est pour ça que l'on en a enlevé un

[>E2]: oui mais il va aller où il va pas rester à côté il va pas s'envoler dans les airs

[>E1]: ben si

[>E2]: ben non il est pas en nombre pair

[>E1]: si

[>E2]: ben non

[>E1]: si malheureusement

[>E3]: attendez j'ai une juste question pourquoi ça besoin d'être pair là

[>I]: dialogue suivant (extrait 6)

[>I]: regardons que Simplicio pour l'instant on regardera après Salviati. Comment raisonne Simplicio ?

[>E3]: un plus un ça fait deux

[>E1]: oui c'est deux en soi ...

[>I]: que pensez-vous de l'explication de Simplicio

[>E1]: ben un plus un égale deux

[>E3]: ça se comprend puisque si un gaz d'hydrogène est un volume de gaz de chlore ça fait deux

[>I]: donc l'explication de Simplicio pour vous c'est bon

[>E4]: mmmmhh non

[>I]: non pourquoi

[>E4]: je ne sais pas cela me paraît bizarre

[>I]: qu'est-ce qui te paraît bizarre ?

[>E4]: que si on fait ça avec des chiffres comme Salviati l'a dit donc là j'ai quatre H, quatre Cl hop là hop là hop là. (il dessine) donc là on a une grosse bulle avec 4 H plus 4 Cl après on redivise on a deux bulles avec deux H 2 Cl, 2 H 2 Cl.

[>E1]: ha tu n'as pas encore rassemblé la molécule

[>E2]: c'est ce qu'il vient de dire

[>E4]: c'est ce que je viens de dire

[>E2]: tu as dit on ne l'écrit pas comme ça

[>E4]: oui oui donc là

[>E3]: là je comprends rien à son schéma

[>E4]: imagine

[>I]: dis-nous ce que tu ne comprends pas

[>E3]: là il divise par deux

[>E2]: ben c'est comme pour l'autre [...] qu'il divise par deux

[>E4]: justement là ça nous donne des demis j'ai l'impression que cela donne des demi atomes

[>E2]: comme un demi Paul tu le découpes en deux

[>E4]: mais sauf on a dit c'est dans l'Extrait 1 il y a marqué que c'est pas possible d'avoir des fractions d'atomes

[>E2]: du coup pour moi ce résultat il est faux

[>I]: qu'est-ce qui est faux ?

[>E3]: non mais en fait c'est peut-être faux

[>E2]: le résultat H plus quelque chose

[>E4]: H + Cl = 2 HCl cela me paraît bizarre

[>E1]: moi personnellement

[>I]: le résultat expérimental vous paraît faux et donc quand on fait l'expérience on prend un volume de gaz hydrogène et un volume de gaz chlore et on obtient deux volumes de gaz chlorhydrique

[>E2]: non mais en fait ça mais laisse-moi parler Coralie, laisse-moi parler. C'est comme quand il y avait les atomes avec la gelée. On dit qu'il y a des électrons un peu partout comme une gelée donc c'est comme ça

[>E3]: de quoi tu parles

[>I]: mais là ce sont les résultats de l'expérience

[>E2]: ben ils se sont trompés

[>I]: la gelée et les électrons cela semble plutôt une explication théorique. Là vous voulez remettre en cause l'expérience ?

[>E2]: oui

[>I]: non

[>E3]: attendez (chercher sur sa feuille)

[>I]: si on la refait on retrouve toujours un volume plus un volume qui donnent deux volumes

[>E3]: non mais en fait un un gaz d'hydrogène plus un chlore ça fait un HCl et pas deux

[>I]: sauf que l'expérience indique que l'on obtient deux volumes

[>E3]: mais

[>E2]: ils se sont trompés. Ils étaient drogués

[>E2]: ah mais ils peuvent avoir faux

[>I]: mais on l'a refaite depuis et de nombreuses fois et on obtient toujours deux volumes

[>E3]: on doit comprendre pourquoi ?

[>I]: on cherche effectivement une explication. Simplicio il vous propose un volume plus un volume donnent deux volumes. Alors regardons ce que dit Salviati ensuite

[>E1]: moi je dis que ça donne deux eaux

[>E3]: oui mais là c'est pas la même chose parce que là c'est 1 H et 1 Cl et deux et là deux oui

[>E2]: ben c'est comme si tu faisais 2x plus 2 y

[>E3]: moi je pensais au début un plus un ça fait deux mais en fait ici ça va pas ca devrait faire trois

[>E1]: 4 x y donc c'est comme si tu représentais H et Cl

[>I]: si je reprends les expériences sur les volumes. Qu'est-ce qu'il dit pour HCl ?

[>E1]: en volume, HCl

[>I]: pour former HCl c'est

[>E1]: un chlore un hydrogène et deux HCl

[>I]: et qu'est-ce qu'il dit pour l'eau ?

[>E4]: deux H plus un O égal deux H2O

[>I]: et qu'est-ce que l'on dit après pour l'azote ? Est-ce que vous connaissez le symbole de l'azote ?

[>E3]: oui c'est N

[>E1]: c'est Berzelius qui a fait le tableau périodique

[>I]: non mais c'est Berzelius qui a choisi les symboles. Vous voulez faire une pause ?

[>I]: les relations sont écrites au tableau. Je vous rappelle que Simplicio pour la première réaction explique que un volume plus un volume cela donne au final deux volumes. Sauf que cela ne fonctionne plus avec l'eau et avec l'ammoniac

[>E1]: parce que la formule du gaz chlorhydrique c'est HCl il peut pas y avoir 2 c'est pas H2Cl2 et donc il faut que cela soit 2 HCl alors que pour l'eau c'est H2O donc il faut que ... y en a pas besoin d'avoir 2 HO. Enfin c'est bizarre ce que j'ai dit si ... pour euh

[>I]: alors autre explication. On réfléchit

[>E4]: pour moi tout ne vaut pas la même chose. Tous les atomes tous les volumes d'atomes ne valent pas la même chose en fait je pense et tous les volumes de molécules ne valent pas la même chose

[>E2]: on est sur laquelle là

[>I]: ce que tu veux

[>E3]: par exemple sur le dernier 3 volumes d'hydrogène et un volume d'azote égalent deux volumes d'ammoniac c'est bizarre parce qu'il y a trois et un et peut-être qu'il y a tout simplement dans les trois et un que deux volumes d'ammoniac c'est ça dans les deux

[>I]: c’est-à-dire dans les deux

[>E3]: mais déjà d'hydrogène à azote et d'hydrogène à ammoniac c'est pas simple

[>I]: alors je ne vous ai pas mis les formules l'eau c'est H2O, là vous avez vu que c'était HCl et celle de l'ammoniac qui est NH3. Si cela peut vous aider

[>E3]: alors N c'est azote

[>I]: oui

[>E2]: il y a deux volumes d'azote

[>E4]: c'est bizarre si c'est NH3 et bien le premier atome, la première molécule prendrait trois hydrogènes et un seul d'azote. Donc cela veut dire qu'il y a un volume d'azote. Je ne vois pas comment on peut faire une autre molécule avec un seul volume d'azote

[>E4]: pour moi c'est un atome par exemple un atome ils n’ont pas les mêmes volumes par exemple là-dessus

[>I]: toi tu penches pour chaque atome a son volume

[>E4]: a son volume et après ça dépend des formules que l'on fait. Cela donne différents volumes

[>I]: et alors tu n'as pas donné d'idée encore

[>E2]: ben après moi je suis assez d'accord avec l'hypothèse de Paul

[>I]: chaque atome va avoir son propre volume

[>I]: alors on va regarder les suites et les hypothèses faites par les chimistes (extrait 6)

[>E2]: a ben c'est ce que je disais

[>E1]: ce que Paul disait

[>I]: alors si on prend Simplicio vous avez l'air de dire que c'est votre hypothèse

[>E2]: oui

[>E4]: sauf que cela reste Simplicio donc c'est faux

[>I]: est-ce que cela fonctionne pour toutes les réactions

[>E4]: enfin oui avec ces deux là

[>I]: on dit que l'hydrogène c'est deux volumes

[>E2]: tout à fait

[>E4]: ben ça marche pour le premier mais si on passe au deuxième ça marche déjà plus

[>I]: et avec le troisième

[>E4]: ça marche pas non plus

[>I]: donc ça n'a pas l'air si évident que ça. Les atomes peuvent-ils changer de volume en fonction de là où ils réagissent ?

[>E4]: non mais il faudrait trouver

[>E2]: ça dépend avec quoi ils réagissent

[>E4]: il faudrait trouver un autre nombre

[>E1]: chaque atome prend un morceau de place

[>E4]: oui

[>E1]: l'eau prend par exemple plus de place que l'hélium, l'azote prend plus de place que l'eau

[>E4]: mais avec les chiffres c'est pas bon par rapport à ça (il montre le tableau où sont écrits les volumes pour les trois réactions)

[>I]: alors que dit en fait Salviati ? Sagredo cela lui semble bien compliqué. Je vous laisse lire ce que dit Salviati.

[>I]: que donnent comme hypothèse Ampère et Avogadro ? (Extrait 6)

[>E3]: ben il dit que ce qui constitue un corps simple, cela peut être fait de plusieurs atomes. Ne sont pas que formés que d'un seul atome comme l'avait indiqué monsieur Dalton.

[>I]: alors on regarde juste l'hypothèse d'Ampère et d'Avogadro. Les trois premières lignes.

[>E4]: si la température et la pression ne changent pas, le volume de gaz représente la molécule de gaz.

[>I]: donc par rapport à ce que vous indiquiez tout à l'heure dans vos hypothèses c'était un volume différent par atome

[>E4]: c'est ça.

[>I]: et là que dit Salviati ?

[>E4]: si la température et la pression ne changent pas, le gaz

[>I]: par rapport à votre hypothèse

[>E4]: que c'est pas juste

[>I]: c’est-à-dire ? [Inaudible]

[>I]: si on prend un volume, qu'est-ce qu'ils disent ?

[>E1]: que c'est la même chose que cela soit un volume d'ammoniac, d'eau ou de chlorhydrique

[>I]: donc le changement de gaz ne change pas le volume

[>E4]: c'est la température et la pression

[>I]: et pour l'instant cela n'a pas changé

[>E1]: cela peut changer tout seul

[>I]: pour Simplico, l'oxygène occupe 1 volume, le chlore deux volumes, l'hydrogène deux volumes, etc. Est-ce qu'Ampère et Avogadro c'est la même hypothèse ?

[>E1]: Ampère et Avogadro disent que c'est plutôt les atomes qui changent de taille

[>E4]: en fait ce qu'ils essaient d'expliquer, enfin c'est qu'il y a des atomes des molécules d'un seul atome sont composés par un atome, deux atomes ou trois atomes ou plus.

[>E2]: et que donc

[>E4]: et que donc ils prennent plus ou moins de place. Plus il y a d'atomes et plus cela prend de place.

[>I]: est-ce que cela change quelque chose ce que dit monsieur Wurtz ? si on reprend la réaction 1 volume d'hydrogène plus 1 volume de chlore donnent deux volumes. Vous avez tous écrit H plus Cl égale HCl.

[>E2]: ah j'ai compris

[>I]: vous avez tous écrit cela (écrit l'équation e la réaction au tableau)

[>E3]: j'avais mis un 1 devant

[>I]: c'est la même chose.

[>E1]: il dit que H plus Cl cela fait 2 HCl

[>E4]: il dit un même volume de gaz enferme un même nombre de molécules mais la molécule peut être formée soit par un atome par deux atomes ou par trois atomes

[>I]: donc ?

[>E4]: que

[>E1]: que cela va valoir deux atomes, jusqu'à deux atomes d'hydrogène et de chlore.

[>I]: et alors est-ce que cela vous amène à changer l'équation ?

[>E4]: en fait que dans ces

[>E2]: le H c'est 1 volume et le Cl c'est

[>E4]: que dans ces volumes-là il y en aura deux . Ce sera par deux atomes dans ce même volume. Du coup on aura deux molécules. Une molécule de H

[>I]: si je dois réécrire l'équation cela donne quoi ?

[>E4]: cela donne 2 H2 plus 2 Cl2

[>I]: est-ce que vous pouvez écrire cela sur votre feuille ? tu viens l'écrire au tableau.

[>I]: (E4 écrit au tableau l'équation H2 + Cl2 = 2 HCl. Que pensez-vous de la proposition ?

[>E2]: je suis d'accord

[>E3]: H2 plus Cl2 mais je sais pas pourquoi il a mis 2

[>E4]: parce que dans l’Extrait 6, la dernière phrase, elle explique que dans le même volume on peut mettre plusieurs atomes d'hydrogène, d'oxygène de chlore et d'azote.

[>E3]: en fait tu as juste deux atomes parce que là il y a écrit par deux atomes. (Pendant ce temps E1 écrit au tableau l'équation 2H + 2 Cl = 2 HCl)

[>I]: qu'est-ce que vous en pensez ? On a deux propositions.

[>E3]: ben le résultat est le même

[>E1]: oui le résultat est le même

[>I]: qu'est-ce que vous pensez de ces deux propositions ?

[>E2]: je suis d'accord avec la première (H2 + ...)

[>I]: Pourquoi ?

[>E2]: je suis plus d'accord avec la seconde

[>E2]: ben je sais pas mais pour moi parce que là il y a écrit mais c'est une hypothèse deux atomes hydrogène, chlore, oxygène et donc il y a écrit par deux atomes

[>I]: et toi tu es plus sur la seconde ?

[>E3]: ben je vois pas trop la différence parce que puisque là on dit qu'il y a deux atomes d'hydrogène plus deux atomes de chlore et c'est la même chose en bas sauf que le deux est devant

[>E1]: ben non ben je préfère écrire comme cela (2H + ...) parce que je préfère la deuxième parce que là quand on met quelque chose en petit c'est souvent pour une molécule et là on parle plutôt d'atomes

[>I]: pourquoi on parle d'atomes ?

[>E1]: en fait on peut écrire les deux

[>E4]: ça dépend si on crée cet atome avec deux molécules, non enfin des molécules avec d'autres molécules ou avec des atomes. Si on la crée à partir d'atomes, ben on a juste des atomes, ce serait plutôt la deux. Mais si on la crée à partir d'autres molécules ce serait plutôt la première.

[>I]: est-ce que l'une des deux colle un peu plus avec l'expérience ou pas ?

[>E2]: la deuxième. Par rapport au tout. Moi je suis H2 + Cl2

[>E4]: moi je pense plutôt la première

[>E2]: la première un volume d'hydrogène + 1 volume de chlore donnent deux volumes de chlorure chlorhydrique

[>I]: quelle est celle qui se rapproche le plus de l'expérience ?

[>E1]: la logique à chaque fois on parle de volume à chaque fois il parle 1 volume égale une molécule c'est à chaque fois des molécules plus des molécules donnent d'autres molécules. Et à chaque fois dans la première on a des molécules dans celle-là

[>I]: l'expérience nous dit que l'on a un volume de chlore plus un volume d'hydrogène qui donnent deux volumes de chlorhydrique. C'est votre explication

[>E4]: celui du bas c'est deux volumes plus deux volumes (il décrit l'équation 2H + ...=. Celle du haut c'est 1 volume plus 1 volume égal deux volumes

[>I]: et donc quelle est celle qui collerait ?

[>E3]: la première, celle du haut

565 [>I]: si on considère que c'est celle du haut et que j'applique cela maintenant à l'eau

566 [>E2]: 1 H2O

567 [>I]: donc la molécule d'hydrogène c'est H2

568 [>E4]: oui

569 [>E2]: non

570 [>I]: c'est H tout court ou c'est H2

571 [>E4]: la molécule ?

572 [>I]: la molécule d'hydrogène ?

573 [>E2]: H

574 [>E3]: H

575 [>E4]: H2

576 [>E3]: donc c'est la deuxième et le 2 on met devant. 2 atomes d'hydrogène

577 [>E4]: 2 cela veut dire volume et la molécule d'hydrogène c'est H

578 [>I]: C'est H pour quelle raison

579 [>E3]: ben c'est parce qu'on le sait. On l'a déjà montré en classe. J'ai appris en classe

580 [>I]: tu as appris quoi que la molécule d'hydrogène c'est H ?

581 [>E3]: oui la molécule d'hydrogène c'est ... Non l'atome d'hydrogène

582 [>I]: tu as appris l'atome ou la molécule

583 [>E3]: ah non l'atome, l'atome, l'atome

584 [>I]: La suite du texte

585 [>E4]: (extrait 7) HH plus ClCl = HCl plus HCl compliqué, très compliqué, très très compliqué

586 [>I]: alors qu'est-ce qu'il vous dit en premier

587 [>E1]: que H et H2 c'est la même chose

588 [>E3]: non que c'est pas la même chose justement

589 [>E1]: que l'un est le double de l'autre

590 [>E3]: H2 c'est le double de H

591 [>I]: H et H2 c'est la même chose ?

592 [>E4]: ben non il y en un qui est un atome et l'autre une molécule. Ben je crois

593 [>I]: pour les autres (....)

594 [>E1]: ben c'est pas la même chose (...)

595 [>I]: et donc l'oxygène ce serait quoi

[>E3]: O

[>E1]: O

[>E1]: est-ce que vous parlez d'atome d'oxygène ou de molécule d'oxygène ?

[>I]: la molécule

[>E1]: O

[>E3]: je vois pas trop la différence. je sais que plusieurs atomes ça fait une molécule mais oui il y a plusieurs atomes dans une molécule. Une molécule contient plusieurs atomes.

[>I]: et tu ne vois pas trop la différence

[>E3]: si ben si (...)

[>I]: est-ce que les chimistes à l'époque voient la différence ?

[>E1]: pas tous

[>E3]: pas tous

[>E1]: Gaudin, Dumas, Laurent ils disent qu'il y a une différence

[>E4]: mais il y en a d'autres qui disent que non cela dépend

[>E3]: mais je ne comprends pas

[>E1]: c'est bizarre ce qu'il dit monsieur Wurtz. Puisque ce qu'il dit cela voudrait dire (écrit au tableau HH + ClCl)

[>I]: HH on peut l'écrire comment sinon

[>E3]: H petit 2ou 2H

[>I]: H petit 2 ou 2 grand H c'est pareil ou non ?

[>E4]: c'est pas pareil 2H c'est deux atomes et l'autre c'est une molécule

[>I]: et quand on a 2 HCl, est-ce que l'on pourrait écrire H2Cl2 ? (...)

[>E3]: non (...)

[>I]: donc est-ce que tous les chimistes sont d'accord ? Ceux qui disent c'est pas pareil, ils s'appuient sur quoi ?

[>E1]: heu heu heu (...)

[>E4]: parce que cette théorie elle permet d'interpréter l'ensemble des faits

[>I]: c’est-à-dire l'ensemble des faits (...)

[>E4]: les faits c'est tout

[>E3]: les faits c'est quoi ?

[>E4]: c'est tout ce dont on a parlé jusqu'à maintenant

[>I]: c'est l'expérience (....)

[>E3]: en fait cela permet de déterminer si c'est pareil ou si c'est pas pareil. Et c'est pareil ou c'est pas pareil ?

[>I]: le dernier texte

[>E4]: on va peut-être comprendre (extrait 8)

[>E3]: on va comprendre

[>I]: atome ou molécule est-ce que c'est pareil ?

[>E4]: non

[>E3]: non il disent que les molécules sont constituées d'atomes

[>I]: alors qu'est- ce qui réagit ? Les atomes ou les molécules ? Les réactions c'est entre atome ou entre molécule ?

[>E4]: entre molécules

[>I]: et qu'est-ce qui se passe au cours de la réaction ?

[>E1]: il y a des échanges d'atomes

[>I]: donc quelle est la différence entre atomes et molécules ?

[>E4]: euh oui contrairement à monsieur Berthelot qui pense que c'est la même chose, ce n'est pas du tout la même chose en fait.

[>I]: et est-ce que vous avez vu les atomes et les molécules en classe

[>E3]: oui

[>E2]: non

[>E1]: on en a parlé un tout petit peu

[>E3]: on nous a dit que les atomes c'est ce qui constitue les molécules

[>E1]: non on a aussi fait des exercices dessus. Sur le fer et tout ça

[>I]: alors les molécules ça constitue quoi ?

[>E2]: ben les atomes ah non, les objets ou des choses comme ça

[>I]: les objets c'est fait de quoi

[>E2]: ben des atomes

[>E1]: c'est fait des molécules qui sont aussi faits d'atomes et donc c'est aussi fait d'atome

[>E3]: par exemple H2O c'est une molécule donc et donc dans la molécule il y a deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène

[>I]: et donc dans la molécule d'hydrogène, il y a quoi ?

[>E4]: un atome d'hydrogène

[>I]: un atome d'hydrogène

[>E1]: oui

[>E4]: non deux atomes d'hydrogène

[>E3]: dans une molécule de quoi ?

[>E4]: d'hydrogène. Parce que l'on parle de dihydrogène

[>E1]: mais dihydrogène et hydrogène c'est pas la même chose moi je dis

[>I]: ce serait quoi le dihydrogène

[>E1]: deux atomes d'hydrogène

[>E3]: deux molécules d'hydrogène

[>E1]: non ces deux atomes qui sont collés

[>I]: et le gaz est fait de quoi

[>E1]: de plein de petits atomes

[>I]: et l'oxygène

[>E1]: c'est fait

[>E3]: c'est de l'air

[>E4]: c'est du dioxygène en fait

[>E3]: non c'est deux atomes d'oxygène

[>E1]: molécule d'oxygène ou dioxygène ?

[>I]: je parle dans l'air

[>E1]: l'air c'est du dioxygène c'est deux atomes d'oxygène

[>E3]: deux atomes d'oxygène

[>I]: donc la formule

[>E4]: c'est comme ça

[>I]: O2

[>E3]: c'est pas CO2 plutôt

[>E1]: non CO2 c'est le carbone. C'est le dioxyde de carbone

[>E4]: pour moi cela serait H2 mais les autres ont pas l'air d'accord (...)

[>E1]: ben personnellement je dirai que la molécule d'hydrogène c'est H et la molécule de dihydrogène c'est H2. Seulement je ne sais pas si la molécule d'hydrogène cela existe ?

[>I]: la molécule avec un hydrogène

[>E1]: oui

[>I]: en fait non

691 [>E1]: d'accord donc c'est 2

692 [>I]: est-ce que vous pouvez écrire à partir formules proposées les équations à la fois pour l'eau et
693 pour l'ammoniac ?

694 [>E4]: ah oui c'est 2H2 plus O2 on met du dihydrogène, 2 dihydrogène avec un dioxygène (écrit au
695 tableau 2H2 + O2 = 2H2O)

696 [>I]: qu'est -ce que vous en pensez ?

697 [>E1]: je suis d'accord (...)

698 [>E2]: je suis pas d'accord moi

699 [>E3]: ah si

700 [>E2]: parce qu'il y a 2 H et qu'il y a pas 2O. Pour moi le 2 il est valable pour tout.

701 [>I]: lequel 2 ?

702 [>E2]: le grand

703 [>I]: lequel ?

704 [>E2]: celui-là (montre le 2 devant H2O) pour moi il est valable pour H2O à la base

705 [>I]: donc cela ferait 4 hydrogène et deux oxygène

706 [>E2]: non pour moi 2 H2O pour moi c'est valable en gros il y a 2, H2O. Alors que là il y a écrit 2H2
707 plus O2

708 [>I]: si j'ajoute des parenthèses (ajoute parenthèses autour des formules)

709 [>E2]: ah d'accord OK.

710 [>I]: ce que vous aviez écrit tout à l'heure c'était cela (écrit au tableau 2H + O = H2O

711 [>E3]: oui (...)

712 [>E3]: on peut reécrire sur la feuille

713 [>I]: est-ce que j'ai le choix entre H ou H2 ? Est-ce que je dois prendre l'un ou l'autre ou est-ce que
714 c'est indifférent ?

715 [>E4]: les atomes on peut pas vraiment les manipuler. Donc en fait il faut mieux mettre les
716 molécules. H et O c'est pas des molécules H2 et O2 c'est des molécules. Donc on peut manipuler H2
717 et O2 mais pas O et H. je crois. Du coup on fait le deuxième. Il y a que celui du haut que l'on pourrait
718 faire je pense.

719 [>I]: est-ce que en classe vous avez fait une différence entre O et O2 ?

720 [>E4]: en quatrième, notre prof, le premier truc qu'elle avait dit c'était, non en fait en cinquième,
721 c'est l'oxygène cela n'existe pas et c'est toujours le dioxygène et que quand on parlait d'oxygène on
722 se trompait mais après on n'en a pas reparlé et on n'a pas revu cela en quatrième. On a pas revu cela
723 en quatrième ?

724 [>E2]: et si toute l'année

725 [>E4]: non je crois pas qu'on l'ait vu

[>I]: et donc est-ce que maintenant vous voyez une raison on va dire O2 et pas O ?

[>E4]: parce que O c'est pas à l'état naturel. Parce que les atomes ils n'existent pas à l'état naturel. Enfin alors

[>E3]: mais ça c'est pas bon (elle montre avec atomes seuls) parce que l'on peut pas mettre O tout seul

[>E2]: ben si y en a c'est atome ou molécule

[>E4]: oui mais les atomes ils sont toujours rassemblés en molécules sinon après il faut casser les molécules

[>E2]: ben y en a un c'est un dans le tableau périodique c'est un

[>E4]: oui il y en a un

[>E2]: ben il est tout seul

[>E4]: non

[>E2]: ben si

[>I]: dans la réaction avec le dioxyde de carbone cela donne quoi

[>E1]: le carbone

[>E3]: c'est C

[>I]: et donc la réaction ?

[>E1]: on a pas encore parlé d'atomes

[>E2]: si on en a parlé

[>E3]: pourquoi tu veux le livre de physique

[>E2]: parce que je veux voir celui qui est à 1. Tu as vu le tableau périodique, non ?

[>I]: dernière questions. Si je veux représenter le gaz, comment peut-on faire ? Est-ce que l'on peut donner une formule ? On a la molécule de dioxygène O2. Comment peut-on faire pour représenter le gaz ?

(extrait 11)

[>E2]: ah oui c'est pas le truc

[>E4]: ouille ouille ouille ouille ouille

[>I]: dernière question. Dans l'air il y a du dioxygène. On représente la molécule par O2. Comment on représente le gaz dioxygène qui est dans l'air ?

[>E4]: O2g

[>E3]: il y a du dioxyde de carbone (.....)

[>I]: plutôt que de prendre le dioxygène de l'air, prenons l'eau. Comment je représente l'eau, le liquide ?

[>E4]: H20 l comme c'est proposé (redonne le texte)

[>I]: Pourquoi peut-on conserver la même formule

[>E1]: parce que c'est la même formule que ce soit un gaz, un solide ou un liquide

[>E4]: on avait vu cela en quatrième. C'est la même chose, c'est juste leur forme qui change. La molécule elle change pas c'est juste la forme de l'ensemble des molécules qui change. Quand c'est un slide elles sont toutes collées dans un ordre structuré ensemble quand c'est un liquide elles vont toutes vers le bas elles se collent mais elles sont pas elles sont pas dans un ordre

[>E3]: c'est liquide

[>I]: c'est la molécule qui est liquide ?

[>E2]: non

[>E4]: non c'est la forme c'est la totalité des molécules comment elles sont

[>E2]: positionnées

[>E4]: les unes par rapport aux autres. Et en gaz, il y en a une là, une là , une là

[>E3]: c'est la vapeur les gaz

[>E4]: il y en a une un peu partout en fait mais elles se touchent pas

[>E1]: ben elles peuvent se toucher

[>E4]: oui enfin

[>E2]: non mais quand elles se touchent et qu'elles bougent c'est liquide. T'as un gaz. Tu mets différentes molécules qui se touchent et qui bougent entre elles. Un gaz c'est quand ça va dans tous les sens et quand c'est collé ça bouge pas

[>E4]: gaz quand tu as du gaz tu n'as aucune limite. Il est expansible, rétrécissable, tu peux faire ce que tu veux avec ton gaz. Avec ton eau, tu peux faire ce que tu veux mais elle restera toujours attirée toujours par le bas mais avec ton solide tu peux rien faire. Il a une forme propre. Le solide il a une forme propre au départ.

[>I]: on va s'arrêter

[>E1]: on a pas fait la 5

[>I]: tu veux essayer de proposer la réaction avec l'ammoniac

Annexe 33 : Protocole pour les élèves de seconde

Dialogue (partie 1) :

Sagredo : Connaissez-vous la formule de la molécule d'eau ?

Simplicio : Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée : quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons supposer qu'elle est binaire (un atome de chaque). Par exemple, la molécule de l'eau est une combinaison binaire d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène. Sa formule chimique sera donc HO.

Salviati : Ce n'est pas si simple. Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience. Monsieur Lavoisier a réussi à former de la vapeur d'eau. Pour cela, il a dû employer 2 volumes de gaz hydrogène pour 1 volume de gaz oxygène. Monsieur Berzelius propose alors que la molécule d'eau soit composée de 2 atomes d'hydrogène et d'1 atome d'oxygène.

Sagredo : Et connaît-on alors d'autres combinaisons avec les gaz ?

Salviati : Monsieur Gay-Lussac, qui a étudié les réactions avec les gaz, a trouvé qu'1 volume de gaz hydrogène s'unit à 1 volume de gaz chlore pour donner le gaz chlorhydrique, que 2 volumes de gaz hydrogène s'unissent à 1 volume de gaz oxygène pour donner le gaz eau et que 3 volumes de gaz hydrogène s'unissent à un volume d'azote pour donner le gaz ammoniac.

Sagredo : Vous nous dites alors que l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène et d'azote.

Salviati : Tout à fait. De la même façon que les atomes diffèrent par leur masse, ils diffèrent aussi par leur façon de se combiner. Notamment les atomes, de chlore, d'oxygène, d'azote ne se combinent pas de la même façon avec l'hydrogène.

Sagredo : Quelles sont alors pour vous les formules de la molécule constituant le gaz chlorhydrique et de la molécule constituant le gaz ammoniac ?

Salviati : On a déjà vu que la formule de la molécule d'eau est H_2O. Avec la même méthode, la formule de la molécule de gaz chlorhydrique est HCl et celle de gaz ammoniac est NH_3.

Dialogue (partie 2)

Sagredo : Est-ce que je peux alors représenter avec les formules la combinaison entre le gaz hydrogène et le gaz chlore qui donne le gaz chlorhydrique ?

Simplicio : C'est très simple. En me basant sur les combinaisons de Monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl. Je peux alors écrire pour les gaz : $H(g) + Cl(g) \rightarrow HCl(g)$

Salviati : Ce n'est pas si simple. Monsieur Gay-Lussac a trouvé qu'1 volume de gaz hydrogène s'unit à 1 volume de gaz chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique.

Simplicio : L'explication la plus simple est qu'1 volume de gaz hydrogène plus 1 volume de gaz chlore donnent 2 volumes de gaz chlorhydrique.

Salviati : Oui mais pour l'eau Monsieur Gay-Lussac a trouvé que 2 volumes de gaz hydrogène plus 1 volume de gaz oxygène donnent deux volumes de gaz eau.

Sagredo : Le raisonnement de monsieur Simplicio ne semble plus applicable.

Dialogue (partie 3)

Salviati : Nous allons supposer que les molécules d'hydrogène et de chlore ne sont donc pas des atomes mais qu'elles sont biatomiques. Nous allons d'ailleurs les rebaptiser et les appeler molécule de dichlore et molécule de dihydrogène. Et nous appellerons les gaz correspondant : le dichlore et le dihydrogène.
Simplicio : Vous êtes en train de nous dire que les formules H et H_2 ne représentent pas la même chose alors que l'une est tout simplement le double de l'autre et qu'il serait plus simple de garder H plutôt que H_2.

Salviati : Parce que nous établissons une distinction bien tranchée entre les atomes et les molécules qui sont des combinaisons des atomes. Cette hypothèse nous permet d'interpréter l'ensemble des faits.
Sagredo : Dans ce cas, comment écrivez-vous la combinaison entre 1 volume de gaz hydrogène et 1 volume de gaz chlore permettant d'obtenir 2 volumes de gaz chlorhydrique ?
Salviati : Pendant le processus de combinaison chimique, les molécules échangent leurs atomes de manière à donner de nouvelles molécules. On peut alors représenter cela sous la forme d'une équation :

$$HH + ClCl \rightarrow HCl + HCl \quad \text{ou avec les gaz } H_2(g) + Cl_2(g) \rightarrow 2\ HCl(g)$$

Sagredo : Cette théorie semble également permettre d'interpréter la formation de l'eau et de l'ammoniac et d'expliquer les volumes de gaz trouvés par monsieur Gay-Lussac.

Scénario

- **Travail individuel (5min)**
  Demander à chaque élève de répondre individuellement sur feuille à la question 1

- **Travail en groupe : (enregistrement de chaque groupe) (10 min)**
  Regrouper les élèves par quatre ou cinq. Choix du groupe pour les réponses et arguments permettant de justifier ce choix. Préparation d'un poster pour présenter aux autres leur choix commun avec les arguments ou les différents choix et les arguments de chacun.

- **Présentation de chaque groupe aux restes de la classe (15min)**
  Chaque groupe présente son poster aux autres en indiquant ses choix et ses arguments ou, si tous n'ont pas pu se mettre d'accord, les raisons. Les autres élèves peuvent poser des questions pour avoir plus d'explications.

- **Travail individuel (5 min)**
  Demander à chaque élève de répondre à la question 2 de la feuille de réponses

- **Travail en groupe (15min) Dialogue partie 1**
  Lire les dialogues entre Simplicio, Salviati et Sagredo. Quels sont les arguments de Simplicio et les arguments de Salviati ? Quelles formules de l'eau choisissent-ils et pourquoi ? Quelles formules alors choisissent-ils pour le gaz chlorhydrique et pour le gaz ammoniac et pourquoi ?

- **Présentation aux groupes et débats contradictoires si nécessaire (15min)**

- **Travail en groupe Dialogue partie 2 (15min)**
  Que pensez-vous des arguments de Simplicio et Salviati ? Êtes-vous du même avis que Sagredo et avez-vous alors une solution pour résoudre ce problème ?

- **Présentation aux groupes et débats contradictoires si nécessaire (15min)**

- **Travail en groupe Dialogue partie 3 (10min)**
  Proposer alors les équations des réactions conduisant à la formation de l'eau et à la formation de l'ammoniac

- **Éventuellement, s'il reste du temps, présentation aux groupes et débats contradictoires si nécessaire (15min)**

- **Travail individuel (5 min)**
  Demander à chaque élève de répondre aux dernières questions de la feuille de réponses

Annexe 34 : Transcription des échanges : élèves de seconde

[temps mort] (Les élèves répondent aux équations sur une feuille individuelle)

[>E2]: du coup j'ai mis la deuxième elle était bonne et pas la première

[>E3]: pourquoi ?

[>E2]: et ben je sais pas moi. Parce que je sais pas cela m'a l'air logique

[>E4]: ah parce que je pense qu'il y a qu'une équation qui doit représenter euh une seule réaction chimique

[>E3]: ouais moi je pense aussi

[>E1]: dans le premier on a 2 H2 + 1 O2 et là on a juste 1 H2O

[>E4]: parce que là on a pas le bon nombre de

[>E1]: dioxygène

[>E2]: oui de dioxygène

[>E3]: mais sinon ça c'est bon. C'est deux molécules d'eau

[>E2]: oui c'est bon mais genre euh voilà je sais pas si je suis claire ou pas mais bon voilà

[temps mort]

[>E2]: toi tu as mis quoi Sandra ?

[>E3]: Ben moi j'ai mis parce que dans le premier le O2 il y en a plus. Le dioxygène il est plus là c'est juste l'oxygène et le deuxième cela reste comme ça.

[>E2]: d'accord

[temps mort]

[>E4]: je pense qu'il faut mettre le même argument, vu qu'on a tous le même argument.

[>E2]: mais du coup toi tu as la même idée que nous ?

[>E4]: oui

[temps mort]

[>E2]: mais déjà il faut écrire que la première elle est fausse et la deuxième elle est juste.

[>E4]:

[temps mort]

[>E2]: du coup pourquoi elle est fausse

[>E1]: ah oui mais en plus là on ajoute deux atomes d'hydrogène à deux atomes d'oxygène et là on se retrouve avec deux molécules d'eau

[>E3]: ça c'est dioxygène

[>E1]: oui et dihydrogène je veux dire. Mais là on se retrouve avec deux atomes de dihydrogène et on ajoute un atome et que normalement ça marche pas. C'est compliqué

[>E2]: si ça marche c'est que juste après il n' y a pas le 2 du dioxygène

[>E4]: ouais il manque un atome d'oxygène

[>E3]: du coup vas-y dictez moi

[>E2]: moi j'ai écrit dans l'équation il y a deux oxygène alors que dans le résultat il n'y a qu'un seul oxygène.

[>E4]: oui c'est ça

[>E3]: moi je pense que c'est bon

[>E1]: alors dans la première partie de l'équation

[>E2]: il y a

[>E3]: ouais il y a deux atomes là alors que là il y en a qu'un

[>E4]: en fait en gros l'expression elle est fausse parce que là il y a en deux et là

[>E3]: il y est pas. Le dioxygène se transforme en oxygène. Donc c'est faux.

[>E1]: l'équation elle est fausse parce que le dioxygène est devenu de l'oxygène

[temps mort]

[>E3]: ben au début, il faudra changer le O2 ou le O à la fin ?

[>E4]: O à la fin

[>E2]: oui

[>E3]: on (inaudible) juste un 2 comme cela. On a le droit de faire ça ?

[>E4]: ouais

[>E1]: ouais justement

[>E3]: ben tu mets l'équation juste aurait été

[>E1]: non si ça avait été une équation juste il n'y aurait pas eu du O2. C'est juste H2O.

[>E4]: l'équation possible

[>E1]: si c'avait été juste, il y aurait pas eu le 2 là (en indice du O) et là elle aurait été juste. et cela aurait donné de l'eau

[>E3]: ça fait deux fois H2, ça fait quatre plus O2.

[>E4]: ça marche, non ? Ça fait deux molécules d'eau

[>E1]: oui mais le devant, c'est pour la molécule, le petit 2 c'est pour

[>E3]: le petit 2 c'est sur le H et le O. Mais le 2 c'est sur tout, c'est

[>E2]: ça fait quatre

[>E1]: oui ça fait quatre

[>E3]: de molécules d'hydrogène

[temps mort]

[>E3]: moi j'ai mis que c'est juste car à la fin il n'y a pas de changement (pour la deuxième équation)

[>E4]: ça reste la même chose. Il n'y a pas de changement

[>E3]: donc

[>E4]: la seconde est juste

[>E4]: ben il n'y a pas de changement. la même chose que là

[>E2]: ben c'est parce qu'il y a le même nombre d'atomes

[>E4]: elle est équilibrée

[>E1]: il y a le même nombre d'atomes, elle est équilibrée

[>E4]: je mets cette équation est équilibrée

[>E3]: euh il y a le même nombre d'atomes d'un côté et dans les deux côtés

[temps mort]

[>E4]: c'est tellement simple que tout le monde va trouver

[>E1]: justement cela me semble trop simple !

[temps mort] (lecture de la première partie du texte)

[>E2]: j'ai rien compris

[>E1]: c'est clair

[temps mort]

[>E1]: tout simplement Simplico il dit que quand il ya deux atomes qui peuvent être ensemble, ça peut être juste un de chaque

[>E3]: en fait Simplicio il parle qu'une seule fois.

[>E4: et Salviati, il dit quoi alors

[>E1]: Salviati, il dit que cela dépend des atomes

[>E4]: l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène et d'azote

[>E1]: parce que l'un il peut faire un - un , l'autre il peut faire un - deux

[>E4]: mais j'ai pas compris la phrase

[>E2]: en fait il dit que les atomes

[>E1]: en fonction des atomes ils peuvent pas se mettre ensemble de la même façon, en même quantité plutôt quand tu en mets deux, par exemple quand tu as un atome d'hydrogène, tu peux pas mettre forcément deux atomes de chlore, deux atomes d'azote

[>E4]: OK

[>E1]: tu mets soit un, deux, trois ou cinq comme tu veux

[>E3]: mais en fait lui il parle de manière trop

[>E1]: simple

[>E3]: mais moi je pense comme lui en plus

[>E4]: tu penses comme qui ?

[>E3]: comme le nul

[>E1]: c'est pas forcément le nul, c'est juste qu'il est simplet. C'est pourquoi il s'appelle Simplicio.

[>E3]: mais c'est quoi déjà l'argument de Simplicio ?

[>E1]: de Simplicio, c'est que si on peut combiner deux atomes, c'est qu'ils sont binaires. Donc on peut mettre un un un atome de chaque. En même quantité. Tu peux mettre les deux en même quantité. Et l'autre il dit ça dépend de l'atome. Des fois tu peux le mettre en même quantité, d'autres fois en quantité différente.

[>E2]: et vous pensez comme qui ?

[>E1]: euh Salviati plutôt.

[>E3]: ben déjà la formule de l'eau c'est faux

[>E4]: c'est faux donc de ça tu en déduis qu'il a faux

[>E1]: il a faux et

[>E4]: mais de toute façon on sait que l'atome d'oxygène il va avoir deux barres. On a vu ça en physique.

[>E3]: deux liaisons

[>E4]: ouais

[>E2]: ah oui l'oxygène

[>E1]: l'oxygène, il doit avoir deux liaisons donc euh il peut pas être relié juste à un atome. Donc dans l'eau il n'y a que deux atomes différents. C’est pour ça. Ben Salviati pour moi.

[>E2]: donc juste on essaye . On choisit Salviati car premièrement on voit là que cette formule-là elle est fausse et deuxièmement on sait que ben euh ben qu'il a raison

[>E3]: il a raison lui ou pas ?

[>E4]: ben oui

[>E3]: ben il demande de donner la formule

[>E4]: ben il faut recopier alors

[>E1]: tout simplement un hydrogène plus un chlore donnent (...) un hydrogène plus un oxygène (...) un hydrogène plus azote. Azote c'est N ? Voilà

[>E1]: t'écris quoi ?

[>E1]: les formules

[>E3]: ben il a raison. C'est ce qu'il a dit

[>E4]: ben et pourquoi tu as mis H3N

[>E1]: ben parce que tu peux le mettre où tu veux. Comme on a dit en physique. La formule tu peux la mettre dans tous les sens

[temps mort] (Lecture extrait 2)

[>E4]: en fait c'est lui qui a raison. Deux atomes d'hydrogène, H2O

[>E1]: oui les trois lignes. Mais là ils disent. Mais nous on l'a déjà dit on ne pensait pas ce que pensait Simplicio mais ce que pensait Salviati. Ben en fait

[>E4]: ben c'est justement lui qui a raison

[>E1]: oui justement c'est Salviati qui a raison

[>E4]: donc on re répète encore

[>E1]: ben (...) il a encore tort Simplicio

[>E3]: non mais là en fait on demande si on est du même avis que Sagredo.

[>E1]: Sagredo il dit : "Simplicio, il a tort"

[>E2]: du coup c'est Salviati qui a raison. Encore

[>E3]: ben moi je pense

[>E4]: parce que là la dernière formule qu'il a donnée c'est H2O. Donc euh

[>E1]: en fait c'est pas tout à fait faux ce qu'ils mettent. Si un peu quoi. Parce que normalement il aurait dû mettre les parenthèses du g au milieu (au milieu de la formule de HCl) mais cela ne change rien puisque tu mets l'hydrogène plus le chlorure, ça fait toujours à la fin tu as toujours de l'hydrogène et du chlorure

[temps mort]

[>E4]: parce que la formule qu'il donne, ça fait ça

[>E1]: non en fait il a raison parce que sa formule elle est applicable pour plusieurs cas mais en fait ils veulent que l'on trouve une solution pour résoudre ce problème. Mais c'est quoi le problème ?

[>E3]: est-ce que ça c'est pas faux où il dit deux volumes de gaz d'eau. C’est-à-dire deux H2O

[>E2]: le problème c'est ça la première phrase

[>E4]: j'ai pas compris le problème

[>E2]: ben en fait c'est un peu mal dit, du genre 2 volumes de gaz hydrogène. Pourquoi il dit pas deux atomes tout simplement ?

[>E1]: parce que c'est pas forcément deux atomes. Toute façon c'est pas grave, c'est comme si volume c'était le nom d'une unité

[>E3]: ben déjà on dit que nous sommes d'accord avec Salviati, non ? Ah non ah non c'est pas bon

[>E1]: avec Sagredo

[>E4]: mais deux H, donc H2 plus un atome c'est obligé ça donne pas deux H2O ça donne un H2O

[>E3]: ben moi j'en sais rien.

[>E1]: ah oui Simplicio il dit un volume de quelque chose plus un volume de quelque chose donnent deux volumes de quelque chose. Cela paraît logique. Mais là il dit deux volumes de gaz hydrogène plus un volume de gaz oxygène cela donne deux volumes

[>E4]: mais cela ne donne pas 2 H2O. Cela donne pas deux, cela donne 1.

[>E1]: cela donne deux volumes alors que normalement un volume plus deux volumes, cela donne trois volumes. Et on trouve deux volumes à la place

[>E2]: hein ?

[>E1]: T'as pas compris. C'est un peu compliqué. À la fin, il dit il y a deux volumes

[>E3]: de gaz hydrogène

[>E1]: plus un volume. euh

[>E4]: ben non là cela fait deux plus un O

[>E1]: cela nous donne deux volumes

[>E4]: mais regarde ce qu'il y a écrit après. Deux molécules d'eau c'est H2O. Il y a deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène

[>E1]: mais c'est pas ça le problème. Il y a deux volumes et un volume mais sur le résultat à la fin on trouve deux volumes alors que l'on devrait retrouver trois volumes car deux plus un ça fait trois. C'est deux plus O c'est un. H2 deux et O un

[>E4]: mais deux volumes de gaz hydrogène, ça fait H2. On est d'accord sur ça ?

[>E1]: on est d'accord.

[>E4]: plus un volume d'oxygène, ça fait O. Donc H2O, ça fait un volume de gaz eau. T'as compris ?

[>E2]: je pense qu'elle a raison

[>E1]: peut-être

[>E4]: dans l'eau, il y a trois volumes

[>E1]: et pourquoi l'unité elle changerait ?

[>E4]: parce que c'est le XVIIIe siècle

[>E1]: et pourquoi il change pas aussi le nom ?

[>E3]: non c'est XIXe siècle

[>E1]: oui tu as peut-être raison

[>E4]: mais là on sait pas si c'est bon. Du coup on reste peut-être dans l'erreur depuis le début.

[>E2]: elle nous a dit qu'elle nous dirait à la fin

[>E1]: il n'y a ni bonne ni mauvaise réponse

[>E4]: mais on est d'accord avec aucun.

[>E1]: tu dis que tu n'es plus d'accord avec Simplicio

[>E4]: ben non justement là il y a une faute, on ne devrait pas avoir deux volumes d'eau

[>E1]: on devrait avoir trois volumes d'eau

[>E4]: ben non à un !

[>E1]: mais non puisque tu prends deux volumes d'hydrogène et un volume d'oxygène

[>E4]: un volume d'eau pas trois volumes d'eau

[>E3]: attendez, juste vous êtes d'accord avec aucun c'est ça ?

[>E1]: nous sommes d'accord avec personne

[>E3]: c'est ça ?

[>E1]: nous créons notre propre théorie

[>E3]: regarde deux volumes de gaz hydrogène, cela fait H2 ?

[>E1]: oui ça je suis d'accord

[>E3]: plus un volume d'oxygène, ça fait O. Ça donne H2O !

[>E4]: H2O !! Merci

[>E1]: ah ça donne un volume d'H2O

[>E3]: ça fait un volume d'eau. Ça c'est O. ça fait un volume d'eau.

[>E1]: ah oui j'ai compris, j'ai compris

[>E4]: c'est bon

[>E3]: y a pas trois, y a pas trois ici

[>E1]: mais alors pourquoi quand il dit là un volume de ce gaz-là plus un volume de ça gaz là, cela donne deux volumes (réaction dihydrogène plus dichlore)

[>E4]: (en même temps que E3) ben justement il a faux

[>E1]: oui mais Salviati après avoir simplifié, il a dit exactement la même chose

[>E4]: oui mais voilà

[>E1]: ils répètent tous les deux la même chose pour dire qu'à la fin l'autre il avait tort alors qu'ils ont dit la même chose !

[>E3]: ah là là c'est embrouillé

[>E1]: moi je suis d'accord sur votre explication, ils avaient tous les deux tort. On est d'accord avec Sagredo. Simplicio, il a tort.

[>E2]: c'est ça qu'il faut que je note ?

[temps mort]

[>E1]: ah c'est ce que je disais (explication du chercheur sur ce que représente un volume) un volume c'est une unité. En plus non, on devrait trouver un volume de gaz eau et non pas deux volumes de O. Justement. Oh merde, je croyais que j'avais compris ce que tu étais en train de dire.

[>E4]: on devrait trouver un volume

[>E1]: normalement on devrait trouver un volume de gaz eau. On trouve deux volumes donc en fait. Cela devrait être cela trois volumes et pas deux volumes. Pourquoi c'est deux volumes ?

[>E3]: mais même là pour le gaz chlorhydrique, il y a un volume de gaz hydrogène, gaz chlore, ça forme un truc ça forme pas deux trucs.

[>E1]: oui sauf que le volume c'est le litre. Lorsque tu mets un litre de lait et un litre d'eau, quand tu mets les deux, au final t'as deux litres. T'as deux litres de doux lacté. On peut dire ça comme ça. Voilà on fait de la chimie

[>E3]: oui mais deux volumes de gaz eau ça représente euh la mol, c'est l'atome et celui-là

[>E1]: oui mais c'est comme si tu avais un litre de dihydrogène plus un litre d'oxygène. Quand tu mélanges les deux, tu tombes sur deux litres d'eau, normalement

[>E3]: on s'embrouille tous là

[>E1]: oui oui franchement

[>E4]: on est d'accord ou on est pas d'accord ?

[>E1]: justement c'est ça le problème. Est-ce que l'on est d'accord ou pas ?

[>E3]: mais est-ce que l'on est d'accord que ça c'est faux, Simplicio ?

[>E1]: ben si on part du truc que Salviati il a raison, Simplicio il a tort. Mais si ça se trouve, le un volume qu'on rajoute, il compte pas donc on compte que les deux volumes du gaz hydrogène. Il y a qu'à dire comme ça. Mais donc alors s'il y a que le gaz hydrogène qui compte dans les volumes, quand on dit un volume de gaz hydrogène plus un volume de gaz chlore, cela donne un volume de gaz chlorhydrique

[>E2]: donc ?

[>E1]: donc de toute façon, Simplicio il a tort. Que la deuxième elle soit fausse ou vraie, il a tort. Quoi que non ! Si elle est fausse, il a raison, si elle est pas fausse il a pas tort.

[>E1]: (rigole) il a raison et il a pas tort

[>E1]: alors si elle est fausse, il a raison. Et si elle est fausse il a pas tort. Ah non. Si elle est fausse il a tort.

[>E3]: tu veux pas retourner au tableau s'il te plaît (tout le monde rigole)

[>E1]: je suis le seul à me comprendre. J'ai l'air embrouillé plutôt. Il faut quand même que l'on raconte un truc. Même si l'on a faux, c'est pas grave.

[>E4]: ouais c'est pas grave

[>E3]: ça ici on est d'accord pour ça à part le g (montre équation du gaz chlorhydrique)

[>E1]: oui ça marche.

[>E3]: ça marche

[>E1]: mais non Hg, normalement tu devrais te retrouver avec HgClg parce que le nombre d'atomes. Mais si ça se trouve, c'était au premier qu'il fallait réfléchir. Mais non donc en plus ça fait un peu bizarre. Elle nous aurait quand même un peu indiqué si on était loin du truc. Donc non.

[>E3]: un volume de gaz d'hydrogène plus un volume de gaz de chlore donnent deux volumes de gaz

[>E2]: alors ça aussi c'est faux

[>E1]: mais non. Je viens de dire c'est bon. Ça veut dire que deux volumes de gaz, ça donne deux volumes de gaz eau. Si ça se trouve en se mélangeant, les deux volumes ça devient juste un tout d'hydrogène plus un tout de gaz oxygène. Un plus un tout cela fait un autre tout. Non ?

[>E4]: oui mais un autre tout, les volumes c'est quoi. C'est une unité les volumes ou ...?

[>E1]: mais en fait le volume c'est une unité

[>E2]: en fait genre vous êtes d'accord et puis voilà parce que là

[>E1]: oui mais justement je sais pas quoi

[>E3]: c'est fatigant

[>E1]: donc déjà si on nous pose la question, cela veut dire qu'il a raison. Donc ça veut dire que Simplicio, il a tort. Mais faut comprendre pourquoi l'autre il a raison !

[>E3]: mais déjà pourquoi l'autre il a faux déjà

[>E1]: Simplicio il a faux mais faut le trouver en montrant que l'autre il a raison et donc son truc

[>E3]: ben non on donne des arguments pour les deux

[>E1]: mais oui mais justement celui-là il lui manque quelque chose. Là on prend ça, on l'applique à cet exemple là et on trouve qu'on trouve pas le même résultat que Simplicio.

[>E4]: répète.

[>E1]: on prend le dernier truc de Salviati et on l'applique au dernier truc de Simplicio et si on appliquait cette façon de penser à Simplicio au truc de Simplicio on devrait ne pas trouver la même chose. De toute façon, il y en a un des deux.

[>E2]: ça et ça c'est la même

[>E1]: mais non justement tu trouves un plus un ça fait deux et deux plus un ça fait deux et ben justement c'est cela que l'on cherche à comprendre mais on n'y arrive pas

[>E4]: on demande un joker

[>E3]: après douze minutes de réflexion

[>E4]: et toi tu penses quoi en fait ?

[>E1]: alors moi je pense si on si on part du principe que Salviati il a raison, quand tu as le x volumes de plus x volumes d'une autre espèce, les deux, les volumes différents cela devient deux. Tout ce qui sont égaux à un donc cela donne deux ... ah ...

[>E2]: tu parles néerlandais là

[>E1]: si tu as x volumes de quelque chose plus x volumes de quelque chose de différent, on se trouve avec un tout plus un autre tout

[>E3]: ça fait deux

[>E1]: donc ça nous donne deux, même si x il pouvait être 3 là et douze.

[>E2]: heinnnnnnnn

[>E1]: mais vu que l'on trouve deux plus un ça fait deux. Donc forcément que ...

[>E4]: mais c'est impossible , genre avec ça c'est impossible si tu veux deux H2 plus O ça fait H2O ça fait pas H2O. Ça fait pas 2H2O.

[>E1]: mais non bien sûr que non

[>E4]: ben non

[>E4]: je sais pas combien ça fait

[>E1]: ah là là c'est compliqué toutes ces histoires

[>E3]: moi je me base sur le truc

[>E1]: là tu peux mettre des grammes, des centimètres. tu peux mettre tout ce que tu veux

[>E3]: mais là à cause de ça, tu sais le truc qui manque

[>E1]: Hg là cela devient HCl

[>E3]: donc c'est faux

[>E1]: oui et s'il y en avait H2, cela devenait H. ça on est d'accord. C'est proportionnel, ça change pas. Les volumes on s'en fout si c'est proportionnel.

[temps mort] (extrait 3)

[>E2]: je pense que Salviati, il a faux.

[>E4]: pourquoi ?

[>E2]: parce que euh. Ah non, non non j'ai rien dit. OK je pense que Salviati, il a raison en fait. Parce que là l'équation qu'il a donnée à la fin, c'est juste.

[>E4]: ouais

[>E2]: tu penses qu'il a raison ?

[>E1]: on va essayer de comprendre

[>E4]: il y a un truc que je comprends pas. Il vient d'où le deux là ?

[>E2]: ben c'est ça.

[>E4]: il y a deux molécules de ça, deux molécules de ça et ça te fait ?

[>E2]: ah , ah d'accord

[>E3]: bon ben il a bon

[>E4]: qui ?

[>E2]: en gros Salviati il dit que H et H indice 2, c'est pas la même chose

[>E4]: H et ?

[>E2]: H indice 2, enfin H avec un petit 2 en bas. C'est pas la même chose

[>E4]: ben pourquoi c'est pas la même chose

[>E3]: ben parce que tu as l'atome d'hydrogène

[>E2]: ben parce qu'il y a un hydrogène t là deux hydrogènes

[>E3]: c'est pas la même quantité

[>E4]: OK

[>I]: la différence c'est que la quantité

[>E3]: ben la réaction après avec les autres atomes ce sera différent

[>I]: c’est-à-dire

[>E3]: euh je sais pas si par exemple dans une molécule on met deux hydrogènes ben ce sera différent si on met un hydrogène juste

[>I]: mais H ou H2 c'est les mêmes propriétés

[>E3]: c'est les mêmes propriétés

[>I]: sauf que vous en mettez deux fois plus

[>E4]: ouiiii

[>I]: c'est ça ?

[>E4]: oui mais peut-être que ça réagit pas de la même façon et lorsqu'il y en a plus

[>I]: et si ça réagit pas de la même façon, c'est encore la même chose ? (Tout le monde rigole)

[>E3]: non

[>E4]: c'est isomère

[>I]: est-ce que la façon de réagir c'est caractéristique ou pas ?

[>E4]: je sais pas

[>E3]: euh (...)

[>I]: vrai problème

[>E4]: mmmmh on avait pas appris en physique si y avait CH ça fait une molécule et par exemple CH4 c'est pas la même ? donc là ce sera pareil ?

[>E3]: en fait on est d'accord avec lui.

[>E4]: avec qui ?

[>E3]: avec Salviati

[>E4]: oui mais il faut donner des arguments ?

[>E2]: pourquoi mais

[>E4]: parce que c'est juste

[>E3]: parce que cela a l'air logique. Parce que c'est logique.

[>E4]: Alexandre, dis-moi que c'est logique

[>E1]: oui oui oui laissez-moi le temps de ....

[temps mort]

[>E3]: c’est quoi l'ammoniac

[>E1]: NH3

[>E3]: merci.

[>E4]: pour les gens normaux, on ne sait pas ce que c'est que l'ammoniac

[>E1]: on a rien

[>E4]: on est au ras des pâquerettes

[>E1]: on a pas de solution

[>E3]: exactement

[>E4]: oui on est perdu

[>E1]: on est perdu avant

[>I]: qu'est-ce qui vous bloque ?

[>E3]: les atomes

[>E4]: un peu tout quoi

[>I]: qu'est-ce que vous pensez de l'équation proposée par Salviati tout à la fin ?

[>E4]: il a raison

[>E3]: oui je pense qu'il a raison

[>I]: est-ce que cela vous fait changer d'avis

[>E3]: non

[>E1]: sûr ?

[>E3]: mais juste, ils ont faux là dans l'équation parce que 2 H2, c'est juste sur l'atome d'hydrogène.

[>I]: c’est-à-dire

[>E4]: le deux il s'applique que sur l'atome d'hydrogène. Il n'y a que deux atomes d'hydrogène

[>I]: quand on écrit 2H2

[>E4]: oui

[>E3]: non ça fait 2 fois H2. Le 2 il se, il va pas sur l'oxygène

[>I]: alors quel 2 ?

[>E4]: le deux de devant le grand H

[>I]: oui

[>E4]: il s'applique pas à l'oxygène ?

[>I]: non

[>E1]: mais d'après ça ?

[>E4]: à d'après ça, ben oui il a raison. D'après ça, ça veut dire que le deux, il y a deux ça et deux ça

[>E3]: il s'applique à ça et ça mais là c'est deux deux et ici il y pas le 2. Là ça fait quatre atomes d'hydrogène

[>I]: oui et ?

[>E4]: ah oui 4 atomes d’hydro mais et l'oxygène ?

[>I]: qu'est-ce qui doit s'appliquer à l'oxygène ? Pourquoi voulez-vous qu'il s'applique à l'oxygène ?

[>E4]: ben alors on simplifie à la fin ?

[>I]: pour quelle raison voulez-vous qu'il s'applique à l'oxygène ?

[>E4]: ben

[>I]: puisque vous me dites que Salviati, que sa solution vous convient, êtes-vous alors capable d'écrire l'équation de formation de l'ammoniac ? La formule NH3. (Il rigole) (L’autre groupe propose H3 + N = NH3) ?

[>E2]: est-ce que vous avez changé d'avis ?

[>E3]: non

[>E4]: moi c'est toujours H2O, c'est trop difficile

[>E3]: qu'est-ce qui permet de déterminer les formules chimiques ? Ah ben j'en sais rien.

[temps mort]

[>E1]: à la fin c'est pas 2H2O c'est 2H

[>E4]: mais comment c'est possible ?

[>I]: les nombres stœchiométriques, ce sont les grands chiffres dans l'équation

[>I]: est-ce que vous voyez une différence entre les grands chiffres et les indices ?

[>E4]: ah ben non c'est la même chose.

[>E1]: c'est la même chose

[>E4]: s'il y a pas de parenthèse ici et ben ça marche pas.

[>I]: vous voudriez des parenthèses ?

[>E3]: oui comme en math

[>E4]: mais là cela revient au même parce que là s'il n'y a pas le 2 ça veut dire deux atomes d'hydrogène et s'il y a pas là ça veut dire aussi deux atomes d'hydrogène

[>I]: s'il y a pas là quoi ?

[>E4]: s'il y a pas le petit 2 et ben il y a quand même deux atomes d'hydrogène. Dans les deux cas, il y aura deux atomes d'hydrogène.

[>E3]: mais ici il y en a quatre

[>E4]: ça veut dire que là il y a quatre atomes d'hydrogène ? Toute façon dans les deux cas c'est faux puisque

[>E1]: ça veut dire qu'ils sont collés donc le deux ils s'appliquent à tout s'ils sont collés

[>E4]: c'est ça, c'est ça, c'est ça la réponse

[>E3]: tu essayes de rééquilibrer la formule

[>E4]: moi je sais pas équilibrer

[>E3]: on applique juste par certains atomes

[>E1]: Madame on a le droit de dire qu'on sait pas ?

[>E3]: on va mettre ça

[>E4]: et ben on va mettre ça ce sera beaucoup plus simple