Institutional Repository - Research Portal
Dépôt Institutionnel - Portail de la Recherche
researchportal.unamur.be
University of Namur

THESIS / THÈSE

DOCTEUR EN SCIENCES

L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge

Développement d'une séquence de leçons en s'appuyant sur un modèle des niveaux de signification

Dehon, Jérémy

Award date:
2018

Awarding institution:
Universite de Namur

Link to publication

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Download date: 03. Jul. 2025

UNIVERSITÉ DE NAMUR
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DE CHIMIE
UNITÉ DE RECHERCHE EN DIDACTIQUE DE LA CHIMIE

L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge

Développement d'une séquence de leçons en s'appuyant sur un modèle des niveaux de signification

Thèse présentée par

JÉRÉMY DEHON

en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences

COMPOSITION DU JURY

Valérie HENRY	Professeure, UNamur – ULiège	**Présidente**
Guillaume BERIONNI	Professeur, UNamur	
Benoît CHAMPAGNE	Professeur, UNamur	
Isabelle KERMEN	Maître de conférences HDR, Université d'Artois (France)	
Cécile MOUCHERON	Professeure, ULB	
Philippe SNAUWAERT	Professeur, UNamur	**Promoteur**

Décembre 2018

Graphisme de couverture : © Presses universitaires de Namur

© Presses universitaires de Namur & Dehon Jérémy
Rempart de la Vierge, 13
B - 5000 Namur (Belgique)

Toute reproduction d'un extrait quelconque de ce livre, hors des limites restrictives prévues par la loi, par quelque procédé que ce soit, et notamment par photocopie ou scanner, est strictement interdite pour tous pays.

Imprimé en Belgique

ISBN : 978-2-39029-021-6
Dépôt légal: D/2018/1881/27

L'équation chimique, un sujet d'étude pour diagnostiquer les difficultés d'apprentissage de la langue symbolique des chimistes dans l'enseignement secondaire belge

Développement d'une séquence de leçons en s'appuyant sur un modèle des niveaux de signification

PAR JÉRÉMY DEHON

Résumé :

La symbolique chimique est un jalon essentiel dans l'enseignement-apprentissage de la chimie en Belgique francophone. Or, il s'avère que de nombreux apprenants, surtout débutants, éprouvent des difficultés majeures à réaliser des tâches impliquant la symbolique chimique, en particulier une équation chimique. Nous avons souhaité d'une part déterminer les origines de ces difficultés et, d'autre part, construire une ingénierie didactique susceptible de surmonter une partie des obstacles qui empêchent la réalisation effective de tâches données. Pour déterminer les origines des difficultés des apprenants, nous avons exploré quatre pistes différentes : la piste institutionnelle (analyse de manuels et de programmes), la piste épistémologique (analyse de l'évolution historique de la symbolique chimique), la piste conceptuelle (analyse des théories des niveaux de savoir) et la piste linguistique (analyse des systèmes sémiotiques). La description fine des difficultés des élèves a nécessité l'élaboration de trois nouveaux modèles d'analyse : un modèle des niveaux de signification, une taxonomie des systèmes sémiotiques utilisés au cours de chimie et un triangle étendu de terminologie mettant en relation symboles, désignations, concepts et objets. En parallèle à ce travail, nous avons soumis un test diagnostique à des élèves de grade 11 en Fédération Wallonie-Bruxelles afin de connaître les significations qu'ils prêtent aux signes présents dans une équation de réaction. L'ensemble de ces analyses préalables a permis de construire une séquence de leçons dont les objectifs majeurs étaient de circuler entre systèmes sémiotiques, tout en essayant de déforcer certaines significations de symboles ciblés et d'en renforcer d'autres. Les tests in situ, réalisés avec une cohorte de 110 élèves en 2012 et 56 élèves en 2013 (grade 9), ont fait émerger un constat important : la conversion d'informations symboliques en représentations iconiques microscopiques constitue une tâche complexe pour une majorité d'élèves. En réaction, une séance de remédiation a été conçue et a permis d'augmenter, en un court laps de temps, la performance des élèves dans cette tâche de conversion.

Mots-clés : symbolique chimique, niveaux de savoir, difficultés d'apprentissage, systèmes sémiotiques, ingénierie didactique, outils de remédiation.

The chemical equation: an ideal topic to diagnose learning difficulties about chemical language in the French-speaking parts of Belgium

Development of a sequence of lessons based on a new model including levels of meaning

BY JÉRÉMY DEHON

Abstract :

The chemical symbolism (symbols, formulas, equations) is one of the most fundamental topics in chemistry teaching. Although numerous researches have been done on the subject during the past thirty years, several difficulties connected to chemical symbolism are still frequently presented in recent scientific literature. We proposed, on the one hand, to identify sources of learners' difficulties, and, on the other hand, to build a didactical engineering able to overcome these obstacles which prevent learners to solve certain tasks. To identify the sources of learners' difficulties, we have followed four ways: an institutional way (analysis of curricula and textbooks), an epistemological way (analysis of the history of chemical symbolism), a conceptual way (analysis of levels of knowledge theories) and a linguistic way (analysis of semiotic systems). The refined description of learners' difficulties required the development of three new analytical models: a model of levels of meaning, a taxonomy of the semiotic systems used in chemistry teaching and an extended terminology triangle relating symbols, designations, concepts and objects. In the same time, an open-ended questions test was submitted to eleventh grade students in the French-speaking parts of Belgium (16-17 years old) in order to establish the type and frequencies of the meanings of symbols and terms used in the chemical reaction equation. All these prior works permitted to design a sequence of lessons. Its goals were to bring to the learners the opportunity to move between semiotic systems, and also to weaken some meanings while strengthening others. Tests in real classrooms (110 students in 2012, 56 students in 2013 – grade 9) have given rise to a major observation: the conversion between symbolical language and iconic representations of microscopic entities is a complex task for a majority of young students. In response, a session of remediation was designed and permitted to enhance, in a very short time, learners'performances in a task of conversion between symbolic language and iconic representations.

Keywords: chemical symbolism, levels of knowledge, learning difficulties, semiotic systems, didactical engineering, remediation tools.

REMERCIEMENTS

Remer-Ciman

La Coupe du Monde 2018 brûle ses derniers feux au moment d'écrire ces remerciements. Elle fut, pour l'amateur de football, à l'image d'une thèse : pleine de surprises, nécessitant l'usage de la vidéo et suscitant l'enthousiasme des foules en délire venues du monde entier. Après avoir tant vibré avec les Diables Rouges, je prends le risque de ringardiser ce texte en filant la métaphore footballistique. Je ne serai cependant pas trop audacieux : j'éviterai les références trop datables (qui se souviendra de Boyata en 2064 ?) afin que mon lecteur du futur ne se sente pas relégué sur le banc de touche. Seul Laurent Ciman, dont le nom de famille s'intègre miraculeusement dans le titre, goûtera au parfum suave de la postérité universitaire.

En tant que meneur de jeu et capitaine de mon équipe, j'ai pour mission de donner le rythme et de dessiner tant les actions dangereuses que les reconversions défensives. Cependant, comme dirait Wilkinson, on n'est rien sans l'esprit d'équipe. On n'est rien sans le staff technique dévoué, sans la défense à quatre, sans les médians aux quatre poumons, sans une attaque digne de ce nom. Simulons dès lors une visite royale dans le vestiaire : c'est à moi, capitaine, de présenter ceux sans qui la victoire est impossible.

Commençons par l'entraîneur, le professeur Philippe Snauwaert, qui fut le premier à croire en l'incroyable : me faire renouer avec la recherche. Meneur d'hommes, Philippe sait aussi être tacticien en conseillant la défense ou l'attaque en fonction de l'adversaire. Il n'hésite pas à mouiller le maillot en intervenant dans des conférences à deux voix devant des auditoires surchauffés, des publics parfois hostiles. Ses préparations d'avant-match au tableau blanc sont claires et précises ; l'équipe adverse n'a qu'à bien se tenir. Sans lui, pas de victoire. Qu'il soit ici remercié chaleureusement par une « ola » individuelle du lecteur.

Mais le staff ne se limite pas au coach. Je tiens à remercier Diane Baillieul et Isabelle Ravet pour leur confiance, leurs conseils avisés et leur capacité à entraîner un groupe d'assistants pas toujours motivés à analyser les défauts de l'adversaire. Je n'oublierai pas non plus les mains de l'ombre qui rédigent les feuilles de match, les feuilles de paie, les contrats que l'on casse si aisément lors du mercato hivernal, ces mains qui préparent les cônes, qui gonflent les ballons, ces mains qui nous permettent d'évoluer sur le terrain sans nous soucier des contingences externes. Merci à Sarah (qui intervient aussi en n°6, voir plus loin), Malory, Laurent, Delphine, Evelyne, Annick.

Venons-en à l'équipe. Les gardiens de mon but sont au nombre de deux, ce n'est pas trop pour « garder le zéro ». Ils sont les fondements de tout, les bases de mon existence dans et en-dehors du terrain, les grands responsables de ce qui arrive : merci à mon père

Dany et à ma mère Mireille de me montrer une confiance aveugle, un amour inconditionnel, qui permettent à un joueur de prester à 110 %. Leur aptitude à écarter les ballons chauds est à la mesure de la qualité de leur relance au pied. Sans eux, j'aurais déjà encaissé une quantité astronomique de buts à domicile, et perdu sans doute au premier tour.

En position de libéro se trouvent trois personnages, une femme au port élégant et deux enfants d'une beauté astrale. Ces trois-là sont le bien le plus précieux du joueur de football lambda, ceux avec qui il peut partager les succès et les défaites, les coups de chance et les coups du sort. Si Dominique était là bien avant, Clovis et Margot sont quelque part des enfants de la thèse, des purs produits de la formation salzinnoise, les grands espoirs du football namurois. Ils sont sur le terrain car je ne peux imaginer une partie sans entendre leurs chants d'encouragement, du Gorille à Surfer Girl, de Under Pressure au Soldat Rose. Quant à ma compagne, elle a ceci de particulier qu'elle peut jouer à toutes les places : défenseur central écartant d'un coup de coude le centre-avant adverse, milieu d'entrejeu pour aider à récupérer les balles perdues, attaquant pour corriger les envolées lyriques et les syntaxes approximatives, mais aussi coach adjoint, supporter et sponsor. Un exemple de polyvalence qui n'a pas d'équivalent. Merci à eux pour leur soutien sans failles et ce qu'ils me donnent au quotidien.

Devant les libéros se placent les stoppeurs, Fernand et Christiane, soutiens indéfectibles à l'avant de la défense. Même si le premier cité est bien meilleur quand il s'agit de taquiner le cochonnet, on ne compte plus les interceptions (de journaux) à propos et les déviations (de suppléments) salvatrices. Mes deux beaux-défenseurs sont surtout connus pour leur capacité à calmer le jeu dans la tempête et relativiser les temps faibles. Une longue carrière de correcteur et de secrétaire s'offre à eux.

Sur les côtés, les frères et leurs compagnes jouent leur rôle : couvrir les flancs pour ne pas qu'une incursion mal venue n'aboutisse à un centre surmontant ma défense centrale (Margot mesure moins d'un mètre) et mal capté par mes gardiens, qui n'ont plus la détente de leurs vingt ans. Merci également à mon filleul Antoine, toujours prêt à découvrir de nouveaux terrains de jeu avec son vieux parrain.

Les amis proches ferraillent avec moi dans le milieu du jeu, tentant d'amener un maximum de ballons exploitables en zone de conclusion :

- La « box-to-box » Sarah, n°6 de formation, pourvoyeuse d'eau, d'agrafes, de jeux, de vêtements, d'écoute attentive, d'encouragements, de bics, de rires. Merci pour toutes ces années dans le même bureau, à faire toujours plus que ce que l'on te demande de faire.
- En deuxième récupérateur, Ludo, vieux compagnon d'armes, de festivals, d'études et de fêtes en tous genres. Biathlète reconnu, c'est un joueur qui

apprécie toutes les surfaces, tant qu'il y a de la bière et à manger au bout de l'effort. Avec cette vérole de moine en soutien, je peux m'aventurer en toute sécurité vers le but adverse, sans me retourner.

- Sur l'aile droite, Julien, capable de pistonner sur son flanc pendant 135 km sans dormir. Si l'on excepte son jeu de tête (handicapé par sa légendaire petite taille), c'est un joueur complet, capable de tacler proprement lors d'un retour défensif désespéré comme de marquer un but alors qu'il voulait centrer en première intention.
- Sur l'aile gauche, Nicolas, qui n'est pas toujours aligné par manque de temps (il paraît qu'il est déjà bien occupé). Son placement, travaillé à grands coups de Civilization IV, est sa grande force. Sa tendance naturelle à serrer des mains lui a déjà valu plusieurs algarades avec les joueurs adverses, peu habitués à tant de cordialité.
- À mes côtés en soutiens d'attaque, François et Florent, verbomoteurs de génie, dont les chants de victoire adulescents se sont révélés prémonitoires. Véritables animateurs de jeu, ils sont imprévisibles, gardant ou délivrant généreusement les atouts dans leur main, en fonction des circonstances.
- Enfin, une touche d'audace, j'aligne entre l'axe et les flancs un petit groupe de filles (toutes bien accompagnées) qui n'ont de cesse de harceler le milieu rival, jusqu'à l'inévitable perte de balle : Delphine, Céline, Aurélie, Sandrine, Mélody du côté gauche et Anna, Ingrid, Charlotte, Sophie L, Sophie C. du côté droit. Leur apport est substantiel, surtout quand l'équipe est menée à la marque.

L'attaque est constituée par mes collègues directs, au front, face aux élèves, face à cette incompréhension se lisant sur leur visage, face à la recherche impérieuse de solutions. Deux buteuses renommées m'aident à faire pencher la balance en la faveur de l'équipe : Céline et son incroyable force de travail qui s'étend du rangement obsessionnel de la bibliothèque au dénombrement des mouvements capillaires d'étudiants, et Bénédicte, ouragan de bienveillance et de sympathie, qui a ouvert la voie en marquant le premier but à un gardien médusé devant tant d'inhibition (conceptuelle). Dispersé à l'avant se retrouve l'ensemble de mes centre-avants, collègues assistants de l'UNamur (merci à Bastien, Jean, Amory, Sébastien, Céline, Xavier et tous les autres), collègues de l'Henallux (merci à Bernadette, Isabelle, Philippe, Vincent, Nathalie, et tous les autres), collègues didacticiens de l'ADiS et d'ailleurs (merci à Thierry, Sabine, Dorothée, Philippe C., Jim, Matthieu, Marie-Noëlle, et tous les autres), collègues du secondaire (merci spécial à Christine, Brigitte, Seb, Pasqua, Max, ainsi qu'à Fred, sans qui il n'y aurait pas de ballon). Ce sont eux qui marquent des buts chaque jour, dépassant les défenses des élèves/étudiants, pour mieux leur donner la victoire.

Je remercie mes sponsors et, en premier lieu, l'Université de Namur qui a financé les maillots et l'intendance, qui m'a fait confiance pour animer le jeu et pour monter une équipe performante. Je remercie également l'Henallux, qui a permis de tester en grandeur nature certains aspects tactiques, ainsi que les écoles qui ont collaboré de très près à notre travail. Je remercie le Professeur Daniel Vercauteren pour sa confiance indéfectible, ainsi que les membres de mon comité d'accompagnement et de mon jury de thèse pour leur professionnalisme et la qualité de leur fond de jeu.

Enfin, je tiens à honorer les disparus et, en particulier, Daniel à qui cette thèse est dédiée. C'est lui qui a pris l'immense risque de me mettre une meule entre les mains en me disant : « t'as deux mains gauches gamin, mais ça va le faire ». Ça l'a fait Daniel, merci à toi.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE…… 17

NOTE PRÉLIMINAIRE……25

CHAPITRE 1. Transposition didactique de la symbolique chimique : analyse des programmes dans deux réseaux d'enseignement en Belgique francophone…….. 29

1.1. INTRODUCTION…… 29
1.2. LA SYMBOLIQUE CHIMIQUE DANS LES PROGRAMMES VISÉS……. 30
1.2.1. Premier degré de l'enseignement secondaire…….30
1.2.2. Troisième année des humanités générales – « ancien » programme du réseau libre catholique subventionné……30
1.2.3. Troisième année des humanités générales – « ancien » programme du réseau de la Fédération Wallonie-Bruxelles…….. 33
1.2.4. Troisième année des humanités générales – « nouveau » programme du réseau libre catholique subventionné……36
1.2.5. Discussion intermédiaire……39
1.3. CADRE THÉORIQUE DE LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE……...41
1.4. TRANSPOSITION DE LA SYMBOLIQUE CHIMIQUE……... 46
1.4.1. Une simplification du modèle de référence……... 46
1.4.2. Une désyncrétisation forcée…….. 49
1.4.3. Une création didactique……. 54
1.4.4. Une terminologie didactique……. 56
1.5. CONCLUSIONS……..58

CHAPITRE 2. Les difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique : revue de littérature……... 61

2.1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE……..... 61
2.2. DIFFICULTÉS LIÉES AUX FORMULES CHIMIQUES……... 64
2.2.1. Interpréter……...64
2.2.2. Construire…….. 68
2.3. DIFFICULTÉS LIÉES AUX ÉQUATIONS DE RÉACTION……...70
2.3.1. Interpréter……...70
2.3.2. Construire……...78
2.4. PRINCIPALES DIFFICULTÉS RECENSÉES…… 80
2.5. CONCLUSIONS……..81

CHAPITRE 3. La symbolique chimique dans les théories des niveaux de savoir relatifs à l'enseignement-apprentissage de la chimie……83

3.1. JOHNSTONE ET LE « CHEMISTRY TRIPLET »……..84
3.1.1. Le « chemistry triplet » de 1982……84
3.1.2. Le « chemistry triplet » de 1991…… 85
3.1.3. Quatre couches de structuration……86
3.1.4. Un schéma global……...87

3.1.5. Applications dans les recherches en didactique……88
3.1.6. À propos des formules et équations chimiques……..89
3.2. LE « TRIPLET RELATIONSHIP » DE GILBERT ET TREAGUST……90
3.2.1. Des types de représentation……... 90
3.2.2. Critiques du « triplet relationship »……... 91
3.2.3. À propos des formules et équations chimiques……. 92
3.3. LE TÉTRAÈDRE DE KERMEN ET MÉHEUT……..93
3.3.1. Un niveau macroscopique scindé……...93
3.3.2. Rôle des modes de communication……95
3.3.3. Connexions entre le niveau symbolique et les autres niveaux…….. 96
3.3.4. Le niveau symbolique comme représentation des modèles…….. 97
3.3.5. À propos des formules et équations chimiques……. 97
3.4. LE « CHEMISTRY KNOWLEDGE SPACE » DE TALANQUER……. 98
3.4.1. Un espace multi-dimensionnel…….. 98
3.4.2. À propos des formules et équations chimiques…… 100
3.5. LE NIVEAU SYMBOLIQUE QUESTIONNÉ PAR TABER……. 100
3.5.1. Retour aux fondamentaux…… 100
3.5.2. Suppression du niveau symbolique……102
3.5.3. Des liens particuliers entre symboles et niveaux de conceptualisation……103
3.5.4. À propos des formules et équations chimiques……. 104
3.6. DISCUSSIONS INTERMÉDIAIRES……... 104
3.6.1. Plusieurs théories des niveaux de savoir……104
3.6.2. La fonction intrinsèquement représentative des symboles…… 105
3.6.3. La médiation symbolique……...105
3.6.4. Des cadres d'analyse des difficultés des apprenants……. 106
3.6.5. Identifier un niveau, c'est identifier un système de représentation.. 108
3.7. MODÈLE DES NIVEAUX DE SIGNIFICATION……108
3.8. CONCLUSIONS……. 112

CHAPITRE 4. La symbolique chimique et les systèmes sémiotiques dans l'enseignement-apprentissage de la chimie…….. 115

4.1. INTRODUCTION : CONCEPTS FONDAMENTAUX……..116
4.2. LANGUE, LANGAGE, PAROLE…… 122
4.3. ANALYSE CRITIQUE DE MODÈLES LANGAGIERS…… 123
4.3.1. Système de Snow……... 123
4.3.2. Système de Wellington…….. 124
4.3.3. Système de Lemke……125
4.3.4. Systèmes de Jacob et Mestrallet…… 125
4.3.5. Système de Khanfour-Armalé et Le Maréchal…….. 128
4.3.6. Discussion intermédiaire……....129
4.4. ÉTABLISSEMENT D'UNE NOUVELLE TAXONOMIE LANGAGIÈRE……130
4.4.1. Mise en évidence et structuration des langues naturelles…….. 130
4.4.2. Mise en évidence et structuration des langues artificielles……131
4.4.3. Mise en évidence et structuration des systèmes de représentation iconique……..133

4.4.4. Mise en évidence et structuration des systèmes de représentation graphique……135
4.5. DISCUSSIONS……... 136
4.6. CONCLUSIONS……. 145

CHAPITRE 5. Épistémologie de la langue symbolique des chimistes : impacts didactiques……147

5.1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE……148
5.2. DE L'ICÔNE ALCHIMIQUE AUX FLÈCHES DE RÉACTION…… 149
5.2.1. L'icône alchimique…… 149
5.2.2. L'affinité chimique…… 154
5.2.3. Lavoisier et la révolution langagière……. 157
5.2.4. De Dalton à Berzelius…… 160
5.2.5. De 1814 à nos jours……166
5.2.6. La notation symbolique aujourd'hui……..172
5.3. LIENS AVEC LES DIFFICULTÉS DIDACTIQUES DES APPRENANTS……172
5.3.1. L'interprétation additive en tant que raisonnement primitif……..172
5.3.2. Désubstantialisation et resubstantialisation……... 174
5.3.3. « Mathématisation » et « démathématisation »……. 175
5.3.4. Confusion épistémologique entre indice et coefficient……..176
5.3.5. Déconnexion entre symbole chimique et terme de la nomenclature. 177
5.3.6. Complémentarité et opposition……..178
5.3.7. Un système dynamique……..179
5.4. CONCLUSIONS……. 179

CHAPITRE 6. L'analogie entre la langue française et la langue symbolique chimique : analyse linguistique et didactique……...181

6.1. ANALOGIE DE L'ALPHABET : SOURCES ET FRÉQUENCE……182
6.2. LES ANALOGIES EN SCIENCES : CADRES THÉORIQUES ET USAGES……184
6.2.1. Cadres théoriques……...184
6.2.2. Usage des analogies en sciences…… 187
6.3. CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE SOURCE……...187
6.4. CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE CIBLE…….. 189
6.5. FONCTIONNEMENT DE L'ANALOGIE DE L'ALPHABET…… 192
6.5.1. Analyse selon les cadres théoriques de l'analogie……192
6.5.2. Développements de l'analogie de l'alphabet…… 197
6.5.3. Points de divergence dans l'analogie structurelle graphique……198
6.6. DISCUSSION……. 200
6.6.1. Liens avec les difficultés des apprenants……... 200
6.6.2. Proposition d'une analogie par comparaison de situations……203
6.7. CONCLUSIONS……..205

CHAPITRE 7. Significations des symboles de l'équation de réaction pour des élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone……. 209

7.1. INTRODUCTION…… 209
7.2. INGÉNIERIE DIDACTIQUE…….. 210
7.3. CADRES STRUCTURANTS…….. 214
7.4. QUESTIONS DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE……..... 217
7.5. RÉSULTATS…….. 219
7.5.1. Identification des réactifs (Q1)…….. 219
7.5.2. Identification des produits (Q2)……. 225
7.5.3. Le signe « + » entre chimie et mathématiques (Q3)…….. 229
7.5.4. La flèche de réaction : suivez le guide (Q4)…….. 233
7.5.5. Le coefficient stœchiométrique : un carrefour sémantique (Q5)…... 237
7.5.6. L'indice entre nombre d'atomes, proportion et valence (Q6)…… 243
7.5.7. État, forme ou nature ? (Q7)…….. 248
7.5.8. La réaction chimique : une inconnue (Q8)……250
7.6. DISCUSSIONS……253
7.6.1. De nombreuses significations pour chaque symbole……. 253
7.6.2. Des niveaux de signification préférentiels……. 256
7.6.3. Des boucles langagières……. 257
7.6.4. Des confusions lourdes de conséquences……...262
7.6.5. Circulation entre niveaux de signification, circulation entre systèmes sémiotiques……264
7.7. CONCLUSIONS……..265

CHAPITRE 8. Développement et effets d'une séquence de leçons favorisant la circulation entre niveaux de signification et entre systèmes sémiotiques……...267

8.1. INTRODUCTION…… 267
8.2. ÉLABORATION DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS…… 268
8.2.1. Une collaboration, des contraintes……. 268
8.2.2. Choix des axes d'approche, hypothèses de travail……269
8.3. DESCRIPTION DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS…….. 272
8.3.1. Première période de cours……..273
8.3.2. Deuxième période de cours…… 279
8.3.3. Troisième période de cours…… 281
8.3.4. Synthèse de fin de séquence……...283
8.4. MÉTHODOLOGIE……...284
8.5. DESCRIPTION DU POST-TEST……285
8.6. RÉSULTATS ET ANALYSE A POSTERIORI……290
8.6.1. À partir des observations……290
8.6.2. À partir du post-test……296
8.7. CONCLUSIONS……..323

CHAPITRE 9. Développement et effets d'une séance de remédiation renforçant la circulation entre écriture symbolique et registre iconique microscopique…….327

9.1. INTRODUCTION……327
9.2. TYPES D'ERREURS DANS LES REPRÉSENTATIONS ICONIQUES MICROSCOPIQUES…328
9.2.1. Type 1 - Représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés…… 328

9.2.2. Type 2 – Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient stœchiométrique……..330
9.2.3. Type 3 - Non-utilisation de l'indice……... 330
9.2.4. Type 4 – Agrégation des réactifs et/ou des produits…….. 331
9.2.5. Type 5 – Éclatement des réactifs et/ou des produits…….. 332
9.2.6. Type 6 – Représentation d'une autre réaction chimique……333
9.3. TYPES DE REPRÉSENTATIONS ICONIQUES MICROSCOPIQUES CORRECTES…….. 334
9.4. AJUSTEMENT ET DÉVELOPPEMENT DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS……..338
9.4.1. Rééquilibrage des parties de la séquence……... 338
9.4.2. Extension de la séquence de leçons……338
9.4.3. Construction de la séance de remédiation et d'un deuxième post-test…….. 339
9.4.4. Modifications du post-test n°2……... 341
9.5. MÉTHODOLOGIE…….. 342
9.6. RÉSULTATS…….. 342
9.6.1. À partir des observations in situ et des témoignages du professeur collaborant……..342
9.6.2. À partir du premier post-test…….. 342
9.6.3. À partir du deuxième post-test……..... 357
9.7. DISCUSSIONS……360
9.7.1. Une hiérarchie des significations……361
9.7.2. Des profils d'élèves en fonction de l'option…….. 363
9.7.3. Une tâche plus complexe qu'il n'y paraît…….. 364
9.7.4. Agrégation et interprétation additive……..365
9.8. CONCLUSIONS…….. 367

CONCLUSION GÉNÉRALE……369

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES……...393

ANNEXES…… 409

INTRODUCTION GÉNÉRALE

> The producer of two leading TV series for children opened his talk (…) with the statement, « As a student, I hated chemistry. » He went on to spell out reasons, such as the teacher's authoritarian and introverted style, and his reducing all chemistry to a series of formulas and equations written on the blackboard as illegibly as they were incomprehensible. « The teacher, » he said, « appeared to dislike chemistry as much as he disliked the students. »
>
> (Lippincott, 1979)

Le cours de chimie, dans l'enseignement secondaire, ne laisse pas souvent de souvenirs impérissables. Jugée « plus facile » que la physique et « moins concrète » que la biologie, la chimie est une discipline scolaire dont la richesse reste cachée dans l'ombre de ses deux puissantes voisines. Pourtant, un élément semble survivre dans la mémoire de certaines personnes que nous avons interrogées sur ce qui les a marquées dans leur cours de chimie : l'équation chimique ou « équation de réaction ». Plus particulièrement, c'est la démarche de pondération des équations chimiques, ce jeu de combinaisons de chiffres et de lettres, cette énigme perpétuelle aux ressorts explicites, qui émerge, telle la pointe d'un iceberg, à la surface des souvenirs adolescents. C'est donc le langage des chimistes qui marque, plus encore que ses objets (la molécule, l'atome), parfois même au-delà de son ancrage expérimental (le laboratoire). Il est vrai que l'identité du chimiste repose sur un petit nombre de piliers qui le distinguent des autres scientifiques. L'un d'entre eux est le tableau périodique des éléments, et à travers lui ses principaux composants : les symboles chimiques. À ces symboles sont associés des noms qui nous renvoient à l'origine du monde et des sciences, du latin des métaux travaillés par nos ancêtres préhistoriques au grec ouvragé de Lavoisier, en passant par la folie combinatoire de la nomenclature organique. Mais quand il s'agit de donner un nom systématique aux substances, et donc aux combinaisons de symboles appelées « formules chimiques », la donne change ; les noms s'empilent en couches, en *dialectes*, pourrait-on dire. Malgré la volonté d'unifier la communauté en une langue, les spécificités régionales résistent, se rassemblent en places fortes (des universités, des domaines d'activité), assiégées par les tenants de l'une ou l'autre des nomenclatures à adopter. Au bout du compte, les substances, aux mille et une désignations, se fondent plus aisément en une étiquette symbolique, construite pour être univoque. Enfin, quand la réaction chimique est l'objet à représenter, c'est l'équation chimique qui est convoquée. Le chimiste assemble alors formules et symboles chimiques, signe « + », chiffres et flèche dans un défilé linéaire de concepts formalisés. L'équation déploie ainsi en une écriture serrée les substances et leur état, la transformation et la conservation, les atomes et les molécules, les réactifs et les produits, les quantités consommées et les quantités formées. Mais le chimiste se doit aussi de nommer ses outils. En effet, un autre pilier de l'identité du chimiste est sans nul doute sa verrerie, si caractéristique, si

typique, aux noms empruntés à leurs inventeurs (Erlenmeyer, Buchner), à la terminologie parfois triviale (pipette, burette). Combinée à celle des appareils (bec Bunsen, « rotavapor », etc.), la terminologie de la verrerie de laboratoire vient enrichir le langage des chimistes, véritable emblème de la discipline dans notre société moderne.

Mais pourquoi – pour un individu lambda – est-ce la pondération des équations chimiques qui s'érige en exemple, surplombant le paysage langagier des chimistes ? Pourquoi le fait de « chercher l'équilibre » en ajoutant ici un symbole, ici un chiffre, constitue-t-il un point d'ancrage de la chimie dans la mémoire des étudiants devenus adultes ? Formulons l'hypothèse suivante : l'enseignement-apprentissage de l'équation chimique, véritable condensé de la symbolique chimique fondamentale, constituerait un carrefour entre deux orientations différentes au sein du cursus. En effet, certains élèves ont vu, voient ou verront dans l'équation chimique un fatras de lettre minuscules et majuscules, de flèches, entre autres symboles divers, dont il faut ajuster le nombre ou le sens en fonction de concepts insuffisamment intégrés dans le réseau des autres concepts dans et en-dehors de la discipline. Bref, le langage symbolique chimique est susceptible de cristalliser les difficultés de certains apprenants, déjà mis à mal par des concepts (molécule, atome, réaction) aux contours rendus flous par des choix programmatiques discutables. Le rejet peut être à la mesure de l'acceptation, voire de l'enthousiasme exprimé par d'autres élèves, composant une autre frange de la classe, attirée par les sciences et ses modes singuliers de communication. Pour ceux-là, l'équation chimique est la porte d'entrée vers la communauté des chimistes, de la même manière que la maîtrise de certains codes donne l'accès à des groupes religieux, politiques, culturels ou économiques dans la société. L'équation chimique, en tant que nœud d'obstacles, joue ainsi un rôle de révélateur. Soit l'élève est capable de dénouer le nœud, ce qui lui permet de suivre le fil d'Ariane vers la sortie du labyrinthe. Soit l'élève lutte, renforce ce nœud à coups d'essais, puis lâche le fil pour enfin n'avoir d'autre choix que de revenir au point de départ. Pour nous, l'équation chimique est une ligne de faille qui divise, tôt dans l'enseignement secondaire, la classe en deux parties inégales en nombre : l'une qui décroche, l'autre qui accroche.

La symbolique chimique (symboles, formules, équations) n'est bien sûr pas le seul point de rupture dans l'enseignement de la chimie. Il est entendu que les autres systèmes de signes (nomenclatures, représentations de Lewis ou Gillespie, etc.) sont autant de risques de scission à l'intérieur de la classe. Mais ces modes de représentation apparaissent dans le programme après l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique. L'équation de réaction constitue donc le premier filtre qui sépare le mélange hétérogène qu'est une classe de troisième année dans l'enseignement secondaire. Nous ne pouvons considérer la chose comme entendue : l'enjeu est trop important pour un grand nombre d'élèves, futurs étudiants dans l'enseignement supérieur. Les modes de communication utilisés en chimie sont en effet omniprésents en tant que prérequis, ou

en tant que premiers objectifs d'apprentissage dans la plupart des cursus à caractère scientifique : physique, biologie, pharmacie, médecine, sciences biomédicales, sciences vétérinaires, ingénieur de gestion, géologie, etc. La maîtrise ou la non-maîtrise de ces systèmes de signes peuvent ainsi mener au succès ou à l'échec lors d'examens d'entrée, lors de concours ou simplement lors des premiers examens de janvier en première année de baccalauréat à l'université. Développons deux exemples concrets. Si l'on consulte un échantillon de 16 questions de chimie issues de l'examen d'entrée en médecine organisé par la Fédération Wallonie-Bruxelles en 2017, il s'avère que 14 questions comprennent des symboles, formules ou équations chimiques dans leur énoncé. Plus encore, 5 questions nécessitent la conversion d'un terme de la nomenclature en une formule chimique. Par ailleurs, les examens de chimie générale de janvier 2017 et juin 2018 en section pharmacie et sciences biomédicales à l'Université de Namur recèlent plus de 70 % de questions comportant des écritures symboliques. Au-delà de la simple mention dans un énoncé, les formules et équations chimiques, dans ces examens, sont associées à un (très) grand nombre de tâches variées : produire et pondérer une équation de réaction (acido-basique, oxydoréduction), convertir une formule chimique en une représentation de Lewis, déterminer la masse d'un réactif ou d'un produit en fin de réaction, trouver l'étage d'oxydation d'un atome dans une molécule, calculer une variation d'enthalpie, identifier une fonction chimique (acide fort, acide faible, base, ampholyte, etc.), calculer la dureté d'une eau de ville, appliquer la loi de modération de Le Chatelier, etc. En outre, les exercices de conversion entre différents systèmes de représentation sont souvent à même de sélectionner drastiquement le groupe d'élèves qui satisfera aux critères minimaux de réussite. Illustrons : dans l'examen de chimie de janvier 2017 précédemment cité, les deux questions associant des conversions entre nomenclature, symbolique chimique et représentations de Lewis ou Gillespie, présentent un taux de réussite moyen de 15 %. Il n'est pas improbable que l'équation chimique (et, à travers elle, toute la symbolique chimique) soit utilisée comme filtre au sein des auditoires de première année de baccalauréat à l'université.

Face à un tel constat, le didacticien de la chimie doit prendre du recul, mettre de la distance entre ce qu'il connaît de sa discipline et ce qu'il croit connaître des apprenants. Il ne peut se limiter à une attitude défaitiste, arguant d'un déterminisme imparable : il y a les élèves qui accrochent, et ceux qui décrochent ; on ne changera pas le savoir. Il doit au contraire s'interroger en vrai chercheur : pourquoi certains élèves éprouvent-ils autant de difficultés face à la symbolique chimique ? Comment peut-on dépasser le rejet opéré par une frange de la classe et lui donner accès à la communauté des initiés en chimie, via la tutelle fédératrice d'un langage commun ? Cette problématique langagière, appliquée dans le champ de l'éducation, constitue d'ailleurs l'un des enjeux de recherche majeurs de cette dernière décennie en didactique de la chimie. De nombreux auteurs ont exploré le rôle des langages (en général) dans l'enseignement-apprentissage de cette discipline ; leurs apports ont permis d'affiner certains constats.

L'un des plus importants est que la maîtrise par un apprenant donné de compétences langagières dans sa langue maternelle (analyse de texte, extraction d'une structure, choix de significations) est fortement corrélée à sa réussite scolaire en chimie (Pyburn *et al*., 2013). Autrement dit, la capacité d'interpréter une représentation et de la convertir en une autre constitue un élément fondamental, testé, nous l'avons évoqué plus haut, dans la plupart des examens de sélection en chimie. Or, les langages en chimie sont variés (symbolique, nomenclature, représentations iconiques, etc.) et interconnectés. Cette intrication des systèmes de représentation rend complexe l'apprentissage et la planification programmatique des savoirs à enseigner. Un autre écueil a été mis en évidence : la polysémie de certains termes et de certains symboles. Les « DMV-words » (« dual-meaning vocabulary ») constituent de bons exemples de termes utilisés en chimie mais dont la signification diffère dans d'autres domaines (Song et Carheden, 2014). Par exemple, le terme « base » ne convoie pas la même signification en chimie qu'en mathématiques. Dans la symbolique chimique, « C » peut renvoyer au charbon, au graphite, au diamant, à l'élément carbone, à l'atome de carbone-12, etc. Une telle polysémie pose de sérieux problèmes de traitement et de conversion de l'information, surtout chez de jeunes apprenants (Taskin et Bernholt, 2014). Si chaque enseignant est, d'une certaine manière, un professeur de langues, il est certain que le professeur de chimie doit en permanence jongler entre plusieurs langages, tout en étant conscient des relations que ceux-ci entretiennent entre eux, mais aussi avec d'autres systèmes dans d'autres disciplines.

Mais les recherches en didactique de la chimie posent souvent plus de nouvelles questions qu'elles ne répondent à leurs objectifs initiaux. Ces questions concernent, au moins indirectement, tous les enseignants de chimie. En effet, en tant que professeur de chimie en troisième année de l'enseignement secondaire, nous avons pu personnellement observer, sonder et tenter de remédier (parfois en vain, parfois avec succès) à ces difficultés qu'éprouvent la plupart des élèves face à la symbolique chimique. La problématique nous occupe depuis lors : quels mécanismes sont en jeu ? Comment aider concrètement nos élèves, comment soutenir efficacement les professeurs ? Cette croisade, faite de frustration et de conviction, a mené très naturellement au sujet de ce travail de recherche. Notre intérêt personnel croise ainsi opportunément les intérêts de la communauté des chercheurs en didactique de la chimie.

En tant que savoir enseigné et découvert uniquement dans le cadre scolaire, la symbolique chimique se trouve très dépendante des contraintes institutionnelles (référentiels, programmes, options, pratiques enseignantes conseillées). Celles-ci divergent d'un pays à l'autre, voire d'une région à l'autre. C'est la raison pour laquelle notre étude présente avant tout un ancrage local : il se focalise sur les élèves de la Fédération Wallonie-Bruxelles (enseignement en Belgique francophone), creuset avec ses traditions scolaires, ses réseaux, ses démarches classiques, ses objectifs parfois

implicites et transmis de générations en générations d'enseignants. Nous souhaitons également adresser ce travail aux formateurs d'enseignants et aux professeurs de terrain en Fédération Wallonie-Bruxelles, qu'il soit une source d'informations claires pour tout qui s'intéresse à la problématique de la symbolique chimique dans l'éducation. Or, les enseignants sont souvent plus sensibles à des recherches tournées vers l'action plutôt que vers le constat, des études destinées à fournir des pistes envisageables plutôt qu'à décrire uniquement les difficultés à surmonter. Par conséquent, nos objectifs finaux consistent en une ingénierie didactique menant à une séquence de leçons à même d'apporter des propositions concrètes testées in situ. Cette séquence de leçons doit tenter d'aborder de front certaines difficultés bien documentées, alors que ses forces et ses faiblesses doivent être analysées objectivement, avec l'aide de cadres théoriques solides.

Pour guider notre recherche, nous énonçons deux grandes questions. Primo, malgré les nombreux articles consacrés à ce sujet, la question de la polysémie des symboles de l'équation chimique reste en grande partie pendante. Ces précédentes études offrent des résultats intéressants mais souvent éclatés, parcellaires, et ne constituent pas un panorama général intégré des sources des difficultés éprouvées par les élèves. Nous posons ainsi notre première grande question de recherche : quelles sont les origines des difficultés qu'éprouvent les élèves lors de l'apprentissage et l'usage de la symbolique chimique ? Secundo, il s'agit de construire, développer et tester une séquence de leçons originale. Nous posons alors notre deuxième question de recherche : dans quelle mesure un dispositif didactique (séquence de leçons, séance de remédiation) est-il capable de lever certaines difficultés rencontrées par les apprenants face à l'interprétation et la construction de l'écriture symbolique des chimistes ?

Pour mener cette étude, nous avons choisi d'appliquer le cadre théorique de l'ingénierie didactique selon Artigue (1988). Quatre étapes distinctes définissent ce mode opératoire : (1) des analyses préalables sur le sujet ; (2) une analyse a priori comprenant le choix des hypothèses et le développement d'une séquence de leçons ; (3) l'expérimentation ; (4) l'analyse a posteriori et la validation ou l'invalidation des hypothèses de départ. Pour débuter nos analyses préalables, nous avons opté pour un cadre théorique fructueux en didactique de la chimie : le « chemistry triplet » de Johnstone (1982), adapté – dans notre cas – par Houart (2009). L'équation chimique y est classée dans un niveau dit « symbolique », en connexion avec des niveaux microscopique et macroscopique. Les analyses préalables ont été complétées par l'étude des contraintes institutionnelles locales ainsi que par un relevé des difficultés des élèves face à la symbolique chimique décrites dans la littérature scientifique. À la lumière de ces analyses, une séquence de leçons a été développée et testée sur le terrain en 2012 et 2013, en vue de surmonter certaines difficultés ciblées. L'analyse a posteriori des tests in situ a révélé une série de lacunes : des analyses préalables insuffisamment

approfondies sur les sources des difficultés des élèves, un cadre théorique limité d'un point de vue linguistique et conceptuel, la non-prise en compte des versions plus récentes du « chemistry triplet », notamment celui de Taber (2013), dans l'analyse des données.

Nous avons donc remis l'ouvrage sur le métier et concentré nos efforts sur un double but : élucider les sources des difficultés des élèves en abordant plus profondément les pistes épistémologiques et linguistiques, et construire des modèles d'analyse plus performants en empruntant la voie des sciences du langage. Les derniers temps de nos recherches ont été dédiés à ce travail de spécialisation. Il nous fallait, tout en restant didacticien de la chimie, devenir à la fois sémiologue et historien des sciences. La collaboration avec des collègues linguistes et philosophes des sciences nous a permis d'avancer rapidement et en sécurité dans des chemins parfois ardus pour un simple chimiste. Nos multiples casquettes de chercheur étaient par moment en symbiose : le sémiologue travaillait avec le didacticien pour construire des modèles théoriques d'analyse que l'épistémologue pouvait valider. Cette reconstruction nécessaire des objectifs et des outils a débouché sur d'importantes avancées qui ont renouvelé notre compréhension de la symbolique chimique et, plus généralement, des systèmes de représentation utilisés au cours de chimie. En plus des modèles originaux construits (modèle des niveaux de signification, taxonomie des systèmes sémiotiques dans l'enseignement de la chimie, triangle étendu de terminologie), nous avons creusé les origines des difficultés des apprenants face à la symbolique chimique en apportant des éclairages provenant de sources diverses. Avec de nouveaux outils, nous avons repris le corpus de données recueillis au début de notre parcours et revu, enrichi et ajusté tant l'analyse a priori que l'analyse a posteriori. Nous avons ainsi pu dresser le réseau sémantique des symboles constituant l'équation chimique et le confronter aux données brutes issues du test in situ. Nous avons également décrit plus finement les relations d'ordre linguistique entre les différents systèmes sémiotiques convoqués dans notre séquence de leçons. L'ensemble de ces analyses a permis de répondre fructueusement à nos deux questions de recherche. Cet aller-retour entre analyses préalables, test et analyse a posteriori est, bien sûr, constitutif de tout travail de recherche scientifique. Cependant, en vue d'une communication efficace et intelligible, il est souvent nécessaire d'exposer les résultats de la recherche en tordant quelque peu le cours du temps.

Il nous faut dès lors justifier brièvement la structure de cet ouvrage tel qu'il est présenté. Nous avons choisi de ne pas respecter l'ordre chronologique de la recherche, et de proposer au lecteur une version reconstruite du travail effectué. En effet, le texte débute par six chapitres d'analyses « préalables », qui synthétisent les études réalisées avant et après le test in situ de la séquence de leçons. Il nous semble en effet essentiel que les sources des difficultés des élèves soient discutées le plus profondément possible, avant

d'exposer le développement et le test d'une séquence de leçons, construite dans le but même de surmonter une partie de ces difficultés. Les six chapitres initiaux vont ainsi aborder les pistes d'investigation institutionnelles (chapitre 1 : analyse des programmes et manuels scolaires) associées aux difficultés des élèves face à la symbolique chimique recensées dans la littérature scientifique (chapitre 2), puis les pistes conceptuelles (chapitre 3 : évolution des théories des niveaux de savoir), linguistiques (chapitres 4 et 6 : analyse sémiotique des systèmes de communication en chimie) et épistémologiques (chapitre 5 : construction historique de la symbolique chimique). De plus, les nouveaux modèles d'analyse que nous proposons gagnent à être présentés dans la continuité des articles de recherche qui les ont inspirés. Notre modèle des niveaux de signification est ainsi le produit des avatars récents du « chemistry triplet », prenant en compte les critiques émises dans la communauté des didacticiens depuis une dizaine d'années (chapitre 3). En outre, notre taxonomie des systèmes sémiotiques utilisés dans l'enseignement de la chimie et le triangle étendu de terminologie émergent d'une réflexion profonde sur les relations linguistiques entre la symbolique chimique et les autres systèmes de représentation (chapitre 4). Les six chapitres initiaux poursuivent tous un double rôle : synthétiser les apports de la littérature scientifique sur une facette particulière de la symbolique chimique, et mener une analyse originale et solide qui apporte des réponses à nos questions de recherche.

Les trois derniers chapitres de cette étude se focalisent sur le développement, le test et la validation d'une séquence de leçons. Une étude diagnostique réalisée auprès d'élèves de grade 11 en Fédération Wallonie-Bruxelles permet de mettre en lumière les significations que ces élèves prêtent aux symboles dans une équation chimique (chapitre 7). Ce coup de sonde local éclaire les propositions théoriques issues des six premiers chapitres et étaye la réflexion menant à la construction de notre séquence de leçons. Le chapitre 8 présente le contenu de la séquence de leçons testée en 2012 ainsi que les résultats de l'analyse a posteriori. Les constats qui en ont émergé nous ont poussé à ajouter une courte séance de remédiation, testée en 2013, dont les principes généraux et les résultats sont présentés dans le chapitre 9. Dans les deux cas, la séquence de leçons a été mise en œuvre dans les classes de troisième année d'un même établissement de l'enseignement officiel subventionné en Fédération Wallonie-Bruxelles, auprès du même professeur collaborant. Les nouveaux modèles d'analyse que nous proposons sont mis à l'épreuve dans ces chapitres, ce qui permet de juger de leur pertinence ainsi que de leurs limites. La conclusion générale concentre les réponses que nous pensons avoir apportées à nos deux principales questions de recherche. Cette synthèse amène tout naturellement à de nombreuses perspectives, dont nous développons quelques exemples.

Nous vous souhaitons une excellente lecture.

NOTE PRÉLIMINAIRE

Structure de l'enseignement en Belgique francophone

La Belgique est connue pour sa complexité politique (un gouvernement fédéral, des gouvernements régionaux, des gouvernements communautaires) et linguistique (trois langues nationales inégalement réparties). Elle l'est moins pour la complexité de la structure qui pilote et met en œuvre l'enseignement. Pourtant, le lecteur non initié à l'histoire mouvementée de nos institutions scolaires nécessite un éclaircissement préalable. En Belgique francophone, les acteurs de terrain parlent le plus souvent de « réseaux d'enseignement », même si ce terme n'a pas réellement de valeur juridique. Nous allons suivre cet usage et distinguer trois grands réseaux d'enseignement :

1) Le réseau « officiel » de la Fédération Wallonie-Bruxelles (FWB), organisé par celle-ci.
2) Le réseau « officiel subventionné » qui regroupe en réalité plusieurs « pouvoirs organisateurs » (ou « P.O. ») publics autres que la FWB : les provinces, les villes, les communes, la COCOF (Commission Communautaire Française).
3) Le réseau « libre subventionné » regroupant plusieurs pouvoirs organisateurs privés. Ces P.O. sont des associations confessionnelles ou non-confessionnelles. Les établissements libres catholiques représentent une écrasante majorité au sein de ce réseau.

La Fédération Wallonie-Bruxelles subventionne le réseau libre en plus de son propre réseau et du réseau officiel subventionné, mais en ne prenant en charge qu'une partie des frais de fonctionnement (essentiellement les salaires du personnel et quelques frais de rénovation).

L'enseignement dit « ordinaire » comprend l'enseignement maternel, primaire et secondaire. L'enseignement secondaire ordinaire compte six années d'études organisées en trois degrés de deux ans. Le premier degré accueille des élèves généralement de 12 à 14 ans. Il est divisé en deux « parcours » : le premier degré commun pour les élèves ayant réussi le CEB[1] et le premier degré différencié pour les élèves n'ayant pas obtenu ce certificat. Le deuxième et le troisième degrés comptent des élèves âgés respectivement de 14 à 16 ans et de 16 à 18 ans.

Les deuxième et troisième degrés sont divisés en deux sections (figure 1) : la section de transition qui forme aux études supérieures et la section de qualification qui, en plus de former à certaines études supérieures, prépare à un métier spécifique. La section de transition est elle-même divisée en humanités générales et en humanités technologiques

[1] Certificat d'études de base, diplôme sanctionnant la fin de l'enseignement primaire.

(soit techniques, soit artistiques). La section de qualification abrite les humanités techniques et les humanités professionnelles. Dans le cadre de ce travail, nous allons cibler la section de transition, dans la catégorie « humanités générales ».

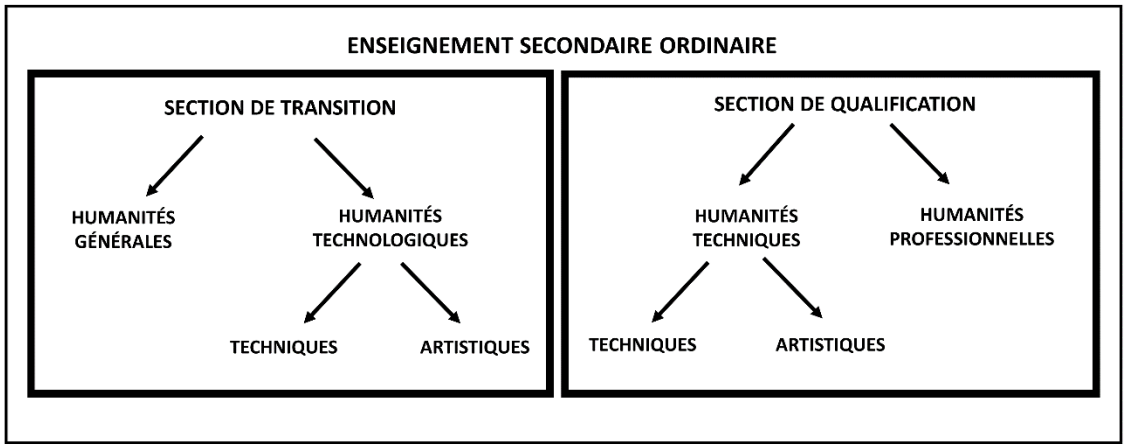


Figure 1. Structure de l'enseignement secondaire ordinaire en Belgique francophone (deuxième et troisième degrés).

En Belgique francophone, le réseau libre est le plus étendu pour ce qui concerne l'enseignement ordinaire dans sa totalité. Ainsi, en 2014-2015, l'enseignement libre subventionné accueillait 50 % des élèves, le réseau officiel subventionné 36 %, alors que le réseau de la FWB n'en comptait que 14 %. Dans l'enseignement secondaire ordinaire, le réseau libre subventionné accueillait même plus de la moitié des élèves (60 %)[2].

Dans le cadre de notre étude, nous ne considérons que deux réseaux d'enseignement : celui de la FWB et le réseau libre subventionné, au sein duquel nous ciblons le réseau libre catholique. La justification de ce choix est simple : en combinant ces deux réseaux, nous prenons en compte près de 90 %[3] des élèves fréquentant, en 2014-2015, les deuxième et troisième degrés de l'enseignement secondaire ordinaire de transition (humanités générales et technologiques – HGT). Or, c'est dans cette section que se situent principalement les élèves qui aborderont les concepts de chimie faisant l'objet de notre recherche, et qui continueront potentiellement des études à caractère scientifique. Cela dit, les conclusions de notre travail sont susceptibles d'informer et d'aiguiller les professeurs de sciences exerçant dans d'autres niveaux ou orientations, telle que l'orientation « techniques sciences » dans l'enseignement secondaire ordinaire technique et professionnel (humanités professionnelles et techniques – HPT).

[2] Fédération Wallonie-Bruxelles (2016). *Les indicateurs de l'enseignement 2016.* Administration générale de l'Enseignement, Service général du Pilotage du Système éducatif, Bruxelles [consulté le 11 juillet 2017] http://www.enseignement.be/index.php?page=0&navi=2264

[3] 60 % dans le réseau libre subventionné et 25 % dans le réseau de la FWB.

En tant que service du pilotage de l'enseignement, il appartient à la FWB de fournir des « référentiels de compétences et de savoirs requis » dans les disciplines constituant les différents niveaux d'enseignement (maternelle, primaire, secondaire). Sur cette base, chaque réseau doit proposer des programmes pour chaque discipline dans le niveau d'enseignement et l'orientation considérée. Ainsi, la Fédération de l'Enseignement Secondaire Catholique (FESeC) commande l'écriture de programmes pour le compte du réseau libre catholique subventionné.

Nous travaillons dans le cadre de deux référentiels de compétences et de savoirs requis valables pour les deuxième et troisième degrés, l'un publié en 2001[4], l'autre en 2014[5], par le service responsable à la FWB. Ces deux référentiels ont servi de cadres légaux à l'écriture des programmes spécifiques de chaque réseau. Nous parlons ainsi d'« anciens » programmes pour ceux qui ont été rédigés sur base du référentiel de 2001, et de « nouveaux » programmes pour ceux qui se rapportent au référentiel de 2014. Précisons aussi que, dans le réseau libre subventionné catholique, le programme de chimie varie en troisième année des humanités générales, selon l'orientation choisie par l'élève : « sciences de base » (trois périodes de sciences par semaine) ou « sciences générales » (cinq périodes de sciences par semaine). Dans le réseau de la FWB, ces orientations existent également, mais elles sont traitées différemment. L'« ancien » programme de chimie de troisième année est identique pour tous les élèves quelle que soit l'orientation choisie ; par contre, dans le « nouveau » programme, les contenus à enseigner sont différenciés selon l'orientation « sciences de base » ou « sciences générales ».

Enfin, nous abordons brièvement le contenu du référentiel commun et des programmes du premier degré en sciences. Le référentiel, appelée *Socles de compétences*, a été légèrement retouché en 2013[6] mais son contenu reste très proche de la version originale de 2000. Le premier chapitre explore le contenu de ces différents référentiels et programmes. Afin d'en rendre la lecture plus confortable, nous y rappelons certaines informations développées dans cette note préliminaire.

[4] FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2001). *Compétences terminales et savoirs requis en sciences*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.
[5] FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2014). *Compétences terminales et savoirs requis en sciences de base et en sciences générales*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.
[6] FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2013). *Socles de compétences*. Enseignement fondamental et premier degré de l'enseignement secondaire, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.

Chapitre 1

Transposition didactique de la symbolique chimique : analyse des programmes dans deux réseaux d'enseignement en Belgique francophone

Faute de pouvoir changer les élèves, il faut donc changer le savoir.

(Chevallard, 1982)

1.1. INTRODUCTION

La construction et l'interprétation de formules chimiques et d'équations de réaction constituent des objectifs majeurs de l'enseignement de la chimie dans le programme de l'enseignement général en Fédération Wallonie-Bruxelles. Installées dès la troisième année (enfants de 14-15 ans – grade 9), ces représentations symboliques vont être à la base de l'élaboration de nouveaux concepts et de nouvelles représentations dans la suite du cursus. Comme tout savoir à enseigner ou contenu de curriculum formel, la symbolique chimique se voit transformée lors de la transposition didactique. Dans ce chapitre inaugural, nous poursuivons un double but en utilisant ce cadre théorique.

Premièrement, nous souhaitons situer les formules chimiques et l'équation de réaction dans les programmes de chimie pris en compte dans le cadre de notre recherche. Il s'agit de préciser le rôle joué par l'enseignement-apprentissage de ces représentations dans le concert des autres concepts abordés. Nous abordons à la fois les concepts prérequis et les concepts vus dans la suite du cursus et dont les formules chimiques et les équations de réaction constituent une base de travail. Nous répondons ainsi à la question de recherche suivante : « Quels sont les objectifs associés à la symbolique chimique dans les curriculums relatifs à l'enseignement-apprentissage de la chimie dans deux réseaux d'enseignement en Belgique francophone ? »

Deuxièmement, à partir de la description des séquences impliquant la symbolique chimique dans certains programmes et manuels scolaires de chimie, ainsi que du cadre théorique de la transposition didactique, nous précisons dans quelle mesure la symbolique chimique à enseigner diffère de la symbolique chimique « savante ». Nous élargissons notre analyse en explorant certaines particularités de l'enseignement de la chimie en Fédération Wallonie-Bruxelles. Nous posons alors la deuxième question de recherche de ce premier chapitre : « Dans quelle mesure les concepts et les signes relatifs à la symbolique chimique sont-ils transposés dans les curricula visés en Belgique francophone ? »

1.2. LA SYMBOLIQUE CHIMIQUE DANS LES PROGRAMMES VISÉS

Nous limitons donc notre analyse aux curricula de l'enseignement libre catholique subventionné (réseau de la FESeC) et de l'enseignement organisé par la Fédération Wallonie-Bruxelles. La symbolique chimique étant absente des programmes de l'enseignement primaire, nous n'abordons pas ce niveau d'enseignement. De plus, nous axons prioritairement notre travail d'analyse sur les programmes de troisième année des humanités générales dans les deux réseaux d'enseignement, c'est-à-dire au début de l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique.

1.2.1. Premier degré de l'enseignement secondaire

Les programmes des deux réseaux diffèrent très peu du point de vue des concepts chimiques (FESeC, 2000 ; FWB, 2013a). Trois concepts y sont centraux : molécule, mélange, corps pur. Ils sont associés à l'exploration des propriétés macroscopiques des états de la matière. Le modèle moléculaire est utilisé :

- pour distinguer mélange et corps pur ;
- pour distinguer mélange homogène et mélange hétérogène ;
- pour représenter les états de la matière au niveau microscopique.

1.2.2. Troisième année des humanités générales – « ancien » programme du réseau libre catholique subventionné

La comparaison des programmes des élèves de sciences de base (que nous abrégeons en « Sb » — 3 périodes par semaine) et des élèves de sciences générales (abrégé en « SG » — 5 périodes par semaine) constitue notre point de départ. Nous avons résumé par le tableau 1 les concepts principaux repérés dans les deux curricula.

Dans les deux programmes, la description de la matière précède l'explicitation des transformations chimiques et leur modélisation par une équation de réaction (FESeC, 2009a, 2009 b). Cependant, on remarque que la description de la formule moléculaire apparaît dans le thème décrivant la structure de la matière en sciences de base (thème 1), alors qu'elle est abordée dans le thème sur la réaction chimique en sciences générales (thème 3). Cette position variable s'explique d'un point de vue didactique. La formule moléculaire véhicule la composition d'une substance en un langage symbolico-mathématique, ce qui servira de base, un peu plus tard, à la loi de conservation de la masse inscrite dans toute équation de réaction. Cette double facette descriptive et quantitative fait de la formule chimique un concept-pivot accompagnant la transition entre description de la matière et réactivité.

De plus, les deux programmes sont construits selon une structure différente, avec notamment un plus grand nombre de thèmes abordés en sciences générales. Le programme de sciences générales met en effet l'accent sur le passage du niveau

macroscopique au niveau microscopique via un dédoublement du premier thème : le premier sert de rappel du premier degré, le second explore le modèle atomique et ses conséquences.

Les objectifs d'apprentissage (appelés « développement attendus ») liés à la symbolique chimique sont associés à quatre grands concepts : les symboles chimiques, les formules chimiques, les équations chimiques et les fonctions chimiques. En passant en revue les objectifs des deux programmes associés aux quatre concepts ci-dessus, on relève deux différences de traitement.

D'une part, les programmes de sciences générales et de sciences de base diffèrent par une explicitation des étapes de construction et de raisonnement, plus développée en sciences de base. D'autre part, le programme de sciences générales se caractérise par un accent porté sur la rigueur langagière, mais n'explicite pas certains développements intermédiaires décrits en sciences de base. Illustrons ces différences par quelques exemples.

Les objectifs d'apprentissage associés au concept de « symbole chimique » sont communs en sciences générales comme en sciences de base. Ils découlent tous d'un objectif initial issu du premier degré : « représenter un corps pur ou un mélange comme des ensembles de "grains minuscules" appelés molécules ». Une fois cette molécule brisée par une électrolyse, il est possible de « distinguer les différents types de corps purs » (en sciences générales). La découverte de la représentation symbolique vérifie plusieurs objectifs : « représenter un atome par un symbole », « repérer le nom d'un atome à partir de son symbole dans le tableau périodique » et « traduire le symbole d'un ion en une phrase ».

Les attendus liés au concept de « formule chimique », en sciences de base, sont au nombre de quatre : « se représenter une molécule comme une combinaison fixe d'atomes » ; « représenter une molécule par une formule » ; « expliquer la signification des indices dans une formule moléculaire » et « construire une formule moléculaire à l'aide de valences ».

Par contre, en sciences générales, seul l'objectif de « représenter une molécule par une formule » est explicite, tous les autres sont tacites. Il semble que, pour les auteurs du programme de sciences générales, il soit inutile de multiplier les objectifs : le fait de représenter une molécule par une formule implique de facto de pouvoir combiner utilement indice et valence ainsi que de pouvoir en expliquer les rôles. Il y a donc bien explicitation des étapes de construction de la formule moléculaire en sciences de base.

Programme D1 (2000)	molécule – modèle – mélange – corps pur mélange homogène et hétérogène
Programme 3ème (2009a) — Sb	*Thème 1 : Structure de la matière* molécule – atome (jusque Rutherford) – symbolisme atomique métaux – non-métaux – ion – cation — anion formule moléculaire – valence – indice
	Thème 2 : La réaction chimique solvant – solution – soluté réaction chimique – réactifs – produits conservation de la masse – équation chimique et coefficient stœchiométrique
	Thème 3 : Les molécules de la chimie minérale acides – bases – sels – oxydes formules générales — équations de formation
Programme 3ème (2009 b) — SG	*Thème 1 : de la structure macroscopique de la matière à la molécule* solvant — solution – soluté — corps pur – molécule masse et concentration massique
	Thème 2 : De la molécule à l'atome et à l'ion corps purs composés – corps purs simples – atomes (jusque Rutherford) symboles atomiques – tableau périodique – métaux/non-métaux ions – cations – anions
	Thème 3 : Découverte de la réaction chimique transformation chimique – réaction chimique formule moléculaire équation chimique – réactif/produit – coefficient stœchiométrique
	Thème 4 : Classification des corps usuels oxydes – acides – sels – hydroxydes écriture et nomenclature des molécules usuelles

Tableau 1. Tableau récapitulatif des contenus des programmes de chimie du premier degré commun (2000) et de troisième année (2009a, 2009 b) en sciences de base et en sciences générales, extraits des sections « savoirs » (Humanités générales – réseau libre catholique). Les termes soulignés par l'auteur sont directement associés à la symbolique chimique.

Le concept d'« équation chimique » est étroitement lié aux formules chimiques, qui servent à « représenter une transformation chimique par une équation chimique » en sciences générales, ou à « traduire une réaction chimique par une équation chimique » en sciences de base. Il est à noter que les élèves en sciences générales doivent aussi « expliquer l'intérêt d'utiliser un langage spécifique », indice de l'accent particulier porté sur le langage en sciences générales. Pour pondérer[1] des équations chimiques, il faut « écrire les coefficients stœchiométriques corrects d'une équation chimique ». Cependant, seuls les élèves de sciences de base se voient imposé le fait d'« expliquer la conservation de la masse en montrant les réarrangements moléculaires lors de la réaction chimique », nouveau signe d'explicitation supplémentaire.

Le concept de « fonction chimique » est abordé dans le dernier thème, où la symbolique chimique sert « à établir la formule d'un composé usuel à partir de son nom et inversement ». En sciences générales, le langage chimique est de nouveau mis en évidence par deux développements supplémentaires. Les élèves doivent « repérer la fonction chimique à partir de la formule d'un composé usuel » mais aussi « appliquer de manière raisonnée les règles conventionnelles de nomenclature ».

1.2.3. Troisième année des humanités générales – « ancien » programme du réseau de la Fédération Wallonie-Bruxelles

L'ancien programme de troisième année dans le réseau de la FWB a la particularité de ne prévoir qu'une période de chimie, toutes orientations confondues (FWB, 2001b). Dans ce système, les élèves de sciences générales voient leurs périodes de physique et de biologie doublées en troisième année, puis leurs périodes de physique et de chimie doublées en quatrième année. Nous présentons dans le tableau 2 un récapitulatif des concepts à aborder dans ce programme.

[1] L'ajout (éventuel) de coefficients stœchiométriques dans une équation de réaction est appelé « pondération » des équations chimiques dans l'enseignement en Belgique francophone. Il est donc préféré, ici, aux autres termes comme « ajustement » ou « équilibrage » que l'on retrouve dans d'autres pays francophones ou sur le Web.

Programme 3ème (2001)	*Module 1 : Constitution de la matière : molécules et atomes* molécule – atome (modèle de Dalton) mélanges – corps purs métaux et non-métaux – réaction chimique équation nominative et « figurative »
	Module 2 : Lois massiques – Equations chimiques loi de Lavoisier – loi de Proust quantité de matière – masse – masse molaire – mole symbole chimique – indice formule brute – réactif – produit coefficient stœchiométrique – modèles moléculaires
	Module 3 : Les oxydes oxydes acides – oxydes basiques équation générale de formation et d'hydratation équation équilibrée – nombre d'oxydation nomenclature usuelle des oxydes
	Module 4 : Les acides, bases et sels qui nous entourent nomenclature des sels, acides et bases réaction de neutralisation équations générales – formules générales

Tableau 2. Tableau récapitulatif des contenus des programmes de chimie de troisième année (2001b) en sciences de base et en sciences générales, extraits des sections « notions » (Humanités générales – réseau de la FWB). Les termes soulignés par l'auteur sont associés directement à la symbolique chimique.

Si l'on compare le programme de chimie du réseau de la FWB et le programme de chimie du réseau libre catholique, de nombreuses et profondes divergences apparaissent :

- Dans le réseau de la FWB, le modèle atomique de référence est le modèle de Dalton pendant toute la troisième année. Le seul développement facultatif proposé est un modèle « en essaim d'abeilles » pour la fin du troisième trimestre. Il n'est donc pas possible, à ce stade, de construire des liens entre la composition de l'atome (en électrons, protons et neutrons) et le tableau périodique des éléments. De manière générale, le tableau périodique est d'ailleurs sous-utilisé par rapport à l'« ancien » programme du réseau libre catholique.
- La conséquence majeure de la prééminence du modèle de Dalton est le recours massif à ce que les auteurs de programme appellent les « modèles moléculaires ». La symbolique de Dalton (c'est-à-dire la représentation d'un atome par un cercle en deux dimensions, ou une sphère en trois dimensions) suffit en effet pour représenter la composition atomique des molécules.

- Certains aspects quantitatifs sont abordés dès la troisième année, via l'enseignement-apprentissage de la quantité de matière et des problèmes stœchiométriques simples (sans excès). Ceci constitue une différence fondamentale avec l'« ancien » programme du réseau catholique et le nouveau référentiel de 2014.
- Les équations chimiques sont abordées selon un processus très cadré qui part d'une équation nominative, évolue vers une équation figurative (c'est-à-dire avec des modèles moléculaires), intègre les formules chimiques, et termine, enfin, par une équation dite « équilibrée ». Ce processus n'a pas été conservé en l'état dans le nouveau référentiel de 2014.
- Enfin, la valence porte le nom de « nombre d'oxydation » (symbolisé N.O.), ce qui souligne la liberté conceptuelle et terminologique donnée aux auteurs de programmes d'avant le nouveau référentiel de 2014.

Le programme de chimie du réseau de la FWB présente des objectifs tout à fait spécifiques, difficilement comparables aux objectifs du programme de chimie du réseau libre catholique. Il ne prévoit par exemple pas de distinction de traitement (objectifs, contenus, compétences) entre les élèves en sciences générales et les élèves en sciences de base, en tout cas pour la troisième année. Nous proposons toutefois une tentative de mise en correspondance de ces documents sur base des quatre concepts liés aux objectifs à atteindre dans la cadre du cours de chimie.

Le concept de « symbole chimique » ne fait l'objet d'aucun objectif concret et spécifique. Après avoir distingué les mélanges et les corps purs, le premier module est axé sur une première représentation de la réaction chimique (distinguée du phénomène physique) à l'aide d'équations nominatives. Le symbole chimique semble intégré dans un objectif très ambitieux et général : « Traduire une réaction chimique par une équation chimique sous ses diverses représentations (modèles moléculaires, formules de structure et formules brutes) ».

Les « formules chimiques » ne sont pas non plus liées à aucun objectif particulier, si ce n'est celui de comprendre la « règle de formulation d'un composé (chiasme) ». Par contre, le concept est étendu par rapport aux programmes du réseau libre catholique. On trouve ainsi que les formules chimiques regroupent « formule particulière et formule générique, formule de structure et formule brute ». La volonté des auteurs de ce programme semble être que ces différents types de formules chimiques soient enseignés simultanément, avec le soutien des modèles moléculaires selon Dalton.

L'équation chimique est par contre centrale dans le programme de chimie du réseau de la FWB : elle peut être « nominative, moléculaire ou générale ». Un extrait du programme (FWB, 2001b, p. 28) montre une grande ambition concernant l'exploitation et la maîtrise du sens d'une équation chimique :

La compréhension des lois massiques d'une réaction suppose une traduction de l'équation sous diverses formes : l'équation nominative et le bilan des masses, la représentation à l'aide de modèles moléculaires, la formulation progressive (formule de structure puis formule brute), et enfin la traduction en quantité de matière qui relie le macroscopique au microscopique.

Enfin, comme dans l'ancien programme du réseau libre catholique, les formules chimiques sont reliées à la fois aux fonctions chimiques et aux termes de la nomenclature. Il s'agit d'« établir les formules des composés usuels et y associer les fonctions chimiques correspondantes » ainsi que d'« appliquer de manière raisonnée les règles conventionnelles de nomenclature. »

1.2.4. Troisième année des humanités générales – « nouveau » programme du réseau libre catholique subventionné

Le nouveau référentiel de compétences commun à tous les réseaux d'enseignement a généré des programmes beaucoup plus proches tant dans les intentions que dans les contenus (FWB, 2014). En effet, un des objectifs des auteurs du nouveau référentiel était de rapprocher les savoirs enseignés et les pratiques enseignantes dans tous les réseaux en précisant davantage les attendus. Par conséquent, nous nous limitons ici à décrire le nouveau programme de chimie du réseau libre catholique (en sciences de base et sciences générales), comme exemple de programme cadré par le nouveau référentiel (FESeC, 2014a, 2014b).

Dans le nouveau référentiel (et donc, dans le nouveau programme), les thèmes sont remplacés par des UAA, Unités d'Acquis d'Apprentissage, qui regroupent des processus (connaître, appliquer, transférer). Les UAA sont censées apporter précision et cohérence dans le processus d'enseignement-apprentissage, et plus particulièrement pour ce qui concerne les épreuves d'évaluation (FWB, 2014). Une UAA peut être divisée en plusieurs parties distinctes. Les contenus à enseigner issus des nouveaux programmes de sciences de base et de sciences générales, en troisième année, sont résumés au tableau 3. Nous avons modifié la présentation des nouveaux programmes, par rapport au tableau 1, car ils présentent une structure commune quelle que soit l'option : UAA identiques et contenus conceptuels très proches. Les concepts ajoutés en sciences générales sont indiqués en gras dans le tableau.

Programme 3ème (2014) Sb **SG**	UAA1 : Constitution et classification de la matière Partie 1 : Changement d'échelle **techniques de séparation** – molécule – atome solvant – solution – soluté – concentration massique espèce chimique – CPC/CPS – **incertitudes de mesure** Partie 2 : Du modèle atomique au tableau périodique métaux – non-métaux atome (jusque Bohr) – ion **– cation – anion** élément – symbolisme atomique – nomenclature atomique **isotopes** – Z/A/Ar – électronégativité – **noms des familles**
	UAA 2 : La réaction chimique – approche qualitative Partie 1 : Les substances chimiques indice – valence – fonctions chimiques (oxydes, acides, hydroxydes, sels) pictogrammes de danger — **indicateurs colorés** Partie 2 : Les équations chimiques transformation – réaction – équation coefficient stœchiométrique dissociation ionique – **modèle d'Arrhenius — électrolyse**

Tableau 3. Tableau récapitulatif des contenus des programmes de chimie de troisième année (2014) en sciences de base et en sciences générales, extraits des sections « Notions à voir » (Humanités générales – réseau libre catholique). Les termes soulignés sont associés directement à la symbolique chimique.

Le cours de chimie de sciences générales se démarque par l'accent mis sur l'expérimentation (d'où la présence des indicateurs colorés, de l'électrolyse ou des incertitudes de mesure dans les contenus à enseigner), ainsi que par une explicitation développée du concept d'élément. En effet, en sciences de base, on ne distingue pas le nombre de masse de la masse atomique relative. Pour obtenir le nombre de neutrons dans un noyau, les élèves doivent arrondir la masse atomique relative et l'utiliser comme nombre de masse. La conséquence est évidente : il n'existe qu'un nombre de masse par élément, le concept d'isotope est évacué. Nous discuterons plus loin de l'impact de ce choix programmatique sur le concept d'élément.

On remarque également que la symbolique chimique est introduite en deux temps. Dans un premier temps, l'UAA1 sert à poser les jalons en se limitant aux symboles atomiques. Dans un second temps, les formules moléculaires et les équations chimiques sont abordées respectivement pour décrire les substances chimiques et pour représenter les réactions chimiques. Notons enfin que les nouveaux programmes recourent systématiquement, et de façon explicite, aux niveaux macroscopique et microscopique[2],

[2] Pour une discussion sur les niveaux de savoir, voir chapitre 3.

introduisant les « objets macroscopiques » et les « objets microscopiques » ainsi qu'une circulation explicite entre les deux niveaux[3]. Les objectifs d'apprentissage liés à la symbolique chimique sont ici découpés en « processus ».

Pour satisfaire aux attendus liés au concept de « symbole chimique », les élèves des deux orientations doivent « modéliser un objet ou un matériau comme un ensemble de molécules ou d'atomes (lien macroscopique – microscopique) ». On remarque ici que les niveaux macroscopique et microscopique sont explicites dans le discours.

Concernant la symbolique chimique, les élèves doivent « connaitre les symboles des éléments rencontrés lors du cours de chimie (pas d'étude exhaustive) » en sciences générales, mais se limiter aux « 20 premiers éléments du tableau périodique des éléments plus ceux des métaux usuels » en sciences de base. Les ions sont abordés en fin d'UAA1 en demandant aux élèves d'« expliciter la composition d'un ion » et d'« illustrer le concept d'ion au travers d'une situation expérimentale ou quotidienne », mais rien n'est indiqué du point de vue de leur écriture symbolique.

Concernant le concept de « formule moléculaire », les élèves doivent, dans l'UAA1, « expliciter la composition d'une molécule ». On remarque ainsi que la formule moléculaire est décodée dans l'UAA1 et construite dans l'UAA2, ce qui sépare l'enseignement-apprentissage de l'indice de celui de la valence. En sciences générales, on trouve cette information langagière : « L'écriture d'une formule moléculaire respecte un ordre déterminé par l'électronégativité croissante des éléments concernés. Il existe cependant des exceptions comme pour NH_3 ou pour OH ». Cette précision n'est pas donnée dans le programme de sciences de base. Elle est pourtant importante pour comprendre les règles de notation.

La construction d'une formule moléculaire est commune aux deux orientations. Le processus est décrit en deux étapes : « Pour deux éléments composant une molécule, l'élève fait le lien entre leur famille "a" et leur valence ; puis, il établit la formule moléculaire par la méthode du chiasme ». Nous reviendrons un peu plus loin dans ce chapitre sur les méthodes de construction des formules moléculaires et leurs implications didactiques. On remarque qu'il n'est fait mention ici que de formules « moléculaires », expression qui regroupe tous les types d'entités composées d'éléments, réseaux ioniques compris.

Le concept d'« équation chimique » est abordé après la distinction entre transformation chimique et une « action de mélanger aboutissant à un mélange ». Les élèves doivent alors « décrire une transformation chimique sous forme d'une équation moléculaire ».

[3] Nous avons contribué, au moins en partie, à la mise en place de cette caractéristique du nouveau programme via une conférence donnée au Congrès des Sciences en 2012, avec le Pr. Philippe Snauwaert. Les « Clarifications conceptuelles » de l'UAA1, disponibles sur l'espace numérique du secteur sciences (FESeC) (Godts, 2017), découlent directement des informations présentées lors de cette conférence.

La pondération des équations chimiques ne fait pas l'objet d'un processus à part entière. Elle est tacitement liée au fait de « traduire en une équation chimique un phénomène chimique montré, expérimenté ou décrit ». Dans le nouveau programme, l'écriture d'une équation chimique est en fait le corollaire d'un objectif jugé plus important : l'identification d'un type de réaction chimique (combustion, neutralisation, dissociation ionique, etc.).

Enfin, avant d'aborder les « fonctions chimiques », précisons que la maîtrise des règles de nomenclature des principaux corps minéraux a été déplacée, dans le nouveau programme, de la troisième à la quatrième année (dans l'UAA3)[4]. Il en ressort que la formule chimique n'est plus connectée à un terme de nomenclature en troisième année ; elle est plutôt liée à une fonction chimique, comme dans le processus « associer une formule chimique à une fonction chimique ».

Le nouveau programme de chimie, pour les deux réseaux, instaure donc une plus grande proximité entre les deux orientations sciences générales et sciences de base. Il implante définitivement la triade transformation chimique/réaction chimique/équation chimique, ce qui affine le rôle de la symbolique chimique. Deux changements majeurs concernent les formules chimiques. Premièrement, leur décomposition et leur composition se trouvent dans deux UAA différentes. Deuxièmement, les formules chimiques sont déconnectées des règles de la nomenclature, abordées formellement en quatrième année.

1.2.5. Discussion intermédiaire

En conclusion de cette description des anciens et nouveaux programmes de chimie en troisième année des humanités générales dans les deux principaux réseaux d'enseignement en Belgique francophone, trois constats émergent et doivent être pris en compte pour une étude efficace des difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique.

Premièrement, le nouveau référentiel tend à unifier deux programmes très différents tant dans leur contenu que dans leurs intentions. La source de cette divergence se trouve sans doute dans un manque de cadre, qui induit une trop grande marge interprétative laissée aux auteurs des programmes. En effet, l'ancien référentiel terminal de compétences listait l'ensemble des attendus de chimie de la troisième à la sixième année, mais il ne fournissait pas de liste d'attendus spécifiques pour la troisième année (2001a). Le résultat de cette latitude est la production de deux programmes qui proposent un phasage différent des objectifs du référentiel « commun ». Le nouveau référentiel, lui, propose des processus précis associés à des unités d'acquis

[4] L'UAA3 a pour titre : « La réaction chimique – approche quantitative ». La présence de la nomenclature des fonctions usuelles dans cette UAA ne laisse pas d'interroger les professeurs et formateurs, vu son caractère hautement qualitatif.

d'apprentissage, elles-mêmes incluses dans une année spécifique d'enseignement. La planification issue de l'ancien programme du réseau libre catholique (2009a, 2009 b) semble avoir servi de base à l'élaboration du nouveau référentiel commun. Celui-ci innove également en reléguant l'enseignement-apprentissage des règles de nomenclature en quatrième année.

Deuxièmement, les « anciens » programmes de chimie des deux réseaux sont les témoins de visions très différentes de la symbolique chimique. Dans le réseau libre catholique, elles s'inscrivent dans un usage de la symbolique au niveau microscopique et pour des informations qualitatives, alors que, dans le réseau de la FWB, la symbolique chimique est plutôt utilisée au niveau macroscopique et pour des informations plus quantitatives (même si le recours aux modèles moléculaires renforce l'aspect microscopique). Cette dualité apparente cristallise la tension qui sous-tend l'usage de la symbolique chimique. Il n'y a en effet pas lieu de choisir : la symbolique chimique opère à la fois au niveau microscopique et au niveau macroscopique, aussi bien qu'elle donne des informations qualitatives et quantitatives. Le fait d'accentuer l'un ou l'autre de ces aspects dans un programme d'enseignement constitue un choix délibéré et souvent motivé des auteurs de programme :

- soit décrire en profondeur la constitution atomique et moléculaire de la matière sans aborder les problèmes stœchiométriques (comme dans les anciens et les nouveaux programmes du réseau libre catholique), auquel cas la symbolique chimique traduira cet objectif en informant essentiellement d'un point de vue quantitatif et qualitatif au niveau microscopique ;
- soit résoudre des problèmes numériques stœchiométriques sur base des équations chimiques sans aborder la composition atomique (comme dans l'ancien programme du réseau de la FWB), auquel cas la symbolique chimique véhiculera en priorité des informations quantitatives au niveau macroscopique.

Troisièmement, l'étude de ces programmes met en évidence une diversité langagière entourant la symbolique chimique, et le vocabulaire y afférant. L'ancien programme du réseau de la FWB cite, pour la troisième année, différentes dénominations de formules chimiques (formules générales, formules brutes, formules de structure, formules moléculaires, formules particulières) et d'équations chimiques (équation nominative, équation figurative, équation générale, équation moléculaire). Chaque terme est associé à des règles particulières de représentation. Par exemple, une formule générale d'un corps minéral (MX, HXO, MOH, etc.) ne comporte pas d'indice, ce qui implique qu'une équation générale n'a pas à être pondérée[5]. Cette diversité de dénominations et de représentations ne se retrouve pas dans l'ancien programme du réseau libre catholique ainsi que dans les nouveaux programmes. Dans le nouveau référentiel, la « formule

[5] Par exemple, l'équation générale de combustion des métaux s'écrit : $M + O_2 \longrightarrow MO$.

moléculaire » devient le synonyme de « formule chimique », qu'elle remplace d'ailleurs dans bon nombre de processus[6]. De plus, dans les nouveaux programmes, l'équation chimique est par nature « moléculaire », et ce d'autant plus que les équations nominatives et les équations figuratives sont absentes de ces programmes[7]. Seules les formules et équations générales sont conservées, mais elles sont limitées à une étape d'un processus particulier : il faut passer par la formule générale pour relier une formule chimique à une fonction chimique.

Cette réduction sémantique et terminologique n'est pas sans conséquences didactiques. Elle trouve sa source dans le processus de transposition didactique, dont les rouages conceptuels du cadre théorique doivent être décrits.

1.3. CADRE THÉORIQUE DE LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE

La théorie de la transposition didactique apparaît en sociologie, dans le travail de Verret (1975). Celui-ci tente de décrire un phénomène général : toute transmission des savoirs nécessite une mise en forme pour rendre les savoirs accessibles et susceptibles d'être appris. La transposition didactique, telle que vue par Verret, ne constitue pas une dénaturation nécessairement dommageable du savoir, mais bien un passage obligé qui a des incidences sur le savoir à enseigner. La transposition didactique n'est ainsi « ni bonne, ni mauvaise » (Chevallard, 1985/1991) ; elle est normale dans le cadre de la transmission d'un savoir.

La transposition didactique est « un processus complexe influencé par de nombreux facteurs qui a comme point de départ l'ensemble du savoir scientifique et comme point final l'ensemble des connaissances acquises par les élèves » (Paun, 2006). Elle est encore définie dans l'ouvrage de référence de Chevallard (1985/1991) comme « le travail qui d'un objet de savoir à enseigner fait un objet d'enseignement ». La figure 1 permet de représenter les différentes étapes de ce processus.

[6] Par contre, le nouveau programme de FWB (2015b) propose une note de bas de page qui distingue les deux concepts à destination du professeur : « L'expression "formule chimique" s'applique à tous les corps purs tandis que l'expression "formule moléculaire" est uniquement réservée aux corps purs de type covalent. Elle ne s'applique donc pas aux corps ioniques ». Cette distinction explicite n'est pourtant pas prise en compte dans la suite du programme de troisième année. Les expressions « lecture moléculaire » et « équation moléculaire » sont appliquées à toutes les substances et réactions quel que soit le type de liaisons impliquées.

[7] À l'exception du nouveau programme de FWB (2015a) qui ajoute deux développements qui impliquent l'utilisation d'équations nominatives et de représentations iconiques (appelées « modèles moléculaires » dans le programme). Ces développements ne sont pas prescrits dans le référentiel commun, ce qui souligne qu'un référentiel plus cadrant ne suffit pas toujours à empêcher les divergences programmatiques entre réseaux.

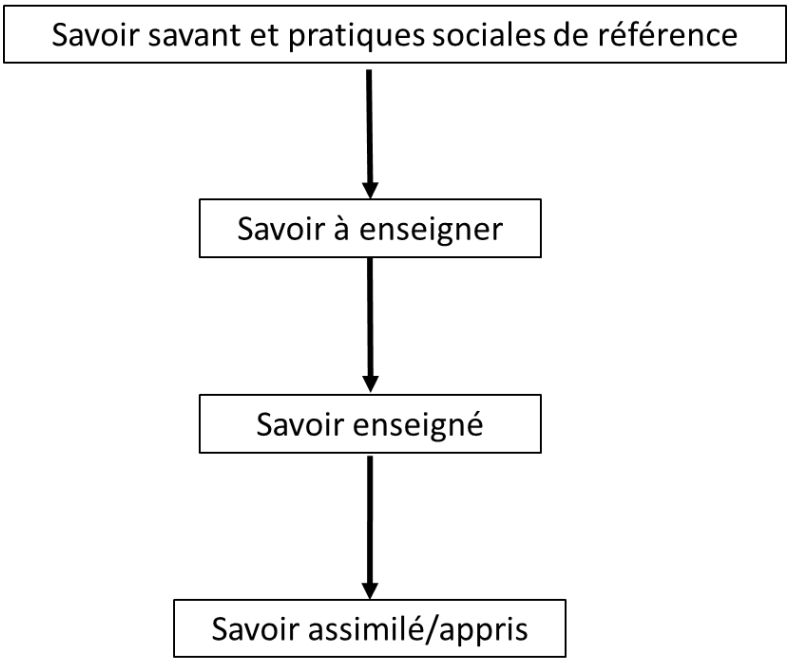


Figure 1. Schéma de principe de la transposition didactique (d'après Perrenoud, 1998).

En premier lieu se trouvent les savoirs savants[8] et les pratiques sociales de référence (Martinand, 1986). Les savoirs savants sont les savoirs du spécialiste du domaine[9]. Par exemple, en chimie, les concepts de molécule, d'atome, d'orbitale ou de réaction chimique constituent le savoir savant, en y ajoutant les différents savoir-faire (notamment expérimentaux), les symboles et les nomenclatures. Les pratiques sociales de référence constituent des activités non-didactiques (dépourvues d'intention didactique) dans lesquelles un certain objet de savoir fonctionne. En chimie, c'est le cas des activités liées à la recherche ou à la réalisation concrète de produits chimiques dans les industries : synthèse organique, titrage, modélisation, recherche bibliographique, étude épistémologique, etc. Ces deux ensembles sont bien entendu en résonance constante, les savoirs savants s'insérant dans les pratiques sociales de référence, et les pratiques sociales de référence produisant de nouveaux savoirs savants.

À partir de ces ressources de base, la transposition didactique passe par trois étapes distinctes (Perrenoud, 1998, p. 488) :

> La première flèche représente la transformation des savoirs et des pratiques en programmes scolaires, qu'on peut aussi appeler curriculum formel ou prescrit.

[8] En corollaire aux savoirs savants, Johsua (1996) introduit le concept de « savoir expert », ensemble de connaissances partagées par des praticiens et non par des chercheurs. Les savoirs experts sont typiques d'activités techniques, artistiques ou sportives. Ils sont jugés sur leur efficacité pratique plutôt que via une éventuelle validation théorique. Il est à noter que certains savoirs enseignés par les formateurs d'enseignants sont plus proches des savoirs experts que des savoirs savants.

[9] La source-même des savoirs savants constitue une problématique dans le champ des didactiques. Nous allons considérer, dans le cadre de cet ouvrage de thèse, que les livres de référence universitaires et les différentes contributions de l'IUPAC peuvent être admis comme des sources de savoirs savants.

> C'est ce que Chevallard a nommé la transposition didactique externe. La seconde flèche figure la transformation des programmes en contenus effectifs de l'enseignement. C'est la transposition interne, qui relève largement de la marge d'interprétation, voire de création des enseignants. Chez Chevallard, la chaîne se limite au parcours des savoirs de l'état de savoirs savants à l'état de savoirs à enseigner (transposition externe), puis de l'état de savoirs à enseigner en savoirs enseignés (transposition interne). La troisième flèche figure le processus d'apprentissage, d'appropriation, de construction des savoirs et des compétences dans l'esprit des élèves. Qu'il y ait là une étape nouvelle et décisive dans le parcours du savoir et de la culture, nul n'en doute. On peut en revanche débattre de l'à-propos d'inclure cette dernière étape dans le processus de transposition didactique proprement dit.

La première transposition didactique, dite transposition didactique externe, consiste donc en le passage entre savoirs savants et savoirs à enseigner. Autrement dit, le savoir à enseigner représente une « scolarisation » du savoir savant, objectivé dans une programmation des expériences formatives significatives qui feront l'objet du processus d'enseignement et d'apprentissage à l'école (Paun, 2006). Ces objectifs planifiés sont produits par les concepteurs de programmes. Dans une certaine mesure, les auteurs de manuels ou d'outils méthodologiques peuvent également être catégorisés comme réalisateurs de transposition didactique externe, en ce qu'ils considèrent un élève lambda, moyen, fictif, sans prendre en compte les représentations réelles (et, par définition, variables d'un individu à l'autre en fonction du contexte) des apprenants. Plus généralement, Chevallard parle de « noosphère » (littéralement, « ensemble de ceux qui pensent »), terme parodique qui décrit l'ensemble des intervenants qui influencent le système éducatif, et qui participent donc à la transposition didactique externe.

Les savoirs prescrits sont parfois très différents des savoirs savants car ils doivent s'inscrire dans les contraintes de l'enseignement, ce qui nécessite des transformations importantes. Verret (1975) cite cinq grandes transformations :

1) la désyncrétisation : le savoir à enseigner est structuré en champs de savoir distincts. Dans l'enseignement de la chimie, l'écriture des équations redox forme ainsi un morceau de savoir à enseigner, découpé et séparé du champ d'application (ou de recherche) des réactions d'oxydo-réduction en industrie ou à l'université ;
2) la dépersonnalisation : le savoir à enseigner est rendu indépendant des personnes qui l'ont produit ou des personnes qui l'utilisent au quotidien. En chimie, un certain nombre de personnages illustres ont donné leur nom à une loi, une symbolique, un principe. Cependant, si leur nom est conservé, le contexte, les motivations réelles, voire même les véritables propos des auteurs sont souvent éliminés de l'enseignement ou modifiés pour celui-ci ;

3) la programmation : le savoir à enseigner doit s'intégrer dans un programme, un chemin d'apprentissage logique qui respecte le développement cognitif de l'apprenant et la succession des prérequis. Par exemple, le concept d'isotope ne peut se comprendre que si le concept de neutron a été abordé ;
4) la publicité du savoir : le savoir à enseigner est inscrit dans des référentiels et programmes publics qui lui confèrent le statut d'objectif officiel d'apprentissage ;
5) le contrôle des acquisitions : le savoir à enseigner doit être évaluable, de manière à pouvoir contrôler et réguler les apprentissages. En chimie, la pondération des équations chimiques constitue un savoir à enseigner évaluable par lui-même, indépendamment d'autres savoirs à enseigner.

En plus de ces cinq transformations, il est aussi nécessaire de décontextualiser le savoir savant de son espace de référence pour pouvoir le contextualiser dans un espace pédagogique. Cela passe, par exemple, par une simplification du modèle scientifique de référence (Paun, 2006). Ainsi, en chimie, le concept d'atome est dans un premier temps simplifié : il est réduit au modèle de Dalton. Il est ensuite rendu progressivement plus complexe jusqu'à l'enseignement supérieur qui présente le modèle orbitalaire actuel. Il est important de ne pas vider le concept de ses caractéristiques essentielles ou de le transformer trop profondément, mais de montrer les limites des modèles ainsi « réduits ». Cela permet également à l'élève de s'investir dans la construction du savoir : partir d'un concept « incomplet » suppose une réflexion progressive qui aboutira à la mise en place d'un concept plus proche du savoir savant.

Au cours de la transposition didactique externe, on rencontre également des transpositions terminologiques. Dans ce cas, un mot est souvent créé ou modifié pour porter un concept : c'est le cas, en chimie (en FWB), du modèle de Rutherford-Chadwick. Ce cas spécial mérite que l'on s'y attarde, car il est proche de ce que Chevallard (1985/1991, p. 39) appelle une « création didactique ». Celle-ci est suscitée par les « besoins de l'enseignement » : elle est créée dans l'école, par l'école et pour l'école. Chervel (1988) développe le concept de « création didactique » et pose l'hypothèse que les savoirs savants ne sont ainsi ni la source, ni la finalité des disciplines scolaires et des savoirs à enseigner (Reuter *et al.*, 2013).

Le modèle de Rutherford-Chadwick[10] s'inscrit dans l'évolution transposée du modèle atomique à travers l'histoire de la chimie. Dans les programmes (anciens et nouveaux), il se place entre le modèle de Rutherford et le modèle de Bohr (figure 2).

[10] Actuellement, le modèle de Rutherford-Chadwick apparaît dans le référentiel commun et dans tous les programmes de chimie abordant l'histoire du modèle atomique, tous réseaux confondus, en Belgique francophone.

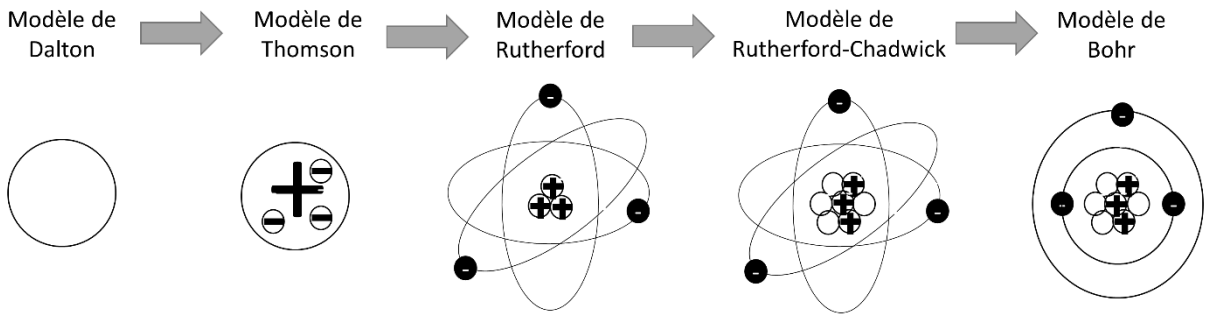


Figure 2. Schéma de l'évolution du modèle atomique selon le nouveau référentiel (d'après FWB, 2014).

Or, ce modèle n'existe tout simplement pas dans le savoir savant. Lorsque Chadwick découvre expérimentalement le neutron en 1932, Schrödinger et Heisenberg ont déjà proposé le modèle orbitalaire de l'atome, dépassant ainsi les modèles atomiques de Rutherford et de Bohr. Il est par conséquent logique qu'il n'y ait jamais eu de publication scientifique présentant un modèle « de Rutherford-Chadwick ».

Pourquoi une telle création didactique, dès lors ? Deux explications peuvent être proposées. Premièrement, le modèle de Rutherford-Chadwick complète la composition du noyau de l'atome en ajoutant les neutrons, ce qui permet d'aborder le concept d'isotope sans se soucier de la position réelle des électrons. En travaillant dans un modèle classique, le professeur évite les complications amenées par la quantification de l'énergie, à la base du modèle de Bohr. Deuxièmement, un point épistémologique soutient la vraisemblance d'un modèle de Rutherford-Chadwick : le second a découvert le neutron sous l'autorité du premier au Laboratoire Cavendish à Cambridge. Ce lien de mentor à disciple suppose une collaboration effective qui soutiendrait l'idée d'un modèle à leurs deux noms.

Bref, une création didactique se veut différente d'un produit d'une transposition didactique classique en ce qu'elle s'éloigne considérablement du savoir savant (sans en être totalement déconnecté) et qu'elle répond à un besoin spécifique dans le processus d'enseignement-apprentissage.

Nous n'aborderons pas ici les caractéristiques théoriques de la transposition didactique interne (passage du savoir à enseigner au savoir enseigné) ni du travail de modification à la charge des élèves (passage du savoir enseigné au savoir assimilé), même si ces transpositions jouent également un rôle dans l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique. Par contre, nous relierons plus loin certains phénomènes observés à ces transpositions particulières.

Dans la section suivante, nous allons montrer dans quelle mesure la symbolique chimique enseignée a subi une transposition didactique externe et/ou fait l'objet de créations didactiques. Nous nous servirons de l'analyse des programmes de chimie

présentés au début de ce chapitre, ainsi que de dispositifs didactiques et de définitions proposés dans les manuels scolaires mettant en œuvre ces programmes.

1.4. TRANSPOSITION DE LA SYMBOLIQUE CHIMIQUE

La transposition didactique est un processus inévitable dans toute transmission des savoirs. La symbolique chimique ne déroge pas à la règle. On retrouve en effet, en première analyse des sources officielles disponibles, les modifications proposées par Verret, ainsi que des créations didactiques telles que développées par Chervel. Nous commencerons par décrire les simplifications de deux concepts de référence (la molécule, la transformation chimique). Puis, nous enchaînerons par l'explicitation de trois processus de désyncrétisation (liés à la molécule, au coefficient, à l'indice). Ensuite, nous développerons une création didactique particulière, et nous terminerons enfin par la mise en évidence d'une certaine terminologie didactique repérable dans le corpus visé.

1.4.1. Une simplification du modèle de référence

1) Simplification du concept de molécule

Le concept de molécule est particulièrement concerné par la simplification du modèle de référence dans la discipline. Il faudrait une thèse entière pour traiter les variantes épistémologiques et didactiques du concept de molécule tant il semble inspirer des débats entre scientifiques (et entre professeurs) de toutes les époques. Nous retiendrons deux définitions de la molécule dans les programmes et manuels scolaires visés, qui engendrent des conséquences didactiques d'importance.

Dans les *Socles de compétences*, référentiel pour le premier degré commun, la molécule est initialement définie comme une « bille symbolisant la limite de la divisibilité de la matière » (FWB, 2013b). Cette définition est très éloignée du concept « savant » de molécule. Dans le *Dictionnaire de chimie* (de Merten, 2013), on lit en effet que la molécule est « une entité chimique formée d'atomes liés par des liens covalents, neutre et de dimension limitée ». On voit que ni la neutralité électrique (par opposition aux ions), ni la taille réduite (par opposition aux macromolécules), ni la nécessaire covalence des liaisons intramoléculaires (par opposition aux réseaux ioniques) n'ont été retenues pour construire le concept de molécule à enseigner au premier degré.

Ce choix programmatique est une réponse à une série de contraintes : prérequis des élèves, concepts abordés dans la même année scolaire, représentation des molécules. La « molécule-bille » est, de fait, pertinente pour représenter des états de la matière, pour figurer la diffusion d'un gaz ou pour distinguer les deux composants d'un mélange homogène. Mais la plus importante des contraintes est sans doute le choix assumé de définir le concept de molécule avant le concept d'atome, reporté en troisième année en

humanités générales. Il en ressort que la molécule doit d'abord jouer le rôle d'unité de base « incassable » de la matière, en négligeant les particules submoléculaires, alors que la définition savante de la molécule nécessite de se référer à sa composition atomique (nombre d'atomes, charge, types de liaisons). Mais le passage de la « molécule-bille » à l'« atome-bille » en troisième année se révèle compliqué, les élèves éprouvant des difficultés à briser une unité de matière pour en constituer une autre partageant de surcroît la même représentation iconique (un cercle en deux dimensions, une sphère en trois dimensions). Une certaine confusion entre molécule et atome peut naître à ce moment précis du processus d'enseignement-apprentissage en chimie[11].

La succession molécule-atome-molécule dans le programme se termine par une redéfinition tacite de la molécule comme un « assemblage d'au moins deux atomes », explicitée par certains manuels scolaires, mais absente des programmes (Pirson *et al.*, 2015). En l'état, cette définition est correcte du point de vue du savoir savant : un assemblage de deux atomes présuppose des liaisons covalentes. Cependant, dans la suite des programmes et dans les manuels, il apparaît que, plus qu'un assemblage d'au moins deux atomes, la molécule est présentée comme un assemblage d'au moins deux *éléments*. La confusion élément/atome se trouve ainsi à la base d'une redéfinition élargie de la molécule. Il est bien question ici d'une généralisation simplificatrice du concept de molécule : tout assemblage d'élément est assimilable à une molécule, et ce quel que soit le type de liaisons ou le nombre d'éléments impliqués.

Cette simplification du modèle de référence a trois conséquences sur la symbolique chimique, observables dans le nouveau programme de chimie de troisième année. Premièrement, si tout assemblage est moléculaire, alors toute formule chimique est moléculaire également. On peut donc parler de molécule de chlorure de sodium sans que ne se pose aucun problème conceptuel : la molécule de « NaCl » est un assemblage de deux éléments différents. Deuxièmement, si toute formule chimique est moléculaire, on peut appliquer à toute équation chimique une « lecture moléculaire ». Ainsi, si l'on considère l'équation de réaction de neutralisation du chlorure d'hydrogène par l'hydroxyde de sodium ($HCl + NaOH \longrightarrow NaCl + H_2O$), il est possible de la lire comme suit : « une molécule de chlorure d'hydrogène et une molécule d'hydroxyde de sodium réagissent pour former une molécule de chlorure de sodium et une molécule d'eau ». Troisièmement, à une signification unique de la formule chimique sont associées une signification unique de l'indice (nombre d'atomes dans une molécule) et une signification unique du coefficient stœchiométrique (nombre de molécules).

[11] Pour les difficultés rencontrées par les apprenants dues à une confusion entre atome et molécule, voir les chapitres 2, 5 et 7 à 9.

2) Simplification du concept de transformation chimique

En plus de la simplification du concept de molécule et de ses conséquences, il est intéressant de noter également une limitation des caractéristiques de la transformation chimique et son influence sur les flèches de réaction. En effet, au début de l'enseignement-apprentissage de la chimie, toute transformation chimique (et donc a fortiori toute réaction chimique) est complète. Plus encore, la transformation chimique est même présentée comme irréversible, par opposition à une dissolution ou à un changement d'état. Plus loin dans le nouveau curriculum (UAA7, c'est à dire en début de cinquième année en option « sciences générales »), le concept d'équilibre chimique modifie considérablement la situation : la plupart des transformations chimiques ne sont pas complètes. Le choix des flèches de réaction entre réactifs et produits suit la trame conceptuelle du curriculum. En troisième et quatrième années, la simple flèche de réaction à double pointe (⟶) est la seule flèche de réaction prise en compte dans les programmes. Ensuite, la double flèche à simples pointes (⇌) est introduite dans la foulée de la définition de l'équilibre chimique dans l'UAA7. Aucune autre flèche de réaction ne viendra enrichir, dans les programmes de l'enseignement secondaire en Belgique francophone, le panel des représentations possibles dans une équation chimique.

Pourtant, dans *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* (IUPAC, 2007), des auteurs internationaux proposent quatre symboles différents dont ils cadrent l'usage dans une équation de réaction (figure 3) :

Niveau MICROSCOPIQUE

$H + Br_2 \longrightarrow HBr + Br$	Une étape élémentaire dans la formation de HBr
$H_2 + Br_2 = 2\,HBr$	Ensemble de réactions élémentaires

Niveau MACROSCOPIQUE

$H_2 + Br_2 = 2\,HBr$	Équation stœchiométrique
$H_2 + Br_2 \longrightarrow 2\,HBr$	Réaction dans une seule direction
$H_2 + Br_2 \leftrightarrows 2\,HBr$	Réaction dans deux directions – réaction réversible
$H_2 + Br_2 \rightleftharpoons 2\,HBr$	Réaction menant à un état d'équilibre

Figure 3. Usage et signification des flèches de réaction et du signe « = » (d'après IUPAC, 2007).

1) Le signe « = » est toléré, soit pour décrire « la somme de plusieurs réactions élémentaires » (associée au niveau microscopique), soit pour décrire une « équation stœchiométrique » (associée au niveau macroscopique) rendant compte uniquement de la pondération correcte de l'équation. Dans l'enseignement en Belgique francophone, le signe « = » est proscrit de l'écriture d'une équation de réaction dans tous les programmes présentés.
2) La flèche à double pointe (⟶) est réservée à la description d'une réaction élémentaire ou d'une réaction s'opérant dans une seule direction, respectivement au niveau microscopique et au niveau macroscopique.
3) La double flèche à doubles pointes (⇆) sert à représenter une réaction réversible au niveau macroscopique, c'est-à-dire qui peut s'opérer dans les deux directions.
4) La double flèche à simples pointes (⇌) représente une réaction chimique qui atteint un état d'équilibre, au niveau macroscopique.

Deux des signes cités ci-dessus sont absents des savoirs à enseigner dans l'enseignement secondaire en Belgique francophone : le signe « = » et la double flèche à doubles pointes (⇆). Pourquoi ce choix de ne pas en tenir compte ? D'une part, le signe « = » est clairement éliminé afin de distinguer au mieux l'équation chimique d'une équation mathématique. D'autre part, la double flèche à doubles pointes se révèle inutile puisque la réaction réversible est, dans le nouveau programme du troisième degré, définie comme « une réaction qui a atteint un état d'équilibre dynamique » (FESeC, 2016, p.76). La réaction réversible et la réaction incomplète étant confondues, un seul symbole est nécessaire et le choix des auteurs s'est porté sur la double flèche à simples pointes (⇌). Notons enfin que le concept de « réaction élémentaire » est absent des programmes de chimie, ce qui diminue encore l'étendue des types de réactions, et donc de notations symboliques disponibles pour l'apprenant.

Restreindre les significations (et le nombre) des symboles représente une contrainte didactique nécessaire au début de l'apprentissage de la chimie, mais ce choix se double souvent d'une restriction importante des concepts (molécule, réaction chimique, coefficient) représentés par ces symboles. Il appartiendra ainsi aux professeurs des années postérieures d'enrichir en significations et en nombre d'acceptions les symboles et concepts initialement présentés comme univoques.

1.4.2. Une désyncrétisation forcée

La désyncrétisation est une modification essentielle dans le processus de transposition didactique. Même si les savoirs savants en chimie sont déjà divisés en champs et en domaines distincts, leur transformation en savoirs à enseigner nécessite une subdivision encore plus fine. Nous allons développer trois exemples concrets provenant de l'analyse des programmes évoqués dans la première partie de ce chapitre.

1) Désyncrétisation liée au concept de molécule

Le premier exemple concerne le concept de molécule déjà abordé précédemment. La simplification du modèle de référence est en partie provoquée par la désyncrétisation du modèle moléculaire en lui-même. En effet, le concept de modèle moléculaire, et donc de molécule, apparaît dans un thème vu en première année commune de l'enseignement secondaire. Il est alors connecté aux états de la matière, ainsi qu'aux mélanges et aux corps purs dont ils aident à la représentation au niveau microscopique. Par contre, on compte pratiquement deux ans d'écart entre l'enseignement initial du concept de molécule et l'enseignement du modèle atomique (UAA1 dans le nouveau programme de troisième année en humanités générales). Déconnecté du modèle atomique, le concept de molécule doit donc être transformé pour convenir à une seule utilisation en tant qu'outil de représentation d'objets macroscopiques (glace, mélange eau-huile, etc.). Il faut encore attendre deux ans de plus pour que les élèves soient initiés aux liaisons chimiques (UAA5). C'est précisément parce que le concept de molécule est fortement déconnecté de l'explicitation des liens qui existent entre les atomes et ions, qu'il peut englober tous les assemblages d'éléments. La planification programmatique a donc une influence décisive dans les transformations des significations données au concept de molécule. Tout se passe comme si ce concept s'adaptait au fur et à mesure de l'élaboration du réseau conceptuel, constituant ainsi une fondation essentielle mais mouvante de l'édifice construit par les élèves. Il n'est dès lors pas surprenant d'observer que certains élèves s'arrêtent à l'une ou l'autre définition du concept de molécule rencontrée dans le cursus, sans intégrer les connaissances postérieures (Taber et Coll, *in* Gilbert *et al.*, 2002).

2) Désyncrétisation liée au coefficient stœchiométrique

Un deuxième exemple concret est lié aux significations que les élèves prêtent au coefficient stœchiométrique dans une équation de réaction. On a vu que les deux anciens programmes de troisième année des humanités générales, issus des deux réseaux principaux en FWB, présentent deux découpages très différents. Plus particulièrement, le coefficient stœchiométrique se voit associé à des thèmes ou modules qui modifient considérablement sa définition et son utilisation par les élèves. Dans l'ancien programme du réseau libre catholique, le coefficient est intégré au thème sur la réaction chimique, dans le but de pondérer une équation de réaction. Dans ce contexte, il peut être défini comme un « chiffre précédant une formule moléculaire ou un symbole atomique » (Pirson *et al.*, 2015). Mais sa fonction est également limitée : le coefficient stœchiométrique indique le nombre de molécules ou d'atomes qu'il faut prendre en compte dans une équation pour la pondérer. Cette restriction au seul niveau microscopique est d'autant plus importante qu'elle exclut une autre fonction du coefficient stœchiométrique, c'est-à-dire celle d'indiquer une proportion, un ratio

réactionnel entre réactifs, mais aussi entre réactifs et produits. L'usage du coefficient en tant que proportion dans un problème stœchiométrique est postposé d'une année, dans le thème 2 du programme de chimie de quatrième année (FESeC, 2009a, 2009b). Ajoutons également que le coefficient stœchiométrique est présenté comme un chiffre pour pondérer, un paramètre à ajuster dans un algorithme visant à obtenir le même nombre de symboles communs de part et d'autre de la flèche. Ce statut éminemment symbolico-mathématique s'inscrit dans la mise en place d'un langage spécialisé au début de l'enseignement-apprentissage de la chimie.

Dans l'ancien programme de troisième année du réseau de la FWB, l'intention est tout autre : le coefficient est intégré dans un chapitre consacré aux lois massiques et à une initiation à la stœchiométrie. La désyncrétisation est ici beaucoup moins franche. En effet, en plus de la signification microscopique proposée comme dans le programme de troisième année du réseau libre catholique, le coefficient se voit investi de deux rôles supplémentaires dans la résolution de problèmes stœchiométriques simples : il indique une proportion de réaction, mais aussi des quantités de matière dans certaines lectures de l'équation chimique. Ainsi, on peut lire l'équation de réaction de neutralisation du chlorure d'hydrogène par l'hydroxyde de sodium ($HCl_{(aq)} + NaOH_{(aq)} \longrightarrow NaCl_{(aq)} + H_2O_{(l)}$) selon une lecture dite « molaire » : « Une mole de chlorure d'hydrogène et une mole d'hydroxyde de sodium réagissent pour former une mole de chlorure de sodium et une mole d'eau ». Une lecture impliquant des proportions est aussi possible : « Une quantité donnée de chlorure d'hydrogène réagit avec la même quantité d'hydroxyde de sodium pour former la même quantité de chlorure de sodium et d'eau ».

L'enseignement-apprentissage simultané de toutes ces significations du coefficient stœchiométrique dans un même module, dès la troisième année, constitue une idée radicale aux implications fortes. Cependant, l'avantage résidant dans la construction complète d'un réseau conceptuel autour du coefficient se voit contrebalancé par une probable surcharge cognitive du point de vue des apprenants, au vu du nombre et de la complexité des concepts à assimiler en un court laps de temps. Il est à noter que la prise en compte de cette surcharge cognitive a peut-être poussé les auteurs du nouveau référentiel à déconnecter l'enseignement-apprentissage du coefficient dans une équation chimique (UAA2) de son utilisation dans le cadre d'un problème stœchiométrique (UAA3).

Les auteurs du nouveau référentiel semblent appliquer une grille de répartition des concepts basée sur les critères de qualité et de quantité. Une des conséquences étonnantes de l'application de cette grille est le rejet de la loi de Lavoisier dans l'UAA3, unité regroupant des concepts davantage quantitatifs. Par conséquent, les élèves doivent pondérer une équation chimique (et donc utiliser des coefficients stœchiométriques) dans l'UUA2 avant d'avoir vu la loi de conservation de la masse dans l'UAA3. Notons tout de même que le nouveau référentiel impose bien que l'on évalue la maîtrise de la

loi de Lavoisier dans l'UAA3, mais qu'il n'interdit pas son enseignement dans l'UAA2. Cependant, il semble étrange, et didactiquement discutable, de certifier la maîtrise d'un savoir à enseigner dans une autre unité que celle dans laquelle son enseignement-apprentissage est le plus pertinent. Bref, dans le nouveau programme de chimie du réseau libre catholique, la désyncrétisation du concept de coefficient stœchiométrique est telle qu'il se voit déconnecté à la fois de la loi de la conservation de la masse (en tout cas de sa certification), et d'une approche stœchiométrique quantitative.

3) Désyncrétisation liée à l'indice, à la valence

Le troisième exemple de désyncrétisation tiré de l'analyse des programmes étudiés concerne la relation entre indice et valence. Dans les anciens programmes, l'interprétation et la construction des formules chimiques sont abordées au sein du même thème ou du même module. Ces deux processus constituent un préalable essentiel à la maîtrise de l'écriture (construction) et de la pondération (interprétation et construction) des équations chimiques.

La méthode de construction des formules moléculaires unanimement promue par les programmes est la méthode du « chiasme ». Cette méthode comporte trois étapes. Dans la première, il faut écrire la valence de chaque atome ou de chaque groupement en-dessous des représentations symboliques de ceux-ci. Ensuite, il faut croiser les valences « dont les valeurs seront indiquées en indice » (Pirson *et al.*, 2015). Enfin, certains manuels précisent que, si les indices se prêtent à une simplification, il faut généralement appliquer celle-ci[12] (figure 4).

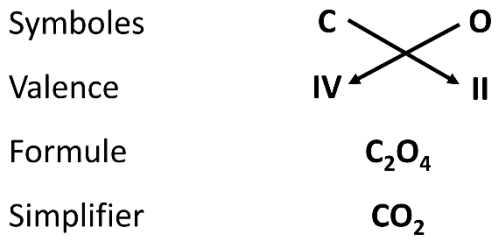


Figure 4. Méthode du chiasme appliquée à la formule chimique « CO_2 » (d'après Pirson *et al.*, 2015).

Selon cette méthode, on obtient l'indice en l'assimilant à la valence de l'atome ou du groupement partenaire dans la molécule, avec parfois la simplification d'un facteur à déterminer. Cette confusion indice/valence est d'autant plus évitable que certains manuels scolaires développent une autre méthode, conjointement à celle du chiasme. Cette méthode, dite des « bras de valence », a l'avantage de fournir une représentation alternative du concept de valence. Dans l'un des manuels, on lit : « La méthode consiste

[12] Notons que, dans les programmes et manuels scolaires consultés, les auteurs n'expliquent pas les raisons de cette simplification.

à inscrire face à face les deux symboles des atomes, puis à tracer à côté de chaque type d'atome (ou groupement) le nombre de bras qui correspond à la valence de chacun. Ensuite, tous les bras de valence des atomes (ou groupements) sont reliés en reproduisant les atomes (ou groupements) autant de fois que nécessaire. » (Buschen *et al.*, 2015b). La figure 5 consiste en une représentation du CO_2 obtenue en suivant cette méthode.

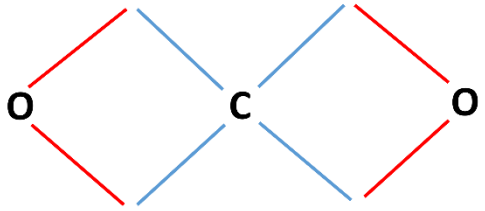


Figure 5. Méthode des bras de valence appliquée à la formule chimique « CO_2 ».

La méthode des bras de valence offre l'avantage de distinguer les fonctions de la valence et celles de l'indice. L'indice est le produit du jeu des valences des atomes et des groupements partenaires. Il indique le nombre d'atomes ou de groupements nécessaires pour satisfaire les règles de combinaison imposées par les valences. Mais cette méthode a l'inconvénient d'être moins rapide que la méthode du chiasme, ce qui la rend moins attractive pour les élèves. Elle présente également la difficulté d'allier symbolisation et représentation de nature iconique, les bras de valence préfigurant les futures liaisons chimiques.

A contrario, dans le nouveau référentiel, l'interprétation (UAA1) et la construction (UAA2) d'une formule moléculaire font l'objet d'une désyncrétisation. Plus précisément, dans le nouveau programme, ce sont l'usage et l'obtention de l'indice qui se voient séparés. Cette répartition dans deux UAA différentes n'est en réalité que l'aboutissement officialisé d'une séparation probablement effective sur le terrain. En effet, dans la plupart des manuels scolaires mettant en œuvre l'ancien programme, il est d'usage de définir l'indice dès l'apprentissage du modèle atomique, c'est-à-dire bien plus tôt que ce qui est prévu dans la planification programmatique. La raison de cet avancement temporel se trouve dans les habitudes de certains enseignants. En effet, l'une des expériences les plus utilisées dans les classes pour aborder le concept d'atome est l'électrolyse de l'eau. Cette expérience permet, certes, d'amener à la rupture de l'eau en dihydrogène et dioxygène (et donc au modèle atomique), mais l'enseignant peut difficilement passer sous silence l'obtention du volume double de dihydrogène par rapport au volume de dioxygène. De plus, la formule moléculaire de l'eau étant bien connue des élèves, il est logique de traiter la signification du chiffre « 2 » en indice dans l'expression symbolique « H_2O » (De Becker *et al.*, 2015). Les élèves utilisent ainsi fréquemment l'indice avant qu'ils n'en connaissent les règles d'obtention.

Contrairement aux deux exemples précédents, la désyncrétisation de l'usage et de l'obtention de l'indice présente selon nous un avantage didactique, car elle permet d'éviter la confusion entre l'indice et la valence, à condition que la méthode du chiasme ne soit pas la seule méthode utilisée pour construire des formules moléculaires.

1.4.3. Une création didactique

Les anciens et nouveaux programmes de chimie de troisième année des deux réseaux spécifient que les élèves doivent connaître un certain nombre de symboles chimiques associés aux noms des éléments. Par contre, il n'est nulle part fait mention de l'obligation d'enseigner (pour les professeurs) ou de maîtriser (pour les élèves) les règles qui président à l'écriture des symboles chimiques. Pourtant, la quasi-totalité des manuels scolaires de la période 2009-2017 comporte une section consacrée soit à l'exposition, soit à la reconstruction de ce que les auteurs de ces manuels appellent « règles », « méthode » ou « logique » de Berzelius. Dans le cadre de la transposition didactique, il s'agirait d'une transposition didactique externe particulière : des auteurs de manuels scolaires (qui considèrent donc un élève lambda avec un parcours et des connaissances présupposés) décident d'ajouter un pan conceptuel pour étayer un attendu programmatique. Mais le cas des règles de Berzelius transposées est encore un peu plus complexe. La conversion du savoir savant en savoir à enseigner est telle que l'on ne reconnaît plus ni les règles initiales de Berzelius, ni les règles actuelles de création des symboles chimiques.

En 1813, Berzelius propose un nouveau système symbolique[13] basé sur trois règles. Il décide d'abord de se baser uniquement sur les noms latins. Ensuite, il indique les symboles des métalloïdes par une lettre majuscule et les symboles des métaux par une majuscule suivie d'une minuscule. Enfin, il écrit en deuxième lettre minuscule la première consonne non partagée pour distinguer des termes proches (Berzelius, 1813-1814). Aujourd'hui, IUPAC n'applique plus tout à fait les règles de Berzelius (Koppenol *et al.*, 2016). Le nouveau terme consacrant la découverte d'un nouvel élément est créé de toutes pièces dans une « novlangue » dont les néologismes empruntent effectivement leur terminaison au latin, mais dont les racines sont issues de langues ou de référents divers. Si le principe de la majuscule et de la minuscule est conservé, il est maintenant important de tenir compte des anciens symboles chimiques, validés ou abandonnés. Par exemple, si la règle de la première consonne non-partagée par d'autres termes devait guider le choix de la deuxième lettre, le symbole du très récent élément « moscovium » s'écrirait « Ms ». Cependant, le symbole « Ms » a déjà été utilisé précédemment pour d'autres éléments (magnésium, masrium/radium, masurium/technetium), avant de se voir supplanté par les symboles actuels de ces

[13] Nous développerons plus abondamment la construction des symboles chimiques par Berzelius dans le chapitre 5.

éléments. C'est donc, en toute « logique » que « Mc » a été choisi comme symbole du moscovium en 2016. Il s'avère ainsi que les règles d'écriture des symboles chimiques ont évolué depuis Berzelius.

Devant une telle situation, les auteurs de manuels scolaires semblent avoir reconstruit une méthode synthétisant un certain nombre de contraintes. On peut ainsi lire dans le manuel de Pirson *et al.* (2015) :

> En comparant le nom et le symbole de chacun des atomes, nous pouvons retrouver la méthode logique que Berzelius a dû utiliser pour les symboliser. Pour cela, il nous suffit de compter le nombre de lettres du symbole, différencier la grandeur de ces lettres et déterminer la place des lettres dans le nom français ou étranger. […] On peut aboutir aux conclusions suivantes. Pour certains atomes, on a pris comme symbole la 1ère lettre (majuscule d'imprimerie) de leur nom. (C, O, S, H). Quand plusieurs noms d'atomes commencent par la même lettre, on fait suivre la 1ère lettre (majuscule d'imprimerie)
>
> (a) de la deuxième lettre (minuscule) – (He, Cu, Ca, Co)
>
> (b) de la troisième lettre (minuscule) si la deuxième lettre est source de confusion – (Cl, Cr, Mn, Mg).
>
> Parfois, on s'inspire du nom latin (N, Na, K, Hg).

Le seul point commun observé entre les trois règles (Berzelius, IUPAC, transposées) est l'écriture soit d'une majuscule, soit d'une majuscule suivie d'une minuscule. Les règles de Berzelius transposées répondent en fait à des contraintes conceptuelles et linguistiques liées aux apprenants. En effet, la langue française étant la langue véhiculaire de l'enseignement-apprentissage en Fédération Wallonie-Bruxelles, il est nécessaire de lier le symbole chimique au terme en langue française, même si, épistémologiquement, le symbole chimique n'en est pas directement issu[14]. Cela dit, le fait que l'on s'inspire « parfois » du nom latin pour écrire les symboles chimiques doit faire sourire Berzelius au paradis des chimistes. De plus, on peut observer que la distinction originale entre métaux et métalloïdes n'est pas prise en compte pour expliquer la présence d'initiales uniques pour certains éléments. Ce constat s'explique d'une part par le fait que le concept de « métalloïde » n'est plus enseigné aujourd'hui, et d'autre part par l'existence de nombreuses exceptions à la règle initiale de Berzelius (K, W, Y, V, U).

Il ressort de cette analyse que les règles « scolaires » d'écriture des symboles chimiques semblent avoir été créées pour répondre à un objectif dicté par le terrain, par des professeurs-auteurs, et ce dans le cadre-même des contraintes du système scolaire. Cette

[14] Les termes issus de la novlangue forgée par IUPAC ne sont même pas à proprement parler des termes de la langue française. Ils sont intégrés à la langue française mais créés par une autre communauté linguistique, celle des chimistes.

reconstruction de la logique de Berzelius apparait dès lors comme une « création didactique » telle que conceptualisée par Chevallard et Chervel.

1.4.4. Une terminologie didactique

Dans l'ancien et le nouveau programme de chimie du réseau libre catholique, on trouve les termes « transformation chimique » et « réaction chimique ». Cependant, les sens que ces termes véhiculent varient d'un programme à l'autre. Dans l'ancien programme, les deux termes sont utilisés de manière équivalente, comme des synonymes : les élèves doivent « modéliser la transformation chimique d'un atome en ion » (FESeC, 2009b, p. 35) et, un peu plus loin, « vérifier la conservation de la masse lors d'une réaction chimique » (*ibid.*, p. 36). Manifestement, les deux termes incluent la même idée : réagir, c'est se transformer ; se transformer, c'est réagir.

Dans le nouveau programme, une distinction sémantique apparaît. La transformation chimique devient l'« observation empirique d'un phénomène chimique » (FESeC, 2014a, p. 44), quand la réaction chimique constitue l'« interprétation moléculaire ou ionique d'un phénomène chimique » (FESeC, 2014a, p. 44). La dualité macroscopique/microscopique sert donc de grille de séparation entre les deux concepts : la transformation se situe au niveau macroscopique, la réaction chimique au niveau microscopique. Mais une deuxième grille de sélection est aussi à l'œuvre, reposant sur le type de fonction : descriptive ou explicative. En effet, la transformation chimique est associée à une « observation », c'est-à-dire à une description par les sens du phénomène chimique. Quand un professeur parle de « transformation chimique », il ne s'agit pas d'expliquer ou d'interpréter, mais de se limiter à une caractérisation de certains éléments pertinents du phénomène chimique, et directement observables. Par contre, la réaction chimique est clairement reliée à une « interprétation », c'est-à-dire à une lecture particulière des observations obtenues lors de l'étape précédente.

Afin que les élèves puissent situer à quelle échelle ou à quelle fonction le discours fait référence, il est nécessaire de recourir à un certain type de termes. Ainsi, la transformation chimique est décrite en des termes proches du langage quotidien. Dans le cas de la combustion du carbone, on trouve dans les *Clarifications conceptuelles de l'UAA2* (Godts, 2016) l'exemple suivant : « Après une mise à feu, le charbon de bois réagit avec l'air pour former des cendres, de la fumée et libérer de la chaleur et de la lumière ». A contrario, la réaction chimique doit être exprimée avec des termes spécifiques rendant compte de concepts chimiques et en sélectionnant quelques éléments pertinents. On lit ainsi, dans le même document, pour le même exemple : « Le carbone et le dioxygène de l'air réagissent pour former du gaz carbonique en dégageant de l'énergie ». L'énoncé précise certaines substances (carbone, dioxygène, gaz carbonique), plaçant, selon l'auteur, le discours au niveau microscopique. Notons qu'à part « réagir pour former » et « air », il n'y a aucun terme commun entre les deux

énoncés. Certains sont purement éliminés (mise à feu, charbon de bois, cendres, fumée) quand d'autres sont regroupés (chaleur et lumière sont remplacés par le terme « énergie »). Cette distinction de nature linguistique s'ajoute aux deux grilles de sélection précédentes.

Les manuels scolaires que nous avons consultés définissent la réaction chimique comme « le modèle d'une transformation chimique » (Pirson *et al.*, 2015 ; De Becker *et al.*, 2015), voire comme la « symbolisation de la transformation chimique » (Buschen *et al.*, 2015). Au-delà de ces termes parfois discutables, la réaction chimique est toujours présentée, conformément aux programmes, comme une interprétation de la transformation chimique, à situer au niveau microscopique. En outre, un des manuels présente l'équation chimique elle-même comme « une modélisation qui est l'interprétation de la réaction chimique (…) » (De Becket *et al.*, 2015). On voit que les définitions initiales fournies par les programmes sont modifiées par les auteurs de manuels scolaires, sans préserver les élèves de confusions importantes à propos des notions de modèle et de représentation.

Quelle est alors la place de l'équation de réaction dans cette dualité transformation chimique/réaction chimique ? Elle semble jouer un rôle de médiation symbolique entre les concepts de transformation et de réaction, même si l'équation n'est définie qu'en tant qu'« écriture symbolique d'une réaction chimique » (Godts, 2016). Ces relations s'inscrivent dans un triangle emprunté au « chemistry triplet » de Johnstone (figure 6). Nous reviendrons au chapitre 3 sur le positionnement de l'équation de réaction par rapport aux autres niveaux.

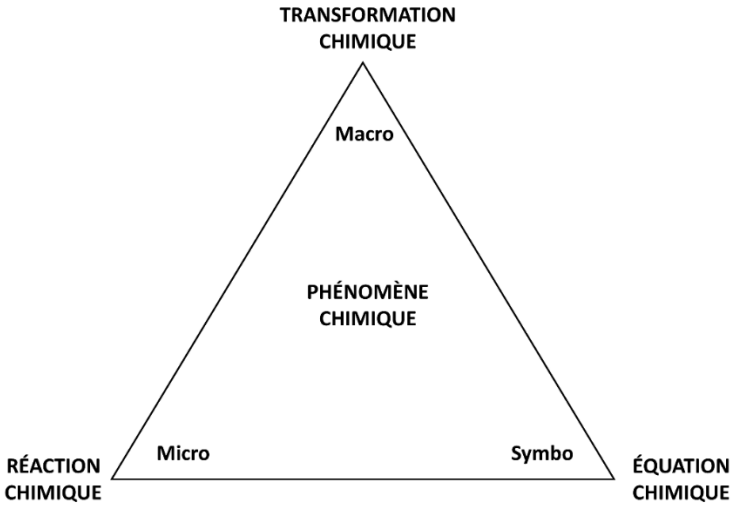


Figure 6. Triangle représentant les différentes facettes d'un phénomène chimique (d'après Johnstone, 1991).

Cette répartition sémantique en trois concepts (transformation, réaction, équation) est purement didactique : on ne la retrouve dans aucune publication dans le champ savant

de la discipline. Concrètement, seules la réaction chimique et l'équation chimique possèdent une définition « savante ». Par exemple, le *Dictionnaire de chimie* (de Merten, 2013) définit la réaction chimique comme « la transformation des réactifs en produits ». Le terme « transformation » est bien ici un synonyme de « réaction ». Dans le *Goldbook* (IUPAC, 2014), dictionnaire officiel de l'IUPAC, le concept de « transformation chimique » ne fait pas l'objet d'une définition, contrairement à celui de « réaction chimique » (« chemical reaction »), « processus qui résulte en l'"interconversion" d'espèces chimiques[15] » (IUPAC, 2014, p. 262). L'équation chimique (« chemical reaction equation ») consiste, elle, en une « représentation symbolique de la réaction chimique ». Bref, dans le domaine « savant », la transformation chimique ne constitue pas un concept institué, contrairement aux concepts de réaction chimique et d'équation chimique.

Il apparaît donc que le triangle représenté à la figure 6 résulte de la transposition didactique en ce qu'il suppose une terminologie propre au processus de transmission d'un savoir précis. Les savoirs à enseigner sont, dans ce cas, éloignés des savoir savants auxquels les termes sont empruntés.

1.5. CONCLUSIONS

Ce chapitre inaugural nous a permis de répondre à deux questions de recherche importantes : celle visant à cerner les objectifs associés à la symbolique chimique dans les programmes considérés, et celle permettant d'explorer les effets du processus de transposition didactique sur la symbolique chimique en tant que savoir à enseigner.

Les programmes que nous avons étudiés présentent des objectifs parfois très différents pour l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique. Certains auteurs de programmes (ancien et nouveau du réseau libre catholique) imposent un usage qualitatif au niveau microscopique, quand d'autres (ancien programme du réseau de la FWB) optent pour une utilisation quantitative au niveau macroscopique. On observe également de forts décalages de contenus entre certains programmes. Par exemple, l'équation chimique est uniquement « moléculaire » dans l'ancien programme de chimie du réseau libre catholique alors qu'elle peut être nominative, figurative, particulière ou générale dans l'ancien programme du réseau de la FWB. Ces divergences sont désormais en grande partie gommées par le nouveau référentiel commun qui cadre davantage les savoirs à enseigner et diminue donc la latitude laissée aux différents réseaux d'enseignement dans leur interprétation.

Les savoirs à enseigner repris dans les programmes de chimie sont des produits d'une transposition didactique. Nous avons développé dans ce chapitre quatre types de modifications dont il faut prendre en compte les effets sur la symbolique chimique à

[15] « A process that results in the interconversion of chemical species ».

enseigner. D'abord, une simplification du modèle de référence touche les concepts de molécule et de réaction chimique. Ce changement sémantique restreint d'une part les significations véhiculées par certaines écritures symboliques (formule chimique, équation chimique, coefficient, indice) et entraîne d'autre part le rejet de certains symboles (signe « = », double flèche à double pointe). Ensuite, nous avons observé que la (nécessaire) désyncrétisation des savoirs à enseigner est une contrainte forte entraînant certains choix de simplification des concepts posés par les auteurs de programmes et de manuels scolaires. C'est le cas, par exemple, du concept de molécule, que les élèves doivent définir alors qu'ils n'ont pas été initiés au concept d'atome. Nous avons également montré qu'il existe des créations didactiques, telles que développées par Chervel, dans les manuels scolaires de chimie. Les règles transposées d'écriture des symboles selon Berzelius en constituent un exemple. Enfin, des termes se voient investis de significations différentes par rapport à celles ayant cours dans le domaine de référence. La triade transformation chimique/réaction chimique/équation chimique ne peut se comprendre, didactiquement, que si l'on redéfinit chaque concept en fonction des trois niveaux de savoir du « chemistry triplet » de Johnstone.

En conclusion, un constat s'impose : les concepts chimiques liés à la symbolique chimique sont, dans la plupart des cas, fortement modifiés au bout de la transposition didactique. Mais ce phénomène s'explique par la grande souplesse sémantique de la symbolique chimique, soutenue par des caractéristiques tout à fait singulières. En effet, les formules et équations chimiques sont associées à différents niveaux de savoir (macroscopique, microscopique, symbolique), à différents langages (langage quotidien, langage scientifique, langage symbolique), à différentes fonctions (descriptive, interprétative), à différents objets (substances, molécules), à différents processus (dissolution, réaction chimique). Chacune de ces facettes constitue un levier didactique pour adapter la symbolique chimique et les concepts qu'elle représente aux contraintes du milieu scolaire. Nous tenterons, dans ce qui suit, d'éclaircir les relations entre ces différentes facettes, dans le but de fournir des cadres explicatifs aux difficultés rencontrées par les apprenants quand ils doivent utiliser la symbolique chimique. Ce sont ces mêmes difficultés, telles que décrites dans des articles de recherche en didactique de la chimie, que nous aborderons dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Les difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique : revue de littérature

Une équation de réaction, c'est trop abstrait. Pour moi, ça ne représente rien de voir des chiffres et des lettres qui bougent.

(Citation d'élève, Laugier et Dumon, 2004a)

Le chapitre précédent a permis de caractériser la symbolique chimique en tant que savoir à enseigner en Fédération Wallonie-Bruxelles. Les écarts entre savoir savant et savoir à enseigner sont, dans le cas des grands concepts liés à la symbolique chimique (et parfois des symboles en eux-mêmes), relativement importants. Il s'agit surtout de dérives issues de la transposition didactique de concepts (molécule, transformation chimique), qui entraînent des omissions dans les significations potentielles portées par certains symboles (coefficient, indice, formule chimique). Quelques signes (doubles flèches à doubles pointes, signe « = ») sont même exclus des programmes. Ces omissions et rejets sont imposés essentiellement par la programmation scolaire des concepts (désyncrétisation, simplification du modèle de référence) et par la prise en compte du développement cognitif théorique des élèves (progressivité dans l'abstraction, niveaux de savoir). Même présentée sous une forme légèrement adaptée aux nombreux concepts chimiques transposés, l'enseignement de la symbolique chimique en troisième année du secondaire s'accompagne de nombreuses difficultés pour les jeunes apprenants.

Le présent chapitre a pour objectif d'exposer les difficultés rencontrées par les élèves lorsqu'ils doivent interpréter ou construire des éléments de langage par le biais de la symbolique chimique. Nous répondons ainsi à la question suivante : « Quelles sont les confusions conceptuelles (et leurs conséquences dans la réalisation de tâches spécifiques) rencontrées par les jeunes apprenants quand ils interprètent ou construisent des formules chimiques et des équations de réaction ? »

2.1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE

Notre méthodologie se base sur un article récent de Taskin et Bernholt (2014), reprenant les principaux résultats de recherche en didactique de la chimie portant sur la compréhension des élèves et étudiants face aux formules chimiques. Cet article compile des publications issues de revues allemandes et anglo-saxonnes. Pour effectuer leur sélection, Taskin et Bernholdt ont procédé en trois étapes. Dans un premier temps, ils ont effectué une recherche sur des bases de données généralistes (comme Web of

Knowledge) avec les descripteurs « chemical formulae » dans le cadre des sciences de l'éducation, et en excluant les études portant sur les problèmes stœchiométriques. Dans un deuxième temps, les 166 articles obtenus ont été triés en fonction des résumés fournis. Enfin, dans un troisième temps, seules les recherches empiriques comprenant soit des traitements statistiques, soit une analyse descriptive, ont été sélectionnées. Il résulte de ce travail un corpus de 38 articles s'échelonnant du début des années 80 jusqu'en 2013 et portant essentiellement sur des élèves de l'école secondaire (grades 8 à 12) et du début du cycle universitaire.

Nous reprenons une partie des difficultés didactiques recensées par Taskin et Bernholt en complétant la compilation originelle d'articles anglo-saxons par des articles en langue française dédiés à la symbolique chimique. Ceci nous permet d'enrichir le panorama dessiné par ces auteurs, mais également d'ancrer notre travail dans son milieu de prédilection : l'enseignement de la symbolique chimique en langue française et les recherches en didactique de la chimie qui lui sont associées.

Cependant, nous modifions les catégories de Taskin et Benholt. Ceux-ci proposent quatre catégories d'activités requises lors de tâches réalisées par les apprenants et susceptibles de générer des difficultés : 1) comprendre la signification et la fonction ; 2) construire ; 3) interpréter ; 4) lier la symbolique chimique à des schémas particulaires. Ces catégories sont développées indépendamment pour les formules moléculaires et empiriques, et pour les équations de réaction. Même si cette catégorisation apporte un éclairage certain sur les difficultés compilées, nous ne l'adoptons pas entièrement. D'une part, les catégories 1 et 3 sont très proches d'un point de vue cognitif[1], et ne devraient pas, selon nous, être dissociées. Les deux activités s'appuient sur l'analyse des symboles chimiques et sont dépendantes des significations que les élèves associent à ceux-ci. Nous les regroupons donc dans une seule catégorie que nous nommerons « interpréter ». D'autre part, nous considérons la catégorie 4 (lier la symbolique chimique à des schémas particulaires) comme relevant principalement soit de l'interprétation (quand il s'agit de relier un schéma particulaire à une équation de réaction, par exemple), soit de la construction (quand il s'agit de construire une équation de réaction à partir d'un schéma particulaire, par exemple). De ce fait, la catégorie 4 peut se retrouver dans d'autres catégories plus englobantes. Pour notre part, nous proposons donc deux catégories d'activités réalisées par les élèves :

1) interpréter : extraire des significations précises d'éléments de langage issus de la symbolique chimique (symboles chimiques, formules chimiques, équations de réaction) ;

[1] Taskin et Bernholt distinguent les deux catégories, mais leur reconnaissent un lien direct : « Although tightly linked to the meaning and function of empirical and molecular formulae, students' problems in deriving specific information from chemical formulae are grouped in this category (c) » (2014, p. 162).

2) construire : écrire des éléments de langage (formules chimiques, équations de réaction) en utilisant les symboles chimiques. Cette opération est réalisée essentiellement à partir d'autres représentations (termes de nomenclature chimique, schéma particulaire, représentation de Cram, etc.).

Bien entendu, ces deux catégories sont intimement liées. Une tâche peut relever conjointement des deux activités. Ainsi, pondérer une équation de réaction nécessite une part importante d'interprétation : signification du coefficient stœchiométrique, signification des indices, interprétation microscopique et macroscopique de la formule chimique, etc. Mais cette activité nécessite également une connaissance des règles de construction (ordre d'écriture des symboles chimiques dans une formule moléculaire, position des indices et coefficients, écriture de l'équation de réaction avec réactifs et produits, etc.) qui sont à distinguer de la dimension purement interprétative.

Une erreur peut aussi être interprétée différemment en fonction de l'activité considérée. Soit la tâche suivante : demander à un élève d'écrire la formule chimique associée à la substance « sulfure d'hydrogène ». L'élève peut produire une formule moléculaire incorrecte comme « 2HS » (au lieu de « H_2S »), soit parce qu'il confond la signification de l'indice et du coefficient (problème d'interprétation), soit parce qu'il a mal positionné le chiffre « 2 » (problème de construction), tout en souhaitant communiquer comme information qu'il y a deux atomes d'hydrogène dans la molécule de H_2S. On peut en fait considérer l'activité de construction comme une combinaison de deux sous-activités : une activité interprétative dans laquelle l'élève analyse les données qui lui sont proposées et tentent de les convertir mentalement dans la représentation demandée (ici, interpréter le terme de nomenclature et le « traduire » en symboles), suivie d'une activité de construction dans laquelle l'élève forme une représentation graphique de la formule ainsi imaginée, en suivant les règles qu'il pense être correctes. Déterminer si c'est l'une ou l'autre de ces sous-activités qui est à l'origine de l'erreur constitue un défi didactique nécessitant l'apport d'autres méthodes de recherche, comme des entretiens dirigés.

Il est cependant possible, en première approche, de lister les sources d'erreurs possibles en fonction des tâches conçues par les enseignants et des productions des élèves, en tentant d'identifier au mieux ce qui relève de l'interprétation et ce qui relève de la construction. C'est ce que nous exposerons dans les pages qui suivent. Par ailleurs, nous appliquons ces deux catégories d'activités aux formules chimiques, dans un premier temps, et dans un second temps aux équations de réaction. Il ne nous a pas échappé que des significations incorrectes issues des formules chimiques auront des répercussions sur des significations extraites d'une équation de réaction. Citons, par exemple, la confusion entre indice et coefficient qui peut trouver son origine dans une interprétation incorrecte de l'indice dans les formules chimiques, ayant un impact sur la signification du coefficient stœchiométrique dans le cadre d'une équation de réaction. Nous

tenterons, le cas échéant, de décrire le lien entre les différentes sources à l'origine d'une difficulté observée.

2.2. DIFFICULTÉS LIÉES AUX FORMULES CHIMIQUES

2.2.1. Interpréter

1) Abréviation et connotations

La première difficulté rencontrée par les apprenants porte sur le contenu sémantique de la formule chimique. Pour Laugier et Dumon (2004b, p. 1132) :

> Les élèves sont conscients du fait que la formule chimique permet de connaître avec précision la nature et la proportion des atomes qui constituent un corps, mais ils pensent également que la formule chimique n'est qu'une abréviation.

Dans leur étude de 1993, Al-Kunifed et ses collaborateurs observent que la moitié des élèves sondés (grade 11) considèrent un symbole chimique comme une abréviation (« shorthand writing ») du nom de l'élément. Ce statut d'abréviation limite le rôle des symboles chimiques au fait de gagner du temps et de l'espace. Les auteurs de cette recherche pensent ainsi que l'utilisation, au départ, des écritures symboliques comme traduction des termes de la nomenclature est à l'origine d'une perte de sens de ces écritures, dont les élèves ne comprennent que l'efficacité opérationnelle. En d'autres termes, la symbolique chimique est réduite – pour certains élèves – à une abréviation, un code pratique. Il en ressort que les autres significations des symboles chimiques se voient cachées ou négligées. Or, le symbole chimique « C » combine au minimum les significations « élément carbone », « atome carbone » et « substance carbone ». Ces significations ne sont probablement pas greffées au symbole chimique (ou à la formule chimique) si l'élève n'y voit qu'une abréviation d'un terme donné. Notons encore que les symboles chimiques sont parfois connotés, c'est-à-dire qu'ils sont porteurs de significations qui ne sont pas souhaitées par les utilisateurs dans le domaine. Le symbole « C » est ainsi lié aux adjectifs « noir », « solide », « dur » (Strauss, 1986). D'autres symboles et formules chimiques sont eux liés à une idée de dangerosité (U, CO, CO_2) ou au contraire de vitalité (H_2O, O_2) (Depecker, 2003). Ces multiples significations portées par les symboles chimiques et leurs combinaisons constituent des informations essentielles à la compréhension des difficultés observées en classe.

2) Représentation des corps purs composés

Une autre difficulté accompagne l'interprétation des formules chimiques de corps purs composés. Certains apprenants considèrent ceux-ci comme des additions ou des juxtapositions de corps purs simples. Selon Laugier et Dumon (2004b, p. 1139), « la molécule de CO_2 est parfois vue comme une juxtaposition de l'atome de carbone C et

de la molécule de dioxygène O_2 ». L'hydroxyde de cuivre « $Cu(OH)_2$ » est noté « CuO, H_2O »[2] par certains élèves, ces deux substances étant récupérées après chauffage de l'hydroxyde de cuivre (II) (Laugier et Dumon, 2004b). L'ordre d'écriture des substances semble jouer un rôle important dans ce phénomène : Keig et Rubba (1993) rapportent que le formol, de formule chimique « CH_2O », peut être compris par certains élèves (grades 10 à 12) comme du carbone « C » attaché à de l'eau « H_2O ». La molécule d'eau « H_2O » est elle-même scindée en deux fragments distincts « H_2 » et « O » par 13 % d'élèves de grade 10 (Ben-Zvi *et al.*, 1988). Nous nommerons « interprétation additive »[3] ce type de raisonnement. Cette interprétation particulière des formules chimiques est évidemment liée à la représentation de ce qu'est une molécule. Les apprenants semblent la concevoir comme un mélange de substances distinctes qui attendent d'être libérées par l'analyse, ou encore comme un assemblage de substances aux interactions uniquement constructives. Cette représentation de la molécule a de facto un impact considérable sur le concept de réaction chimique tel qu'envisagé par des élèves adoptant l'interprétation additive (Ben-Zvi *et al.*, 1988, Arasasingham *et al.*, 2004). Comment, en effet, imaginer simultanément la rupture de liaisons chez les réactifs et la formation de nouvelles liaisons chez les produits, si les réactifs ne font que s'unir pour former un corps pur composé ?

3) Significations de l'indice

Une autre difficulté majeure se situe dans l'interprétation des indices à l'intérieur d'une formule chimique. En effet, de nombreux étudiants ne considèrent l'indice que comme un nombre d'atomes d'un certain type dans une molécule (Arasasingham *et al.*, 2004). Cette interprétation n'est évidemment correcte que pour les formules moléculaires, et pas pour les formules empiriques (par exemple, pour les réseaux ioniques). Dans une formule empirique comme « $MgCl_2$ », l'indice « 2 » donne un ratio de composition, c'est-à-dire une proportion d'ions chlorure par rapport aux ions magnésium dans un cristal de chlorure de magnésium. L'indice ne peut donner le nombre d'atomes de chlore dans une molécule de chlorure de magnésium, celle-ci n'existant pas.

Mais d'autres significations plus surprenantes sont également associées aux indices. Ainsi, selon Keig et Rubba (1993), les indices peuvent être associés au nombre de moles, au nombre de doubles liaisons ou simplement ne pas avoir de sens du tout pour certains élèves. Dans une publication de Friedel et Maloney (1992), on apprend que, dans la détermination d'une masse molaire ainsi que dans des exercices numériques impliquant la stœchiométrie, l'indice est mal utilisé, voire littéralement nié, par un

[2] Nous reviendrons sur cette notation dans le chapitre 5, consacré à l'épistémologie de l'équation de réaction.
[3] Le terme « interprétation additive » est une traduction de l'anglais « additive view ». L'interprétation additive s'oppose à l'interprétation interactive (« interactive view ») (Ben-Zvi *et al.*, 1988).

nombre important d'élèves, et ce de manière récurrente. Enfin, une interprétation fréquente de l'indice est de l'identifier à la valence de l'élément ou à la valence de l'élément partenaire (Friedel et Maloney, 1992). Une telle confusion se produit quand des élèves écrivent « C_2O_4 » au lieu de « CO_2 ». La valence du carbone devient l'indice de l'oxygène et inversement.

4) À propos des ions

Les formules chimiques présentant des charges sont également vectrices de difficultés pour les élèves. Ainsi, dans une formule comme « OH^- », seulement un tiers des élèves interrogés par Bernholt *et al.* (2012) identifient l'oxygène comme étant l'atome porteur de la charge négative. De nouveau, c'est bien l'ordre d'écriture des symboles qui entraîne cette confusion conceptuelle. La difficulté d'identifier l'atome porteur de la charge est d'autant plus grande pour des ions polyatomiques complexes comme « $H_2PO_4^-$ ». La question plus générale de la représentation des ions et des liaisons ioniques s'avère problématique. En effet, dans une formule chimique, rien n'indique le type de liaisons impliquées dans le composé : les symboles sont juxtaposés en suivant les mêmes règles d'écriture. Une formule chimique comme « $CaCO_3$ » cache la présence d'ions « Ca^{2+} » et « CO_3^{2-} », de la même manière qu'elle cache la charge de ces ions (Liu et Taber, 2016). Il est ainsi complexe d'identifier les ions éventuellement présents dans une formule chimique sans mobiliser un grand nombre de concepts (fonctions chimiques, familles chimiques, valence, charge, etc.).

La critique de l'écriture des formules des composés ioniques n'est certes pas neuve mais l'écriture symbolique proposée par Berzelius a au moins l'avantage d'indiquer implicitement la présence de liaisons, quelles qu'elles soient. Edeline (2009, p. 50) précise ainsi que

> La grande absente du système est, semble-t-il, la liaison chimique (…). En fait, elle est indiquée autrement, et subtilement, en trois degrés :
>
> - si deux symboles sont apposés, c'est qu'un lien les unit : KCl ;
> - si un atome est lié à un groupe d'atomes, cette distance supplémentaire est marquée par des parenthèses qui établissent ainsi une hiérarchie dans l'emboîtement des parties : $Ca(HCO_3)_2$;
> - enfin, la présence d'eau de cristallisation (ou d'hydratation) est indiquée en la séparant par un point : $Al_2(SO_4)_3 .18\ H_2O$ qu'on peut aussi écrire $Al_2(SO_4)_3 .18$ aq (prononcer « aqua »).

Le problème réside dans le fait que ces liaisons tacites sont probablement considérées par les élèves comme ressortissant toutes d'un même type : les liaisons covalentes pures ou polarisées. Cette interprétation est renforcée par la forte prégnance du concept de molécule (par rapport au concept de « cristal ionique ») et par l'absence d'indications

symboliques d'une liaison différente d'un composé à l'autre. Pour les apprenants, à une même écriture devrait en toute logique correspondre une seule et même liaison chimique. Le cristal ionique de sel est ainsi vu par certains élèves du Royaume-Uni (16-19 ans) comme étant constitué de deux types de liaisons : de liaisons covalentes composant les « molécules » de NaCl, et des liaisons ioniques intermoléculaires qui maintiennent la structure du cristal (Taber et Coll, in Gilbert *et al*., 2002). Le caractère ionique des liaisons n'est donc reconnu qu'aux seules liaisons intermoléculaires entre « molécules » de NaCl. Pour certains étudiants, les ions « Na^+ » et « Cl^- » ne sont formés que quand le composé est dissous dans l'eau (*ibid.*). On entrevoit ici une autre conséquence de l'apparente absence des ions dans les formules chimiques : la dissociation ionique est confondue avec l'ionisation de molécules (par exemple, du « HCl » dans l'eau). Pour ces élèves, NaCl et HCl se comportent de la même manière dans l'eau ; initialement sous forme moléculaire maintenue par des liaisons covalentes polarisées, ces substances s'ionisent au contact de l'eau, formant des ions absents de la structure originelle.

5) De la formule chimique au schéma particulaire

Dessiner un schéma particulaire[4] à partir d'une formule chimique ou associer un schéma particulaire à une formule chimique constituent des tâches dont la réussite est fortement dépendante des difficultés exposées ci-dessus. Nous nous limiterons à deux exemples éloquents. Premièrement, Ben-Zvi *et al.* (1987) ont demandé à des élèves de 15-16 ans (grade 10) d'expliquer la décomposition de Cl_2O en ses éléments constitutifs à l'aide d'un schéma particulaire. La plupart des élèves ont dessiné une molécule de Cl_2 (●●) et un atome d'oxygène (●). Ce phénomène constitue un effet de l'interprétation additive des corps purs composés : les morceaux que sont les corps purs simples sont collés l'un à l'autre et peuvent se détacher lors de la décomposition. Deuxièmement, lors de la même étude, les élèves ont dû dessiner le schéma particulaire répondant à l'écriture symbolique « $O_{2(g)}$ ». Ben-Zvi *et al.* font part du phénomène suivant : une minorité d'étudiants dessinent un schéma présentant un grand nombre de particules dispersées dans l'espace, alors que la majorité se contente de ne dessiner qu'une seule particule. Ce type de production est une conséquence d'une interprétation mono-particulaire des formules chimiques. Or, la représentation de l'état de la matière nécessite d'accéder à une signification macroscopique de l'écriture « $O_{2(g)}$ », impliquant une représentation multi-particulaire au niveau microscopique.

[4] Un schéma particulaire est une représentation des entités microscopiques associées aux formules chimiques, éventuellement présentées via une équation de réaction.

2.2.2. Construire

1) Du nom de l'élément au symbole chimique

La première étape dans la construction d'une formule chimique réside dans le fait d'associer un symbole chimique au nom d'un élément. Or, il apparaît que cette activité n'est pas anodine pour des élèves débutants. Mzoughi-Khadraoui et Dumon (2012) ont ainsi sondé les capacités d'élèves tunisiens de 15-16 ans (grade 10) concernant la maîtrise de ce que les auteurs appellent « le langage de la chimie ». Entre autres questions, les élèves devaient déterminer le nom des éléments symbolisés par les lettres H, O, N, S, Na. À peine plus de la moitié des élèves (51 %) ont rendu une copie entièrement correcte. Ce sont les symboles les plus éloignés du terme en français, comme par exemple « Na » pour « sodium », qui sont le plus susceptibles d'être mal interprétés (25 % d'erreurs). Il en ressort que la tâche inverse de construction du symbole à partir de la dénomination peut, elle aussi, constituer un problème (Keig et Rubba, 1993 ; Glazar et Devetak, 2002).

2) Du nom de la substance à la formule chimique

Dans le même ordre d'idées, construire la formule chimique d'un corps pur composé à partir d'un terme de la nomenclature est une tâche qui nécessite un grand nombre de processus cognitifs.

Le premier processus consiste à comprendre les indications de composition données dans le nom. Ainsi, Glazar et Devetak (2002) ont montré que les préfixes présents dans les noms des oxydes non-métalliques étaient mal interprétés par certains étudiants de 19 ans lors de la construction de formules chimiques. Face à la même tâche – donner une formule chimique à partir d'un nom –, aucun des 130 élèves tunisiens testés par Mzoughi-Khadaroui et Dumon (2012) n'a été capable de formuler une écriture symbolique correcte pour l'ensemble des quatre substances proposées (chlorure de zinc, hydroxyde de sodium, acide chlorhydrique, chlorure de sodium). Il semble que le groupement hydroxyde (associé au symbole « H » dans un tiers des cas) pose problème aux élèves, ainsi que le symbole chimique du zinc, moins connu des apprenants. Le lien entre terme de nomenclature et formule chimique est donc loin d'être évident pour les élèves, surtout quand le terme est un nom trivial, semi-trivial ou fonctionnel (Mestrallet, 1980).

Le deuxième processus cognitif à l'œuvre dans la tâche de construction d'une formule chimique concerne les valences des éléments constitutifs de celle-ci : il s'agit de les identifier correctement et d'éventuellement les traduire en charge pour les ions présents dans le composé. L'écriture des ions n'est pas une tâche aisée : certains élèves utilisent des ions chargés incorrectement, tant du point de vue du signe (anion à la place de cation) que du nombre de charges portés par l'ion (Glazar et Devetak, 2002).

Le troisième processus cognitif est l'écriture de la formule chimique en elle-même. Dans ce cas, c'est l'ordre d'écriture qui pose une difficulté potentielle (Keig et Rubba, 1993). En effet, certaines productions et interviews d'élèves laissent entendre que l'ordre d'écriture des formules chimiques doit suivre l'ordre alphabétique (« C » devant dans « CO_2 » car « C » devance « O » dans l'ordre alphabétique). Pour d'autres élèves, c'est l'abondance relative de l'élément dans le composé qui guide l'ordre (« C » devant « O » dans « CO_2 » car il n'y a qu'un atome de carbone par rapport aux deux atomes d'oxygène). Enfin, l'ordre d'écriture peut également dépendre du nombre atomique des éléments considérés (préséance de « HI » sur « IH » ; préséance générale du « H » dans les acides minéraux).

Une formule chimique est une succession très codée de majuscules, de minuscules, et de chiffres en indice. Il n'est pas étonnant que de nombreux élèves (28 sur 130) représentent le chlorure de zinc par des formules chimiques incorrectes comme « ZNCL », « zncl », « ZNCl » ou « ClZn » (Mzoughi-Kadraoui et Dumon, 2012). Le fait de placer des majuscules à l'intérieur des « mots » est une des caractéristiques perturbantes de la symbolique chimique, susceptible d'engendrer des erreurs de formulation pour de jeunes apprenants[5].

3) Du schéma particulaire à la formule chimique

Une dernière difficulté liée à la tâche de construction réside dans l'activité de traduction d'un schéma particulaire en une formule chimique. Arasasingham *et al.* (2004) ont demandé à des élèves de première année universitaire de proposer une formule chimique à partir d'un schéma particulaire représentant six molécules d'ammoniac à l'état gazeux (figure 1). Si la plupart des élèves répondent correctement en donnant la formule « $6NH_3$ » ou « NH_3 », 15 % d'entre eux assignent les formules « N_6H_{18} » ou « $(NH_3)_6$ » au schéma particulaire. Les auteurs interprètent ce résultat en ces termes :

> These students did not differentiate the six separate triatomic molecules in the picture and perceived the chemical formula as representing one unit of the substance rather than multiple molecules. This lack of understanding may be attributed to students' uncertainty in distinguishing the formula in terms of the particles they represent[6].

[5] Nous aborderons plus en détail, au chapitre 6, la parenté entre les « mots » en langue française et les « mots » dans la symbolique chimique.

[6] « Ces étudiants ne différencient pas les six molécules triatomiques séparées dans l'image et perçoivent la formule chimique comme une représentation d'une seule unité de substance plutôt que de molécules multiples. Ce manque de compréhension peut être attribué à l'incertitude des étudiants quand il s'agit de décrire les formules en termes de particules représentées » (traduction libre).

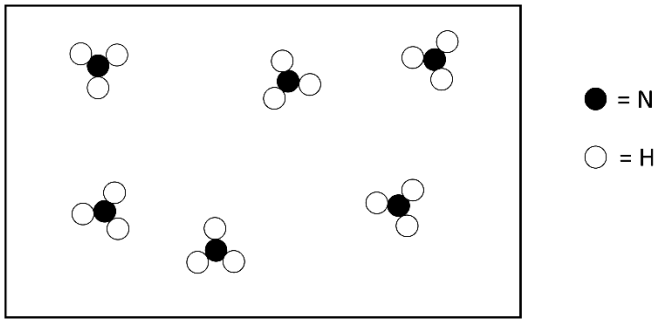


Figure 1. Schéma particulaire issu de l'étude d'Arasasingham *et al.* (2004).

Cette hypothèse des auteurs concentre donc l'origine de l'erreur sur la phase d'interprétation de l'étudiant : celui-ci formulerait sa conception de la formule chimique comme rendant compte d'une seule « unité de substance », somme de toutes ses parties. Il est pourtant tout aussi probable que ce soit dans la phase de construction que l'étudiant produit son erreur. En effet, dans une proposition comme « $(NH_3)_6$ », c'est essentiellement la position du chiffre « 6 » qui est défaillante. Ce positionnement en indice de la formule moléculaire peut soit être associé à une confusion conceptuelle entre indice et coefficient, soit être le signe d'une simple confusion d'écriture entre indice et coefficient, l'étudiant souhaitant rendre compte – dans les deux cas – de la présence de six molécules séparées. Malgré cette incertitude concernant la source réelle de l'erreur, on voit que le lien entre schémas particulaires et formules chimiques est un moyen incontournable de diagnostiquer, dans les classes, des difficultés d'élèves[7].

2.3. DIFFICULTÉS LIÉES AUX ÉQUATIONS DE RÉACTION

L'équation chimique ou équation de réaction est par nature un concept intégrateur[8], un méta-concept, regroupant un nombre important de concepts fondamentaux en chimie, qui renvoient à la fois au monde observable et au monde microscopique. Comme l'écrivent Barlet et Plouin (1994) : « L'équation chimique prend appui sur de l'explicite ; elle suggère du non-dit ». C'est ce « non-dit » qui est à l'origine des nombreuses difficultés développées ci-dessous.

2.3.1. Interpréter

1) Entre transformation et conservation

Dans le chapitre 1, nous avons vu que l'équation chimique est définie, dans les nouveaux programmes, comme l'écriture symbolique de la réaction chimique, elle-

[7] Pour découvrir une utilisation diagnostique de ce type de tâche, voir le chapitre 9.
[8] Un concept intégrateur « permet de faire le transfert de l'individu chimique non observable à une collection d'individus chimiques observables. » (Barlet et Plouin, 1994).

même modélisation de la transformation chimique. Elle comporte une série d'informations ramassées en un faible nombre de symboles. C'est cette caractéristique qui mène certains élèves à considérer l'équation de réaction comme une abréviation, un langage pratique qui traduit une réaction chimique, de la même manière que les formules chimiques rendent compte plus rapidement (c'est-à-dire en moins d'espace) de la composition des substances (Al-Kunifed *et al.*, 1993). Mais une dimension mathématique s'ajoute à cet aspect purement pratique. En effet, le terme « équation » est emprunté au langage des mathématiques, ce qui n'est pas sans véhiculer des significations non-désirées susceptibles de voiler les significations chimiques. À ce sujet, Barlet et Plouin (1994) précisent que

> [c]ette équation ne peut pas être prise ici dans son sens mathématique car elle n'exprime pas une égalité. Lorsqu'on écrit :
>
> $$CH_4 + 2O_2 \longrightarrow CO_2 + 2H_2O$$
>
> on signifie simplement que le premier membre contient les formules moléculaires des réactifs et le second membre celles des produits de réaction. La flèche signifie qu'il y a transformation des réactifs vers les produits. Il n'y a pas, dans la transformation, égalité mais conservation des masses, des atomes et des charges électriques (pas obligatoirement des molécules et des volumes).

Nous ne pouvons être entièrement en accord avec Barlet et Plouin quand ils déclarent que « l'équation chimique n'exprime pas une égalité ». En effet, le terme « équation », tel qu'employé dans le domaine de la chimie par Lavoisier (1789), est précisément utilisé dans le but de souligner une égalité[9], en l'occurrence l'égalité entre la masse des produits et la masse des réactifs. Le terme « conservation » utilisé par Barlet et Plouin (et par Lavoisier) n'est qu'un autre terme pour parler des constantes qui entourent la réaction chimique : conservation des masses, conservation des éléments, conservation des charges. Mais il s'agit de fait d'égalités mathématiques, exprimées par Lavoisier dans la première équation chimique écrite dans le célèbre *Traité élémentaire de chimie* :

« Moût de raisin = acide carbonique + alcool »

Le signe « = » est ici à prendre dans son sens mathématique, les masses des substances nommées étant tacitement les grandeurs mises en relation[10]. D'ailleurs, Yarroch (1985) rapporte que certains élèves considèrent les termes de part et d'autre de la flèche comme les protagonistes d'une relation d'égalité. L'une des principales difficultés de l'équation chimique consiste ainsi à mettre en évidence les conservations sans cacher les transformations de la matière. L'inverse est également vrai : il ne faut pas nier que

[9] Du latin « aequus », égal.
[10] Nous reviendrons sur la proposition de Lavoisier dans le chapitre 5, consacré à l'épistémologie de la symbolique chimique.

l'équation chimique véhicule des égalités sous prétexte de mettre en avant les transformations.

2) Signification du signe « + »

Le lien entre équation de réaction et mathématiques est renforcé par la présence du signe « + » entre les réactifs et entre les produits. Ce signe « + » est, dans la première équation de Lavoisier, à prendre dans son sens additif : il s'agit bien de faire la somme des masses des réactifs et de les comparer à la masse totale des produits. Il n'est donc pas surprenant que de nombreux élèves considèrent ce signe « + » comme l'équivalent symbolique de « additionné » ou « ajouté à » (Al-Kunifed *et al.*, 1993). Cependant, ce signe recouvre également d'autres significations chimiques : il peut indiquer le simple fait de mettre en contact les réactifs, signifier que plusieurs substances différentes sont produites, etc. Marais et Jordaan (2000) considèrent que le signe « + » entre réactifs peut être lu dans le sens de « réagit avec ». Cette interprétation nous semble discutable car elle entraîne une confusion avec la flèche de réaction, qui porte, elle, l'idée de réaction.

La position des formules chimiques autour du signe « + » revêt également de l'importance lors d'un phénomène étonnant : certains élèves ont tendance à prêter un rôle plus actif à la substance située à droite du signe « + » du côté des réactifs (Liu et Taber, 2016). Ainsi, lors de la combustion du carbone, c'est l'oxygène (agent) qui permettrait de brûler le carbone (patient)[11]. Lors de la réaction du magnésium avec l'acide chlorhydrique, c'est l'acide (agent) qui « attaque » le magnésium (patient)[12]. Or, il n'en est rien : dans une réaction chimique, les deux composés sont également responsables de la spontanéité de la transformation et de son issue. La signification d'une équation chimique reste d'ailleurs fondamentalement inchangée si l'on permute les deux composés de part et d'autre du signe « + ». Cette dichotomie agent/patient a bien sûr un impact sur la représentation de la réaction chimique chez les élèves, vue comme la nécessaire rencontre entre un composé patient, moins réactif, et un composé agent, davantage réactif.

3) Signification de la flèche de réaction

La grande différence entre une équation mathématique et une équation chimique réside dans la flèche de réaction, substitut du signe égal employé, à l'origine, par Lavoisier[13]. De par son statut hybride entre l'équation mathématique et l'équation chimique, la flèche de réaction véhicule son lot de difficultés. L'une d'entre elles consiste, nous

[11] L'équation chimique de combustion du carbone est d'ailleurs beaucoup plus souvent notée $C + O_2 \longrightarrow CO_2$ que $O_2 + C \longrightarrow CO_2$.
[12] De même, l'équation générale de réaction des métaux avec les acides est souvent notée $M + HX \longrightarrow H_2 + MX$.
[13] Pour plus d'informations sur le passage du signe égal aux flèches de réaction, voir le chapitre 5.

l'avons vu, à la confondre avec le signe « = » (Yarroch, 1985). Mais d'autres significations parasites peuvent entraver la compréhension de la flèche de réaction par les apprenants. Dans leur article de 2000, Marais et Jordaan classent la flèche de réaction parmi les symboles « très problématiques » à « problématiques ». Dans cette étude, les étudiants testés, en première année de cycle universitaire, devaient sélectionner la signification qu'ils associaient à la flèche de réaction parmi plusieurs propositions. La réponse attendue – « react to form » – n'a été sélectionnée que par un cinquième des étudiants. Les autres propositions (« give », « are equal to », « go to ») sont liées à d'autres significations non-désirées de la flèche de réaction (lien cause-conséquence, direction/sens, égalité). Plus loin dans l'article, c'est la double flèche à simple pointe et asymétrique qui est testée (la flèche supérieure étant plus longue que la flèche inférieure). Environ 30 % des étudiants proposent une interprétation correcte du symbole. La maîtrise des significations de la flèche de réaction est ainsi au centre de l'apprentissage de la dualité conservation/transformation véhiculée par l'équation chimique.

4) Signification du coefficient stœchiométrique

Après le signe « + » et la flèche de réaction, le coefficient stœchiométrique constitue le troisième symbole typique d'une équation de réaction. Le coefficient stœchiométrique est classé parmi les symboles « très problématiques » dans l'article de Marais et Jordaan (2000). Dans cette étude, moins de 10 % des étudiants ont été capables d'associer la formule « $2NO_2$ »[14] à la proposition « 2 molécules de NO_2 ». L'analyse des autres items proposés dans le questionnaire à choix multiples de Marais et Jordaan permet de cerner les difficultés rencontrées par les élèves. La question posée était : « Que représente la notation « $2NO_2$ » ?

(1) La proposition « 2 atomes de NO_2 » permet de tester si l'étudiant distingue les concepts d'atome et de molécule. C'est donc davantage la capacité à interpréter une formule moléculaire que la compréhension du coefficient qui est ici sondée.

(2) Les propositions « un total de six atomes ensemble » et « deux atomes d'azote combinés à quatre atomes d'oxygène » testent toutes deux la capacité, chez l'apprenant, à combiner coefficient et indice sans perdre l'information moléculaire. Les étudiants ayant sélectionné ces propositions ont effectué correctement la distribution du coefficient sur les indices, mais ils ont regroupé l'ensemble des atomes dans une « unité de substance » globale.

(3) Enfin, la proposition « deux atomes d'azote combinés à deux molécules d'oxygène » permet de déterminer si l'étudiant procède à une interprétation additive de la formule chimique du corps pur composé et à une distribution correcte du coefficient. Le cas

[14] Présenté dans l'équation de réaction $N_2O_{4(g)} \rightleftharpoons 2NO_{2(g)}$.

échéant, ces élèves considèrent la molécule de dioxyde d'azote comme un ensemble de deux entités (un atome d'azote et une molécule de dioxygène).

Al-Kunifed *et al.* (1993) ont montré le problème de la prise en compte des indices et du coefficient dans le dénombrement des atomes présents dans une molécule. Certains étudiants suggèrent ainsi que l'on trouve dix atomes d'oxygène dans une formule symbolique comme « $5Cu(NO_3)_2$ » en additionnant indices et coefficient (2 + 3 + 5). Comme la combinaison de l'indice et du coefficient est importante dans le dénombrement des atomes (et donc dans la démarche de pondération des équations de réaction), il est essentiel de ne pas confondre les deux concepts. Sur ce sujet, Yarroch (1985) écrit :

> Coefficients and subscripts were described as numbers distinguished primarily by their location in the equation. Both were said to give the same information, the number of symbols present. The coefficient's function was to multiply the subscript and thereby balance the equation[15].

Il est à noter que Yarroch rapporte les termes « number of symbols » et non « number of atoms » ou « number of moles ». Les élèves testés ne quittent donc pas l'écriture symbolique : ils dénombrent principalement des symboles chimiques, et non des atomes ou des molécules. Si l'indice et le coefficient jouent le même rôle pour certains élèves, il n'est pas étonnant de constater que des formules comme « Cu_3 » et « 3Cu » sont utilisées de manière interchangeable par des apprenants novices (Savoy et Steeples, 1994). Dans une publication de 2016, Canac et Kermen montrent qu'un quart d'élèves testés dans quatre cohortes différentes (de grade 9 à la première année universitaire) déclarent que « CH_4 » et « C_2H_8 » correspondent à la même molécule. Ces élèves et étudiants intègrent ainsi un éventuel coefficient (« $2CH_4$ ») en le distribuant sur les indices, sans pour autant modifier la molécule. Enfin, la signification du coefficient dans la démarche de pondération constitue également une source de confusion. En effet, le rôle d'indicateur de proportion entre réactifs ainsi qu'entre réactifs et produits formés ne semble pas être l'information principale que les élèves tirent du coefficient stœchiométrique présent dans une équation de réaction. D'autres significations parasites les empêchent d'accéder aux significations plus pertinentes pour l'exploitation des équations chimiques. Par exemple, Abraham *et al.* (1994) ont montré que certains élèves (grades 9 à 12 et étudiants de première année de cycle universitaire) justifiaient l'introduction d'un coefficient par le fait que celui-ci concourt à équilibrer la valence, à indiquer le nombre de protons de la dernière couche ou à représenter le nombre atomique. De telles interprétations, qui s'inscrivent bien dans le domaine chimique,

[15] « Les coefficients et les indices ont été décrits (par les élèves) comme des nombres qui se distinguent essentiellement par leur position dans l'équation. Les deux nombres donneraient la même information (selon les élèves), en l'occurrence le nombre de symboles présents. La fonction du coefficient est de multiplier l'indice et, par là, de pondérer l'équation » (traduction libre).

concurrencent fortement les significations pertinentes et attendues dans le cadre scolaire (nombre de molécules, ratio réactionnel).

5) À propos des tâches liées à l'interprétation des équations chimiques

De ces difficultés d'interprétation des symboles principaux de l'équation de réaction (symboles chimiques, indice, « + », flèche, coefficient) découle une série d'obstacles dans la réalisation de tâches particulières. Une première tâche consiste à prédire, à l'aide d'une équation de réaction, la quantité de matière d'un réactif A qui va réagir avec un réactif B dont on donne la quantité de matière initiale. Abraham *et al.* (1992) ont ainsi fourni l'équation non-pondérée d'oxydation du fer en oxyde de fer (III)[16] et demandé à des élèves (grade 8) de déterminer la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de quatre milliards d'atomes de fer. Environ 20 % des élèves prévoient que quatre milliards de molécules d'oxygène sont nécessaires à l'oxydation des quatre milliards d'atomes de fer, ce qui montre l'application d'un ratio 1:1. De manière évidente, ces élèves n'ont pas pondéré l'équation. Ils ont probablement considéré qu'une information donnée par le professeur (ici, l'équation chimique) n'était pas à mettre en doute ni à compléter. 6 % des élèves ont proposé que huit milliards de molécules d'oxygène étaient nécessaires à la réaction d'oxydation. Abraham *et al.* (1992) émettent l'hypothèse que ces élèves ont utilisé l'indice « 2 » du dioxygène pour prédire la quantité de matière. Cette interprétation serait alors le résultat de l'assimilation de l'indice au coefficient, telle que rapportée par Yarroch (1985) : ceux-ci joueraient le même rôle.

Dans une publication ultérieure, Abraham *et al.* (1994) réalisent le même test mais en fournissant cette fois aux élèves l'équation pondérée[17]. Les auteurs rapportent, de la part des élèves testés, des interprétations comparables à celles recueillies dans leur précédente étude, tout en relevant un phénomène particulier. Quelques élèves écrivent que six milliards de molécules d'oxygène sont nécessaires à l'oxydation de quatre milliards d'atomes de fer, appliquant ainsi un ratio 3:2. Ce rapport semble être tiré du produit formé Fe_2O_3, dans lequel trois atomes d'oxygène sont combinés à deux atomes de fer. Une hypothèse explicative serait que ces élèves ont considéré les indices présents dans la formule chimique du produit comme les indicateurs de la proportion selon laquelle le fer et l'oxygène doivent réagir. Si un tel raisonnement peut se tenir dans certains cas[18], le fait que la molécule d'oxygène soit diatomique invalide la démarche dans le cas de l'oxydation du fer. Le caractère diatomique de la molécule de dioxygène constitue d'ailleurs une difficulté en soi, notamment dans la réalisation de problèmes stœchiométriques (Wood et Breyfogle, 2006).

---

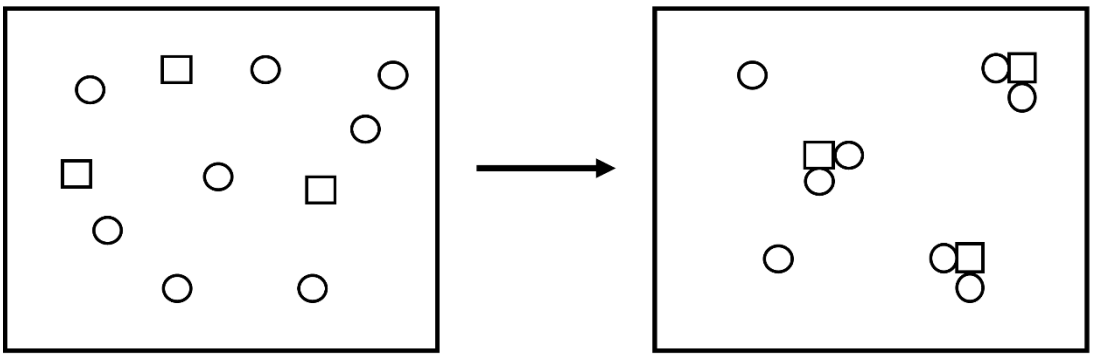
[16] $Fe + O_2 \longrightarrow Fe_2O_3$

[17] $4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3$

[18] La formation de l'eau, par exemple. La molécule « H_2O » rend compte du ratio réactionnel entre le dihydrogène et le dioxygène.

Une deuxième tâche importante consiste à associer une équation chimique à un schéma particulaire (et inversement). Dans une publication de 1987, Nurrenbern et Pickering rapportent qu'ils ont demandé à des étudiants de sélectionner l'équation de réaction correspondant à un schéma particulaire donné (figure 2). Un cinquième seulement des étudiants testés ont sélectionné la réponse correcte : $X + 2Y \longrightarrow XY_2$. La double difficulté de l'exercice réside dans le fait que l'équation est imaginaire (problème d'abstraction supplémentaire) et dans la présence d'un réactif en excès (ici, le Y). Lors d'études ultérieures, cet exercice a été soumis à d'autres cohortes d'étudiants (souvent en première année de cycle universitaire) avec des résultats comparables à la clé (Sawrey, 1990 ; Arasasingham *et al.*, 2004 ; Sanger, 2005).

The reaction of element X (□) with element Y (○) is represented in the following diagram :



Which equation describes this reaction ?

a) $3X + 8Y \longrightarrow X_3Y_8$

b) $3X + 6Y \longrightarrow X_3Y_6$

c) $X + 2Y \longrightarrow XY_2$

d) $3X + 8Y \longrightarrow 3XY_2 + 2Y$

e) $X + 4Y \longrightarrow XY_2$

Figure 2. Schéma particulaire et question à choix multiples issus de l'étude de Nurrenbern et Pickering (1987).

Selon chacune de ces études, la réponse la plus souvent sélectionnée par les apprenants est la proposition (d). Il s'agit là d'un cas d'école : les élèves et les étudiants décrivent correctement le contenu de la case « réactifs » et de la case « produits » mais ne transposent pas l'information pour obtenir un ratio réactionnel. Deux sources d'erreur sont possibles. Soit le coefficient est considéré par ces étudiants comme un chiffre indiquant le nombre de molécules (ou d'atomes) et non comme une proportion. Soit ces étudiants ne prennent pas en compte le réactif en excès : ils considèrent celui-ci comme un produit de réaction au même titre que XY_2.

Nurrenbern et Pickering (1987) ont soumis la tâche inverse à des étudiants : prédire le schéma particulaire à la fin de la réaction, en connaissant l'équation de réaction et le schéma particulaire initial (figure 3, complétée par les propositions de Mulford et

Robinson [2002]). De nouveau, un des deux réactifs est placé en excès dans le schéma particulaire initial (ici, le soufre). Seul un tiers des élèves ont choisi le schéma particulaire correct (a). Cet exercice fut également à la base de nombreux articles dans le courant des années 2000, décliné sous la forme d'une question à choix multiples (Mulford et Robinson, 2002 ; Wood et Breyfogle, 2006 ; Marais et Combrick, 2009) ou d'une question ouverte (Arasasingham *et al.*, 2004 ; Wood et Breyfogle, 2006 ; Dawidowitz *et al.*, 2010). Les résultats de toutes ces études concordent : environ un tiers des étudiants réalisent correctement l'exercice. Une des principales erreurs rencontrées consiste en la confusion entre « S_2O_6 » et « $2SO_3$ ». Ainsi, dans l'article de Mulford et Robinson (2002), on lit que plus de la moitié des étudiants de premier cycle universitaire ont sélectionné le schéma particulaire figurant du « S_2O_6 » (schéma (e) au bas de la figure 3).

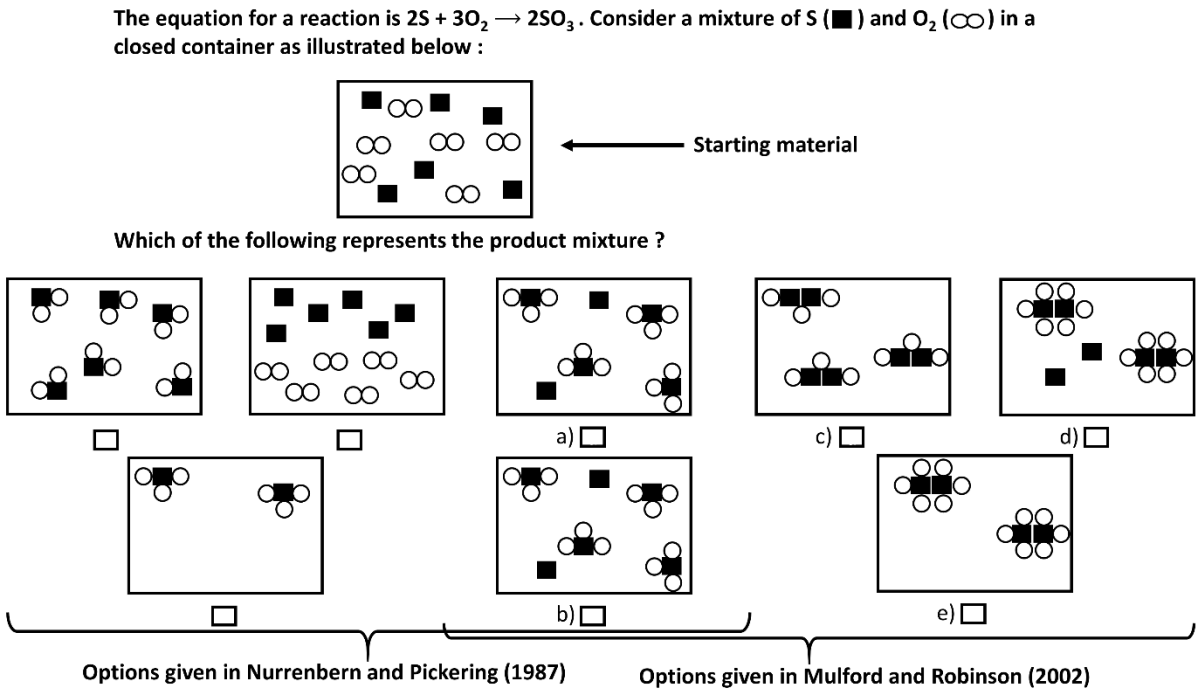


Figure 3. Schéma particulaire initial et question à choix multiples comprenant des schémas particulaires à la fin de la réaction (d'après Taskin et Bernholt, 2014).

Les questions ouvertes sont un moyen d'élargir le spectre des productions, et d'accéder de cette manière à d'autres représentations mentales des élèves. Ainsi, Ben-Zvi *et al.* (1987) soumettent une équation pondérée ($2KF_{(l)} \longrightarrow 2K_{(s)} + F_{2(g)}$) à des élèves de grade 10, et leur demandent de construire une représentation iconique qui rende compte de l'équation donnée. Une majorité d'élèves présente une production que les auteurs analysent comme étant le reflet d'une « compréhension microscopique statique ». Dans cette catégorie de représentations, les élèves préfèrent dessiner des unités isolées (une molécule de « F_2 », deux atomes de « K ») plutôt qu'un grand nombre d'unités. Cette interprétation de l'équation découle de nouveau de la tendance des élèves à considérer

le coefficient comme un nombre précis de molécules ou d'atomes, et non comme une proportion.

Smith et Metz (1996) ont soumis le même type de test à leur cohorte d'étudiants universitaires, mais en changeant l'équation de réaction[19]. Les auteurs relèvent une série de difficultés exposées dans la partie consacrée aux formules chimiques : les sels sont dessinés sous forme moléculaire en solution, le $NiCl_2$ est composé d'un atome de Ni et d'une molécule de dichlore, le groupement « OH^- » est divisé en deux parties (H et O). Une difficulté spécifique à l'équation chimique apparaît cependant. Dans quelques productions, la formule « 2NaCl » est représentée par deux atomes de sodium liés à un atome de chlore. Pour ces étudiants, le coefficient s'applique donc à un seul des deux atomes composant la formule chimique, en l'occurrence le premier. Ce constat rejoint celui de Laugier et Dumon (2004b) qui proposent de réintroduire temporairement des parenthèses dans le but de renforcer la distribution du coefficient sur l'ensemble des éléments dans la formule chimique (par exemple, « 2(NaCl) »).

Il apparaît aussi que la capacité à pondérer correctement une équation chimique n'implique pas la capacité à dessiner un schéma particulaire correct de l'équation considérée. Ce phénomène a été démontré par différents auteurs (Yarroch, 1985 ; Kern *et al.*, 2010 ; Dawidowitz *et al.*, 2010). Dans l'article de Kern *et al.* (2010), on trouve par exemple, que si plus de deux tiers des élèves interrogés sont capables de pondérer une équation, ils ne sont plus qu'un tiers à pouvoir dessiner un schéma particulaire correct.

2.3.2. Construire

Nous terminons le panorama des difficultés rencontrées par les apprenants en abordant les difficultés spécifiques à la construction des équations de réaction, notamment à la démarche de pondération de celles-ci.

1) Pondération des équations chimiques

Une des tâches les plus emblématiques du cours de chimie – et dont se rappellent la plupart des élèves longtemps après la fin de leur cursus – est la pondération des équations de réaction. Vue comme une « opération qui relève de l'arithmétique comptable » (Laugier et Dumon, 2004a), la démarche de pondération des équations chimiques se base sur la conservation du nombre d'atomes[20] de même type de part et d'autre de la flèche de réaction. Or, le principe de la conservation du nombre d'atomes

[19] $NiCl_2(aq) + 2NaOH(aq) \longrightarrow Ni(OH)_2(s) + 2NaCl(aq)$

[20] Bien entendu, il serait plus correct de parler de conservation des éléments et de transformation des atomes. Nous conservons cependant les définitions enseignées en Fédération Wallonie-Bruxelles (voir chapitre 1).

pose déjà problème à certains élèves : 54 % des élèves interrogés lors d'une étude antérieure le dénient (Laugier et Dumon, 2000).

L'une des principales difficultés relevées consiste en la manipulation des indices pour pondérer une équation chimique (Yarroch, 1985 ; Abraham *et al.*, 1992 ; Savoy et Steeples, 1994), due à la confusion entre le rôle de l'indice et du coefficient. L'indice jouant, pour certains élèves, le même rôle multiplicateur qu'un coefficient, il est logique que sa modification intervienne dans la pondération d'une équation. Mais cette pratique de manipulation démontre aussi que ces élèves ne connectent pas de concepts microscopiques (atomes, molécules) ou macroscopiques (création de nouvelles substances) aux écritures symboliques auxquelles ils sont confrontés. En ciblant un équilibrage du nombre d'atomes, ils oublient l'existence des substances et la nécessité de conserver leur intégrité en respectant leur composition atomique.

2) Prédiction des produits formés

Une autre tâche, plus complexe celle-là, consiste à prédire les produits formés au cours d'une réaction (avant, la plupart du temps, de pondérer l'équation ainsi construite). Ben-Zvi *et al.* (1987) ont posé la question suivante à des élèves (grade 10) : « Quel produit forme-t-on en faisant réagir N_2 et O_2 ? » Les auteurs fournissaient une série de choix possibles : N_2O, NO, NO_2, N_2O_5. La proposition « N_2O_5 » cristallise le plus de difficultés. Certains élèves en refusent notamment la formation car ils soulignent le manque d'atomes d'oxygène dans les réactifs de départ. Deux raisonnements sont potentiellement à l'origine de ce comportement. Soit les élèves présentent une interprétation additive des formules moléculaires, et donc considèrent que « N_2O_5 » est la juxtaposition d'une molécule de N_2 et d'une molécule de O_5 (absente des réactifs). Soit ces élèves considèrent le coefficient comme étant obligatoirement unitaire (une seule molécule représentée) : il serait dans ce cas impossible d'obtenir cinq atomes d'oxygène dans le produit, si les réactifs n'en possèdent que deux.

Une étude française (Fillon, 1997) montre que les élèves utilisent une stratégie langagière pour trouver les produits de réaction, qui peuvent être déterminés par la permutation des informations décrivant les réactifs, à partir de la langue française ou à partir de l'équation de réaction. Par exemple, les réactifs « nitrate de plomb » et « iodure de potassium » donneront, par permutation langagière, de l'« iodure de plomb » et du « nitrate de potassium ». Cette manipulation du langage s'applique plus difficilement quand on passe à l'écriture symbolique : il faut alors tenir compte des valences des éléments considérés afin de déterminer les formules chimiques correctes[21]. Signalons enfin qu'une équation chimique ne comprenant qu'un seul réactif (par exemple, l'électrolyse de l'eau) perturbe considérablement les élèves. Pour la plupart d'entre eux,

[21] $Pb(NO_3)_2 + 2KI \longrightarrow 2KNO_3 + PbI_2$

il n'y aura pas de produits formés, les réactifs devant être au moins au nombre de deux pour entrer en réaction (Taber, 2009).

3) De l'équation chimique au schéma particulaire

La traduction d'un schéma particulaire en une équation chimique constitue un défi pour bon nombre d'élèves. Les exemples développés précédemment, dans lesquels il s'agit de sélectionner et non de construire une équation chimique, ont abondamment nourri ce constat. Nous allons cependant conclure ce point par un exemple représentatif. Pour son étude de 2005, Sanger demande à des étudiants de premier cycle universitaire de construire une équation de réaction sur base du schéma particulaire de Nurrenbern et Pickering (figure 3 ; avec X = C et Y = S). Le principal problème provient de nouveau de la confusion entre indice et coefficient. En plus d'écrire une équation incorrecte[22], de nombreux étudiants notent ainsi « C_3 » au lieu de « 3C », ou « $(CS_2)_3$ » au lieu de « $3CS_2$ ».

2.4. PRINCIPALES DIFFICULTÉS RECENSÉES

Dans les processus d'interprétation et de construction de formules chimiques et d'équations chimiques, six axes fondamentaux permettent de comprendre les difficultés rencontrées par les apprenants.

1) Les symboles et des formules chimiques font l'objet de diverses interprétations. Le symbole chimique est parfois considéré comme une simple abréviation du terme de nomenclature alors qu'il présente une richesse sémantique remarquable. Certains élèves éprouvent d'ailleurs des difficultés à choisir la signification qui corresponde à une situation donnée.
2) L'« interprétation additive » est un raisonnement qui a des conséquences importantes sur la conceptualisation en chimie. Nous décelons deux implications majeures. D'une part, l'interprétation additive rend une image erronée d'un corps pur composé, comme étant constitué de la juxtaposition de corps purs simples inchangés. D'autre part, le concept de réaction chimique se voit transformé par l'interprétation additive : les réactifs s'agglomèrent pour former des produits. Dans ce cas, la rupture des liaisons initiales chez les réactifs est niée. Seules de nouvelles liaisons sont formées.
3) Les significations de l'indice sont essentielles pour interpréter et construire une formule chimique. Citons le cas de la confusion de l'indice avec la valence : elle influence le repérage de la charge ionique, la composition moléculaire ou empirique, ainsi que l'identification ou la réalisation de schémas particulaires. De plus, l'interprétation du sens de l'indice découle d'une définition trop élargie de la

[22] $3C + 8S \longrightarrow 3CS_2 + 2S$

molécule à tout assemblage d'éléments au détriment des corps ioniques. L'indice devient alors uniquement un rapport de combinaison atomique au sein d'une molécule.

4) La distinction entre indice et coefficient a un impact considérable sur l'équation de réaction, notamment pour le dénombrement des atomes lors de la démarche de pondération. Pour de nombreux élèves, les concepts d'atome et de molécule ne sont pas clairement établis. Or, il apparaît que les apprenants conçoivent des appariements de type indice/atome et coefficient/molécule, qui guident leur lecture de l'équation chimique. Enfin, le concept même de réaction chimique est dépendant de la distinction entre les chiffres qui indiquent la composition moléculaire, ainsi que des chiffres qui indiquent la proportion de réaction.
5) Les significations du coefficient stœchiométrique sont très variées. Pour de nombreux jeunes apprenants, la confusion règne autour du rôle joué par le coefficient : nombre de molécules ? Nombre de symboles ? Proportion ? Nombre de moles ? L'indice présent dans les formules moléculaires perturbe encore davantage l'interprétation et l'utilisation correcte du coefficient.
6) La représentation particulaire d'une équation chimique (avec un réactif en excès ou non) est une tâche qui pose de grandes difficultés aux élèves et étudiants. La tâche est complexe en ce qu'elle implique l'interprétation d'une représentation symbolique donnée dans le but de construire une nouvelle représentation.

2.5. CONCLUSIONS

Les difficultés rencontrées par les élèves et les étudiants quand ils sont confrontés à la symbolique chimique ont fait l'objet de nombreuses recherches dont nous avons exposé les principaux résultats. Nous avons souhaité dessiner un panorama suffisamment large des confusions, incompréhensions et autres significations incorrectes telles qu'elles sont relevées dans les publications en langues française et anglaise. La synthèse de ces difficultés a permis d'énoncer six axes fondamentaux sur lesquels nous baserons nos analyses dans les prochains chapitres de cet ouvrage. Nous établissons le constat que la question du sens chimique des signes employés (symbole chimique, indice, coefficient, etc.) semble constituer le noyau du problème.

Il est essentiel d'enquêter sur les sources de ces difficultés en interrogeant plusieurs autres facettes de l'équation chimique : sa facette conceptuelle, sa facette linguistique et sa facette épistémologique. Le chapitre 3 aura pour vocation de déterminer les liens qui existent entre l'écriture symbolique et les concepts chimiques macroscopiques et microscopiques. Le chapitre 4 se centrera sur l'analyse linguistique de la symbolique chimique, en la différenciant des autres modes de représentation utilisés dans l'enseignement-apprentissage de la chimie. Ce chapitre permettra entre autres de tisser des liens de nature linguistique entre la symbolique chimique et les schémas

particulaires. Le chapitre 5 décrira l'évolution de l'écriture de l'équation chimique (et donc des formules chimiques) dans l'histoire de la chimie. Dans ce chapitre, les différentes significations entourant le symbole chimique, l'indice et le coefficient seront notamment clarifiées. Le chapitre 6 confrontera la symbolique chimique à la langue française, via le prisme de ce que nous avons appelé l'« analogie de l'alphabet ». Ces analyses conceptuelles, épistémologiques et linguistiques seront autant de grilles d'exploitation des tests pratiques développés dans les chapitres terminaux.

Chapitre 3

La symbolique chimique dans les théories des niveaux de savoir relatifs à l'enseignement-apprentissage de la chimie

It is maybe philanthropic and evangelical on our part to want to share it with our fellow creatures, but it is arrogant to suggest that everybody wants or needs a knowledge of science to live happily in a scientific society[1].

Johnstone (1991, p.77)

Malgré la remarque philosophique de Johnstone, les formules chimiques et les équations de réaction sont actuellement considérées comme des jalons essentiels de l'apprentissage de la chimie dans l'enseignement secondaire en Belgique francophone (voir chapitre 1). Le chapitre 2 nous a permis de montrer que de nombreuses difficultés étaient associées à l'apprentissage de la symbolique chimique et à leur exploitation postérieure dans les tâches de résolution de problèmes qualitatifs et quantitatifs. Une de ces difficultés est liée à la polysémie de certains symboles comme le coefficient stœchiométrique : celui-ci est connecté à des concepts relevant de l'échelle macroscopique (quantité de matière, proportion) ainsi que de l'échelle microscopique (nombre de molécules, nombre d'atomes). La symbolique chimique doit dès lors occuper une place centrale dans les théories des niveaux de savoir en chimie, catégories qui rendent compte de l'articulation des connaissances chimiques du point de vue du processus d'enseignement-apprentissage.

Ces dernières années, ces niveaux « de savoir », « de pensée », appelés également « d'interprétation », « de représentation », voire même « d'enseignement » selon les auteurs, font l'objet de discussions dans la communauté des chercheurs en didactique de la chimie (Gilbert et Treagust, 2009 ; Kermen et Méhaut, 2009 ; Talanquer, 2011 ; Taber, 2013). Nous ferons ici une analyse approfondie des propositions de chaque auteur depuis le premier triangle de la chimie (« chemistry triplet »), créé par Johnstone en 1982, en vue d'en tirer les apports les plus pertinents pour notre recherche. Nous utiliserons les termes « niveaux de savoir » pour décrire une théorie des niveaux de façon générale. Dans le cas d'une théorie particulière, nous utiliserons le terme employé par son contributeur. Enfin, nous utiliserons les termes « formules et équations chimiques » quand nous ferons référence aux formules chimiques et aux équations de réaction. Nous excluons donc de la catégorie « formules et équations chimiques », les représentations de la structure des molécules (type représentation de Cram, projection

[1] « Il est peut-être philanthropique et évangélique de notre part de vouloir partager avec nos semblables (le savoir scientifique), mais il est arrogant de suggérer que tout le monde a besoin ou désire des connaissances scientifiques pour vivre heureux dans une société scientifique » (traduction libre).

de Newman ou formule semi-développée plane)[2]. Sur ces bases, nous posons trois questions de recherche :

1) quelle est l'évolution des théories des niveaux de savoir de 1982 à nos jours ? Quelles critiques majeures ont provoqué l'évolution des modèles ?
2) Quelle est la place (du point de vue de leurs fonctions et relations avec les autres niveaux) des formules et équations chimiques dans ces théories des niveaux de savoir ?
3) Dans quelle mesure les théories des niveaux de savoir fournissent-elles des grilles d'analyse des difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique ?

Les informations relatives à la position et au statut des formules et équations chimiques sont résumées dans un point dédié, à la fin de chaque sous-section.

3.1. JOHNSTONE ET LE « CHEMISTRY TRIPLET »

3.1.1. Le « chemistry triplet » de 1982

Le modèle des niveaux de savoir de Johnstone est né d'une interrogation majeure au début des années 80 : « Pourquoi la chimie est-elle si difficile à apprendre[3] ? ». Johnstone pose trois hypothèses qui expliqueraient ce phénomène (Johnstone, 1984) :

1) la chimie en elle-même présente une nature difficile d'accès.
2) La façon dont on enseigne la chimie fait émerger des problèmes.
3) La façon dont les élèves apprennent la chimie entre en conflit avec les deux premiers points.

Les pratiques enseignantes et le processus d'apprentissage seraient particulièrement peu adaptés l'un à l'autre, ce qui peut générer, entre autres, des surcharges de la mémoire de travail chez les élèves et les étudiants. Le professeur, dont la structure cognitive est déjà construite et opérationnelle, ne se rend pas toujours compte que l'élève doit à la fois analyser l'information qui lui est délivrée, et l'organiser en l'intégrant dans son propre réseau de connaissances. Ce double travail peut provoquer à court terme un apprentissage par cœur des définitions conceptuelles, l'intégration dans le réseau de connaissances n'ayant pas eu le temps nécessaire pour s'établir. Johnstone juge ainsi fondamental de s'interroger sur les trois hypothèses en corrélation. Il s'est donc consacré à la description de la nature de la chimie, sous le regard conjoint de l'enseignant et de l'élève.

[2] Ce choix sera abondamment justifié dans le chapitre 4.

[3] Il est intéressant de noter, à ce sujet, qu'une publication récente (« Chemistry : why the subject is difficult ? » [Cardellini, L., 2012]) porte un titre très proche de la problématique générale traitée par Johnstone à l'époque, ce qui indique que la question reste encore et toujours d'actualité, trente ans plus tard.

Dans sa publication fondatrice de 1982, Johnstone décrit trois niveaux de pensée (« levels of thought » ou « multi-level thought ») selon lesquels on peut aborder la chimie :

> There is the level at which we can see and handle materials, and *describe* their properties in terms of density, flammability, colour and so on. […] A second level is the *representational* one in which we try to represent chemical substances by formulae and their changes by equations. This is part of the sophisticated language of the subject. The third level is atomic and molecular, a level at which we attempt to *explain* why chemical substances behave the way they do[4].

Cette première proposition se base sur une distinction de fonction entre les trois niveaux : le premier sert à décrire, le deuxième à représenter, le troisième à expliquer. Johnstone y joint des éléments linguistiques qui permettent d'identifier les niveaux. Le niveau de description est caractérisé par des propriétés observables (comme la couleur). Le niveau de représentation s'articule autour des formules et des équations, mais aussi d'autres modes de représentations comme les graphiques (Johnstone, 2000). Le niveau d'explication concerne le comportement des atomes et des molécules, sans que Johnstone ne précise selon quels modes de communication sont véhiculés les concepts. Dans cette publication, les buts de Johnstone sont clairement établis : il s'agit bien à la fois de modéliser la conceptualisation de l'étudiant pendant son apprentissage (« learning processing »*)* ainsi que de réguler l'enseignement par le professeur (« teaching monitoring »*)*. L'existence de ces deux axes conjoints a certainement facilité l'exploitation des niveaux de savoir dans les formations d'enseignants et dans de nombreuses recherches en didactique.

3.1.2. Le « chemistry triplet » de 1991

En 1991, Johnstone propose une version différente du « chemistry triplet », et c'est cette version qui a été particulièrement utilisée dans les recherches en didactique de la chimie durant ces vingt dernières années (figure 1). On y distingue les trois niveaux de pensée, sous d'autres noms : le niveau macroscopique, le niveau (sub)microscopique et le niveau symbolique. Johnstone associe ainsi le niveau macroscopique au niveau descriptif, le niveau submicroscopique au niveau explicatif et le niveau symbolique au niveau représentationnel (Talanquer, 2011).

[4] « Il y a le niveau auquel on peut voir et manipuler la matière, et *décrire* ses propriétés en termes de densité, inflammabilité, couleur, etc. (…) Un deuxième niveau est le niveau *représentationnel* dans lequel nous essayons de représenter les substances chimiques par des formules, et leurs transformations par des équations. Cela constitue une partie du langage sophistiqué de la discipline. Le troisième niveau est atomique et moléculaire, un niveau auquel nous essayons d'*expliquer* pourquoi les substances chimiques se comportent d'une certaine manière » (traduction libre de Johnstone, 1982, p. 377). Nous reproduisons les mots en italique du texte d'origine.

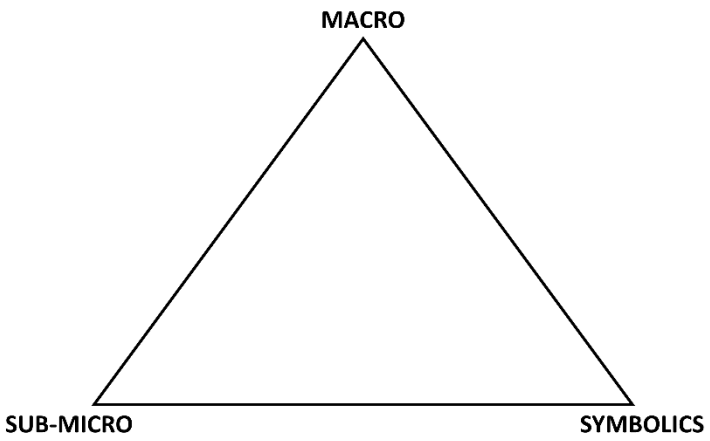


Figure 1. Triangle de Johnstone (ou « chemistry triplet ») représentant les trois niveaux de pensée (« levels of thought ») en chimie : macroscopique, submicroscopique et symbolique (Johnstone, 1991).

Ce modèle des niveaux de pensée entre en résonance avec d'autres modèles décrivant, quant à eux, les relations entre le monde empirique et le monde des modèles :

- Selon Tiberghien *et al.* (1995), on peut considérer trois niveaux dans l'activité scientifique : le niveau théorique, le niveau des modèles et le niveau empirique. Le modèle joue ici le rôle de médiateur en formalisant le champ empirique et en fournissant une interprétation au champ théorique.
- Selon Martinand (1996), le registre du référent empirique est à distinguer du registre des modèles. Les modèles sont à la fois les produits des référents empiriques (via une démarche phénoménographique) et des outils permettant l'explication de phénomènes empiriques (via une démarche phénoménologique), notamment par l'entremise d'un monde simulé.
- Selon Le Maréchal (1999), il existerait deux niveaux : le monde perceptible et le monde « reconstruit » (qui est ici l'équivalent du monde simulé, présent dans le modèle de Martinand).

En reliant ces propositions au « chemistry triplet » de Johnstone émerge l'idée que le niveau macroscopique s'inscrit dans le monde perceptible, empirique, phénoménologique tel que décrit par Tiberghien, Martinand et Le Maréchal. D'un autre côté, les niveaux submicroscopique et symbolique, de par leur dimension plus explicative et représentationnelle, s'inscrivent dans le monde des modèles, ou monde « reconstruit ».

3.1.3. Quatre couches de structuration

On peut ainsi discerner, au bout de ce processus de création et de formulation, quatre couches qui structurent le « chemistry triplet » de Johnstone :

1) Une couche basée sur la dichotomie concret/abstrait qui régit également les niveaux de pensée : le niveau macroscopique est inscrit dans le concret, le niveau symbolique est par définition le produit d'une abstraction, le niveau submicroscopique étant un niveau hybride qui traite à la fois d'entités réelles (donc concrètes) mais invisibles (donc sujettes à une démarche d'abstraction).
2) Une couche basée sur la dichotomie registre empirique/registre des modèles : le niveau macroscopique occupe tout le champ empirique, alors que les niveaux submicroscopique et symbolique appartiennent au monde des modèles.
3) Une couche basée sur la fonction jouée par chaque niveau (descriptif, explicatif ou représentationnel). Le niveau macroscopique joue un rôle de description du phénomène chimique ; le niveau submiscroscopique joue un rôle explicatif en référence aux entités qui constituent la matière ; le niveau symbolique sert à représenter les concepts, objets et événements convoqués dans les deux autres niveaux.
4) Une couche basée sur les éléments linguistiques ou les modes de communication permettant d'identifier les niveaux. Par exemple, le niveau symbolique est caractérisé par l'usage des formules et équations chimiques.

Ces quatre couches sont autant d'interprétations possibles du « chemistry triplet ». Il existe donc, selon le point de vue du chercheur, plusieurs possibilités d'usage des niveaux de pensée. Cette force apparente est pourtant également le point faible du système en ce qu'elle nécessite la clarification des relations entre les quatre couches du « chemistry triplet ».

3.1.4. Un schéma global

Dans le cadre d'une recherche sur la communication pédagogique au cours de sciences à l'université, Houart (2009) a synthétisé ces quatre couches en un schéma global (figure 2). Les niveaux sont ici appelés « niveaux de savoir ». Cette version de la théorie des niveaux de savoir constituera notre référence, à partir de laquelle seront comparées les autres versions du « chemistry triplet » proposées dans la littérature au début des années 2010.

Dans ce schéma global, il faut comprendre que :

- Les trois niveaux coexistent intimement dans l'étude des structures moléculaires et des transformations, et ce afin d'assurer une communication efficiente entre chimistes. Chaque niveau de savoir possède ses caractéristiques propres.
- Le niveau macroscopique est associé à l'expérimentation et recouvre ce que l'on peut appeler le monde « perceptible ». À ce niveau, il est possible d'effectuer des descriptions qualitatives et quantitatives sur base d'observations, et de préciser

des changements de propriétés chez les composés chimiques de début et de fin de réaction. Ce niveau, aussi appelé « phénoménologique », constitue donc la première étape dans l'approche de la chimie : l'observable par l'expérience (Houart, 2009).

- Les deux autres niveaux appartiennent pour leur part à ce que l'on peut appeler le monde « reconstruit » et s'inscrivent de ce fait dans le domaine de la modélisation. Les molécules et atomes étant invisibles à l'œil nu, il est nécessaire de proposer des représentations susceptibles d'expliquer au mieux les observations macroscopiques et capables d'être comprises par la communauté scientifique. Si le niveau microscopique se caractérise par le recours à la représentation iconique des molécules, atomes et ions via des modèles divers (modèles grossissant à trois dimensions, dessins, animations, etc.), le niveau symbolique se base quant à lui sur un véritable langage chimique et mathématique dont les principaux représentants sont les formules et équations chimiques.
- Ces représentations, bien que porteuses d'informations, ont par définition un champ de validité limité, qu'il est important d'expliciter en des termes intelligibles pour l'apprenant.

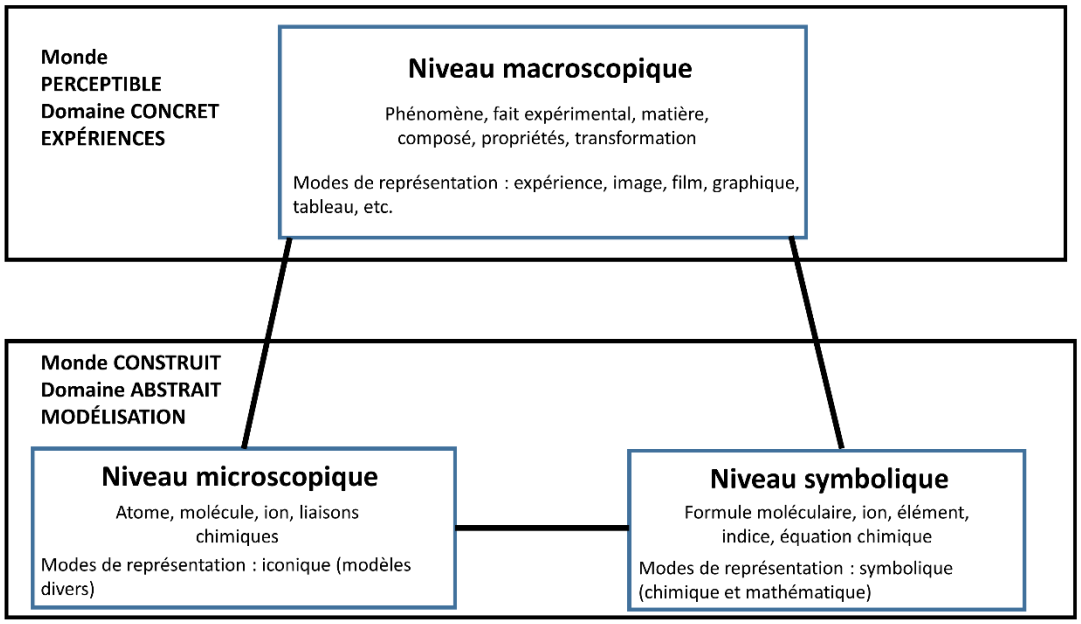


Figure 2. Représentation des trois niveaux de savoir de la chimie (version du « chemistry triplet »), de leurs modes de représentation et de leurs connexions (d'après Houart, 2009).

3.1.5. Applications dans les recherches en didactique

Plusieurs pistes de réflexion ou recommandations dans le cadre de l'enseignement, initialement proposées par Johnstone, et reprises par de nombreux autres auteurs (citons

Treagust *et al.*, 2003 ; Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006 ; Davidowitz et Chittleborough, 2009), ont mené à d'intenses recherches dans le champ didactique. D'une part, le professeur doit éviter de présenter un concept en usant simultanément des trois niveaux de savoir (« It is psychological folly to introduce learners to ideas at all three levels simultaneously[5] », Johnstone, 2000). L'élève, contrairement au professeur, éprouverait en effet des difficultés à circuler entre les différents niveaux. D'autre part, plus un concept est utilisé dans les trois niveaux de savoir, plus ce concept est susceptible d'être retenu à long terme et relié correctement à d'autres concepts (Tiberghien *et al.*, 1995). Il faudrait donc explorer, pour un concept donné, les trois niveaux avec les élèves, mais en tenant compte de la difficulté qu'éprouvent effectivement ceux-ci à circuler entre les trois niveaux quand ils sont présentés simultanément.

Ces deux recommandations ont donné lieu à des recherches variées, avec à la clé, entre autres, l'analyse des difficultés didactiques éprouvées par les apprenants et la critique de dispositifs didactiques proposés dans les manuels scolaires (Gabel, 1993, 1998, 1999 ; Chittleborough et Treagust, 2007 ; Houart, 2009 ; Dehon et Snauwaert, 2011). Il apparaît par exemple que, dans le cours de chimie, les professeurs se concentrent sur la relation entre le niveau microscopique et le niveau symbolique, délaissant le sommet macroscopique du triangle (Talanquer, 2011). Nous avons également montré précédemment comment les nouveaux programmes de chimie concentrent principalement les significations de la symbolique chimique au niveau microscopique, et aux règles de représentation internes au système (voir chapitre 1).

Nous avons souligné que, dans son ouvrage, Houart utilise le terme « niveau de savoir ». En fait, depuis 1982, les pointes du triangle ont été nommées de diverses façons, souvent par Johnstone lui-même. De 1982 à 2009, les niveaux inscrits dans le triangle ont ainsi été appelés niveaux « de pensée », « de savoir », « d'interprétation », de « description » voire même « d'enseignement » selon les auteurs (Johnstone, 1982, 1991, 1993, 2006 ; Gabel, 1993 ; Houart, 2009). Certains auteurs vont jusqu'à remplacer le terme « niveau » par les termes « monde », « système » ou « mode » (Bodner, 1992 ; Johnstone 1993 ; Nakhleh et Krajcik, 1994). Cette cacophonie langagière nuit, in fine, à la compréhension des fondements du « chemistry triplet » et se trouve à la base de critiques importantes sur la validité et la fiabilité de celui-ci.

3.1.6. À propos des formules et équations chimiques

Dans le « chemistry triplet » de Johnstone et jusqu'en 2009, les formules et équations chimiques figurent au niveau symbolique. À ce titre, elles s'intègrent dans :

[5] « C'est de la folie – psychologiquement parlant – d'aborder, avec les apprenants, des idées simultanément sur les trois niveaux » (traduction libre).

1) Un niveau abstrait : les formules et équations chimiques sont, contrairement aux substances et aux molécules qui les composent, des constructions formelles, qui nécessiteront dès lors, pour les élèves, un lourd travail d'abstraction.
2) Un niveau de représentation : les formules et équations chimiques sont des moyens de représentation de substances (au niveau macroscopique), de molécules (au niveau microscopique) et de leurs transformations en d'autres substances/molécules. Une formule moléculaire comme « HCl » rend compte à la fois d'une substance chimique (chlorure d'hydrogène) et de la molécule qui compose la substance, constituée d'un atome d'hydrogène et d'un atome de chlore liés. Ce lien fort des formules et des équations chimiques avec les deux autres niveaux de savoir est fondamental dans le cadre de l'enseignement de la chimie.
3) Un niveau de modélisation aux fonctions discutées : les formules et équations chimiques appartiennent au monde des modèles. Elles sont le produit de l'analyse du registre empirique, du monde perceptible. De par leur statut de modélisation chez Johnstone, la fonction des formules et équations chimiques dépasse la simple fonction représentative. Chez certains auteurs, la symbolique chimique permet également de décrire et d'expliquer certains phénomènes empiriques (comme des transformations chimiques), d'en prédire d'autres (via les équations de réaction, points de départ des simulations quantitatives).
4) Un niveau symbolique au contenu flou et complexe : les formules et équations chimiques ne sont pas les seuls éléments peuplant le niveau symbolique. Certains auteurs (comme Johnstone et Houart) y ajoutent les symboles mathématiques ou de grandeurs permettant d'énoncer des relations quantitatives (par exemple, « P.V = n.R.T »). Les graphiques, tableaux de données et autres diagrammes sont également parfois classés dans le niveau symbolique. D'autres auteurs considèrent également que les représentations de la structure des molécules (comme une représentation semi-développée plane) sont à associer à la fois aux niveaux symbolique, submicroscopique et macroscopique (Grosholz et Hoffman, 2000). Ces incertitudes sur le contenu et le statut du niveau symbolique ont eu des conséquences importantes sur les autres théories des niveaux de savoir proposées à partir de 2009.

3.2. Le « triplet relationship » de Gilbert et Treagust

3.2.1. Des types de représentation

Dans le premier chapitre de leur livre *Multiple Representations in chemical education*, Gilbert et Treagust (2009) posent les bases d'une nouvelle interprétation du « chemistry triplet » de Johnstone, sous le nom de « triplet relationship ». Les niveaux de

pensée/savoir deviennent ainsi des « types de représentations », inscrits dans le même triangle que celui proposé par Johnstone. L'argument majeur des auteurs est qu'il devient nécessaire, devant la profusion de termes utilisés dans la littérature scientifique, de fixer à nouveau un cadre qui fasse autorité. Ils proposent ainsi trois noms et trois contenus spécifiques pour leurs trois types de représentation :

- Le premier type de représentation est appelé « macro ». Il a pour but de représenter le phénomène expérimenté avec les sens (ou sens étendus). Ce niveau comprend les représentations des propriétés empiriques des solides, liquides, colloïdes, gaz, etc. Ces propriétés sont perceptibles dans les laboratoires et le monde quotidien, et peuvent donc être mesurées : masse, densité, pH, température, etc.
- Le deuxième type de représentation est appelé « sub-micro ». Il cherche à donner une explication qualitative du phénomène visé. La large variété de modèles représentant des entités trop petites pour être vues au microscope optique (atomes, ions, molécules) permet, par exemple, de décrire les solides en termes d'atomes ou de molécules ordonnées ; un changement de propriétés chimiques peut être expliqué par une variation de la densité électronique, etc. Un mode de représentation en deux dimensions (diagrammes, graphes) ou en trois dimensions (« space-filling » ou « ball and stick ») rend possible la communication de ces descriptions.
- Le troisième type de représentation est appelé « symbolique ». Il tend à donner une explication quantitative au phénomène ciblé. Ce niveau implique des symboles pour représenter les atomes (éléments ou groupements), des signes pour représenter la charge électrique, des indices pour indiquer le nombre d'atomes dans un ion ou une molécule, ou des lettres pour indiquer l'état physique de l'entité. Ces représentations peuvent être incluses dans des équations chimiques et ioniques par l'utilisation du coefficient stœchiométrique, afin de montrer la conservation de la masse pendant une réaction chimique. Ce niveau de représentation peut aussi être utilisé en association avec le premier et le deuxième niveau.

3.2.2. Critiques du « triplet relationship »

Au regard du modèle de Gilbert et Treagust, on peut émettre deux critiques.

1) La nature et la fonction du niveau (ou type de représentation) symbolique restent discutables sur plusieurs points. D'abord, le terme « représentation » pose la question du statut du niveau symbolique, représentationnel par nature, depuis sa définition par Johnstone en 1982. En 2011, dans un article qui retrace une partie de l'évolution des théories des niveaux de savoir en chimie, Talanquer énonce

ainsi l'interrogation suivante : comment un niveau représentationnel se distingue-t-il des deux autres niveaux si ceux-ci sont également des niveaux (ou types) de représentation ? Ensuite, l'appartenance d'une représentation donnée au seul niveau symbolique ne rend pas compte des multiples significations potentielles dans les autres niveaux de savoir de Johnstone : une formule moléculaire n'est-elle pas porteuse de significations concernant les niveaux submicroscopique et macroscopique ? Une représentation symbolique comme une formule chimique n'est-elle pas également, et intrinsèquement, une représentation d'une entité microscopique ? Enfin, le terme « symbolique » contraint, par sa lourde charge sémantique, à considérer les formules et équations chimiques (ainsi que les symboles mathématiques) comme uniques composants du niveau éponyme. Or, le contenu du niveau symbolique reste variable en fonction des auteurs qui en proposent une description.

2) Le terme « représentation » entraîne une deuxième confusion énoncée clairement par Talanquer (2011) : « Dans quelle mesure le niveau macro, constitué d'objets visibles et tangibles, peut être appelé une représentation ? ». Il est bien question, ici, de s'interroger sur la notion même de « représentation » : doit-on considérer le niveau macro comme un niveau de modélisation – auquel cas le niveau macro serait à distinguer du référent empirique de Martinand ? Doit-on, alors, considérer que toute dénomination d'objets macroscopiques constitue de fait une « représentation » et que, dès lors, le référent empirique existe tant qu'il n'est pas nommé par un terme spécifique à la chimie ? Pour le dire autrement, observer un métal qui réagit avec un acide, sans en identifier formellement les protagonistes, ferait partie du monde empirique. Mais dire (ou écrire) qu'il s'agit là d'un métal, d'une réaction et d'un acide, constitue déjà une modélisation du phénomène empirique, et génère donc une représentation. Cette coexistence de deux niveaux différents (un niveau empirique et un niveau de modélisation macroscopique) à l'intérieur du niveau macro de Gilbert et Treagust (et, par extension, de Johnstone), met à mal la distinction entre monde perceptible et monde reconstruit présente, par exemple, dans le schéma global de Houart.

3.2.3. À propos des formules et équations chimiques

Dans le « triplet relationship » de Gilbert et Treagust, les formules et équations chimiques figurent également au niveau symbolique. Même si elles se retrouvent dans le même niveau que dans le « chemistry triplet » de Johnstone, on observe deux grandes différences.

1) Le rôle représentationnel que Johnstone assignait au seul niveau symbolique est désormais partagé par l'ensemble des trois niveaux. Ce qui caractérise désormais

le niveau symbolique est sa fonction d'explication quantitative : les formules et équations chimiques servent à déterminer des grandeurs en relation avec le phénomène considéré. On observe donc une projection de la fonction explicative des modèles submicroscopiques (selon Johnstone) sur les représentations symboliques qui les traduisent (selon Gilbert et Treagust).

2) Les formules et équations chimiques semblent constituer à elles seules le niveau symbolique, les autres modes de communication étant dispersés dans les autres niveaux. Dans leur chapitre introductif, Gilbert et Treagust insistent bien sur les signes et symboles qui constituent potentiellement une équation de réaction, sans citer aucun autre mode de communication. Cette modification du contenu du niveau symbolique constitue une restriction par rapport au « chemistry triplet » de Johnstone.

3.3. LE TÉTRAÈDRE DE KERMEN ET MÉHEUT

3.3.1. Un niveau macroscopique scindé

En 2009, Kermen et Méheut proposent une représentation qui rompt avec le triangle classique de Johnstone. Conscientes des problèmes entourant le contenu du niveau macroscopique, elles scindent ce dernier en deux parties distinctes : un niveau empirique et un niveau de modélisation macroscopique (figure 3).

On l'a vu, le niveau macroscopique ne peut être considéré comme uniquement empirique. En effet, de nombreux objets peuvent être considérés à la fois comme des constructions conceptuelles et comme des objets empiriques. C'est le cas, par exemple, d'une « substance » qui peut être soit caractérisée au niveau empirique (via des termes issus de la langue ordinaire), soit caractérisée comme un concept macroscopique (à l'aide de termes de la nomenclature chimique ou d'autres concepts de chimie, comme les propriétés de la substance). Plus encore, il s'agit ici de distinguer le monde empirique et perceptible (qui fait l'objet d'une description) du monde des modèles dont les fonctions sont plus larges : décrire (à l'aide de concepts plus formalisés), expliquer et prédire.

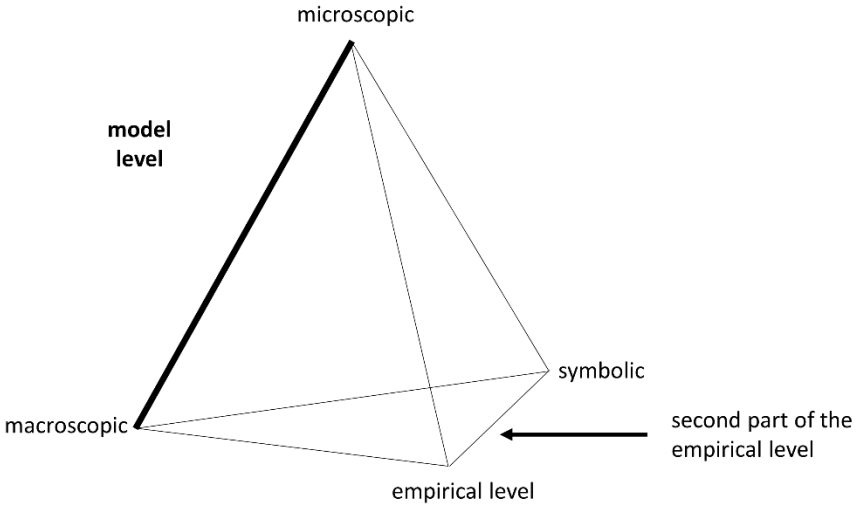


Figure 3. Tétraèdre représentant quatre niveaux de savoir en chimie : empirique, macroscopique, microscopique et symbolique (Kermen et Méheut, 2009).

Mais les auteures sont conscientes d'un autre problème. Pour décrire un phénomène comme l'oxydation du zinc dans une solution de sulfate de cuivre (II), on peut opérer de deux manières différentes, que Kermen et Méheut qualifient de première et seconde description du niveau empirique :

- la première description du niveau empirique se base sur l'utilisation de termes qui ne sont pas spécifiquement des concepts chimiques : « Un morceau de fil gris est plongé dans un liquide bleu. Après un certain temps, le fil se couvre d'un solide rosé, et le liquide devient quasiment incolore. »
- La seconde description du niveau empirique se base sur l'utilisation de concepts chimiques, comme les espèces chimiques, les formules chimiques, la quantité de matière : « Un fil de zinc est plongé dans une solution aqueuse de sulfate de cuivre (II). Après un certain temps, le cuivre métallique apparaît et les ions cuivriques disparaissent. »

La seconde description du niveau empirique (qui peut prendre la forme de représentations symboliques comme des formules chimiques) pose de sérieux problèmes de justification. Kermen et Méheut ne nient pas que cette seconde description du phénomène soit déjà, dans un sens, un stade d'interprétation ou de représentation, et qu'elle pourrait être considérée, à ce titre, comme relevant de la modélisation du phénomène. Néanmoins, citant Martinand (2002), elles précisent :

> People using this description are not aware that it is the result of an earlier conceptualization or abstraction of the real world. They use it as if it were reality.

> Therefore let us consider that this description belongs to the empirical level and is also an observation of what happens[6].

On le voit, c'est l'intention qui est jugée : les personnes utilisant un vocabulaire spécifique à la chimie pour décrire le phénomène observé n'auraient aucune intention d'explication ou d'interprétation de celui-ci ; les modèles employés (zinc, sulfate, solution, ions, etc.) ne le seraient que dans une visée descriptive, comme s'ils constituaient la « réalité ». Cependant, dans l'exemple de l'oxydation du zinc par le sulfate de cuivre (II), il nous semble difficile de maintenir que la « disparition des ions cuivriques » ne constitue qu'une description (plus chimique, certes) du phénomène observé. Il est tout aussi défendable de voir plutôt dans ces termes une première interprétation du phénomène chimique observé, à l'aide de modèles microscopiques et macroscopiques. Selon cette approche, la seconde description du niveau empirique, telle que proposée par Kermen et Méheut, serait ainsi à déplacer sur les autres niveaux de modélisation et de représentation.

3.3.2. Rôle des modes de communication

Un commentaire des auteures au sujet de ce tétraèdre décrit la place des modes de communication dans leur théorie des niveaux de savoir :

> If a teacher describes what happens on the bench in terms of colour changing or a pH measurement, he/she is around the 'empirical level' corner. If he/she speaks of chemical reaction without any chemical formula, he/she is moving to the 'macroscopic' corner, and if he/she speaks of chemical reaction with chemical formula he/she shifts along the 'macroscopic-symbolic' side. When a teacher uses an animation to visualize the microscopic model and describes what is going on, he/she is around the 'microscopic' apex. If he/she interprets what happens in this visualization with the equation of an elementary chemical reaction, then he/she shifts along the side to the 'symbolic' apex[7].

Les auteures distribuent les modes de communication sur les sommets et les arêtes du tétraèdre. Ainsi, le niveau symbolique semble être réduit aux formules et aux équations

[6] « Les personnes utilisant cette description ne sont pas conscientes qu'elle est le résultat d'une conceptualisation ou d'une abstraction préalable du monde réel. Elles l'utilisent comme si c'était la réalité même. Donc, nous considérerons que cette description appartient au niveau empirique, et constitue aussi une observation de ce qu'il se passe » (traduction libre de Kermen et Méheut, p. 26).

[7] « Si un professeur décrit ce qu'il se passe sur la paillasse en termes de changement de couleur ou de mesure de pH, il/elle est autour du sommet correspondant au niveau empirique. S'il/elle parle de réaction chimique sans aucune formule chimique, il/elle se déplace vers le sommet correspondant au niveau macroscopique, et s'il/elle parle de réaction chimique avec des formules chimiques, il/elle se déplace le long de l'arête reliant le niveau macroscopique au niveau symbolique. Quand un professeur utilise une animation pour visualiser le modèle microscopique et décrit ce qui se déroule, il/elle est autour du sommet correspondant au niveau microscopique. S'il/elle interprète ce qu'il se passe dans cette visualisation avec l'équation d'une réaction chimique élémentaire, il/elle se déplace vers le niveau symbolique » (traduction libre de Kermen et Méheut, p. 28).

chimiques. Le recours à des animations comprenant des représentations moléculaires serait, lui, lié au niveau microscopique. Plus spécifiquement, « parler » de réaction chimique confinerait au niveau macroscopique[8], quand exprimer le résultat d'une expérience en parlant de changement de couleur ou de mesure de pH relèverait du niveau empirique. Plus encore qu'une catégorisation en niveaux de savoir, Kermen et Méheut proposent, en creux, une catégorisation en niveaux de langage. Le passage à un autre mode de communication est ainsi capable de faire basculer d'un niveau de savoir à un autre. On retrouve cette idée chez Gilbert et Treagust (2009), sans une description aussi précise.

3.3.3. Connexions entre le niveau symbolique et les autres niveaux

Si le niveau symbolique semble emprunté au modèle de Gilbert et Treagust, les connexions entre le niveau symbolique et les autres niveaux se voient modifiées par l'insertion du niveau empirique. Ainsi, la relation entre le niveau symbolique et le niveau empirique est maintenant distincte de la relation entre le niveau symbolique et le niveau de modélisation macroscopique. Ces nouvelles interactions posent question : en quoi l'équation de réaction peut-elle décrire le niveau empirique sans emprunter aux concepts macroscopiques ou microscopiques dont elle assume la représentation ? En effet, la mobilisation des concepts macroscopiques et microscopiques de substances, corps purs, molécules, atomes est indispensable à l'écriture d'une équation chimique.

Ainsi, le lien empirique-macroscopique connecte le monde tangible et le monde des concepts macroscopiques, selon une démarche que l'on peut qualifier de « modélisation ». Mais si le lien empirique-symbolique implique cette même démarche de modélisation, il se double d'un changement langagier, délicat pour les élèves. En conséquence, la relation empirique-symbolique ne peut être considérée sur un même plan que la relation empirique-macroscopique. Nous en déduisons que le niveau empirique peut être décrit selon trois voies différentes :

- directement via l'usage de la langue ordinaire (par exemple, le français) sans référence aucune (si cela est possible) aux modèles macroscopiques ou submicroscopiques chimiques. On se situe alors pleinement sur la pointe du triangle correspondant au niveau empirique dans le tétraèdre de Kermen et Méheut.
- Directement via des concepts macroscopiques et submicroscopiques essentiellement descriptifs, comme les concepts de substances ou d'états de la matière, ainsi que via l'usage d'un vocabulaire technique (erlenmeyer, bec

[8] Ce qui n'est pas correct selon les programmes de chimie en FWB (voir chapitre 1). Pour rappel : selon ces programmes, la transformation chimique renvoie au niveau macroscopique alors que la réaction chimie est associée au niveau microscopique.

Bunsen, etc.). On se situe alors sur l'arête du triangle reliant le niveau macroscopique (ou submicroscopique) au niveau empirique.

- Indirectement via des représentations de ces concepts macroscopiques et microscopiques : équation de réaction, formules brutes, formules développées planes, etc.

Selon cette approche, il n'existe pas de relation directe entre niveau symbolique et niveau empirique : les formules et équations chimiques offrent en fait une autre représentation de la même relation, entre le niveau empirique et les niveaux macroscopique et submicroscopique.

On voit ici l'importance du mode de communication convoqué. De l'usage de la langue ordinaire à celui de la langue symbolique, en passant par un vocabulaire plus technique ou plus conceptuel, il s'opère un décalage de plus en plus grand entre les observations au niveau empirique et les signes composant le niveau symbolique, jusqu'à saper l'hypothèse d'une relation présumée directe entre ces deux niveaux.

3.3.4. Le niveau symbolique comme représentation des modèles

Enfin, dans la figure 3, on observe que le niveau des modèles (« model level ») se limite aux seuls niveaux macroscopique et microscopique. Le niveau symbolique ne serait donc plus un niveau de modélisation : il sert à « nommer et décrire les différents composants des modèles macroscopique et microscopique […] et décrire les phénomènes (deuxième description du niveau empirique) » (*ibid.*, p. 28). Cette étape dans la description du statut particulier du niveau symbolique est essentielle, en ce qu'elle prépare le travail de Taber (2013). Notons que le tétraèdre de Kermen et Méheut, a été exploité - sous le nom de « expended chemistry triplet » - dans une recherche portant sur l'analyse du discours de professeurs tunisiens (Dumon et Mzoughi-Khadraoui, 2014).

3.3.5. À propos des formules et équations chimiques

Dans le tétraèdre de Kermen et Méheut, les formules et équations chimiques figurent toujours au niveau symbolique. Deux différences majeures sont à relever avec les autres modèles présentés ci-avant.

- Les formules et équations chimiques sont désormais connectées à trois niveaux différents (empirique, macroscopique, microscopique) avec un rôle de description et de dénomination**.** Plus particulièrement, dans cette version des niveaux de savoir, la nouveauté réside dans le fait que les formules et équations chimiques peuvent servir également à décrire directement le monde perceptible, sans usage conscient de modèles explicatifs ou interprétatifs. La symbolique

chimique se voit ainsi clairement séparée des modèles chimiques dont elle constitue un type de représentation.

- La fonction d'explication quantitative n'est plus dévolue au niveau symbolique, comme dans le « triplet relationship » de Gilbert, mais bien aux niveaux macroscopique et submicroscopique représentés par les signes et symboles formant le niveau symbolique.

3.4. LE « CHEMISTRY KNOWLEDGE SPACE » DE TALANQUER

3.4.1. Un espace multi-dimensionnel

Talanquer a fourni en 2011 un article retraçant les différentes facettes et évolutions du « chemistry triplet » original de Johnstone, en insistant sur les problématiques entourant celui-ci, et dont certaines ont déjà été décrites supra : confusion terminologique, polysémie du terme « représentation », distinction entre registre empirique et registre des modèles, flou autour du contenu du niveau symbolique, etc. Il propose un modèle original des niveaux de savoir (qu'il appelle « types », comme Gibert et Treagust) assortis d'une série de facteurs, créant ainsi un espace multidimensionnel (figure 4).

Les trois types de savoir (« three main types of chemistry knowledge that is relevant for teaching[9] ») proposés par Talanquer sont :

1) Les expériences : ce type de savoir regroupe les descriptions des substances chimiques et des processus, qu'ils soient acquis directement (via nos sens) ou indirectement (via des instruments de mesure). Talanquer rapproche ce type de savoir d'une connaissance empirique des phénomènes chimiques.

2) Les modèles : ce type de savoir comprend les modèles théoriques présentant les trois fonctions classiques des modèles en sciences (décrire, expliquer, prédire). Talanquer regroupe donc les niveaux macroscopique et submicroscopique en un seul type. Cependant, un facteur d'échelle complémentaire permet également de rendre compte du caractère macroscopique ou microscopique des concepts évoqués.

3) Les visualisations : elles comprennent les signes visuels dynamiques et statiques, des symboles aux icônes, qui permettent l'élaboration et la communication des relations qualitatives et quantitatives relatives aux expériences et aux modèles.

[9] « Trois principaux types de savoir en chimie qui sont pertinents pour l'enseignement » (traduction libre de Talanquer, 2011, p. 187).

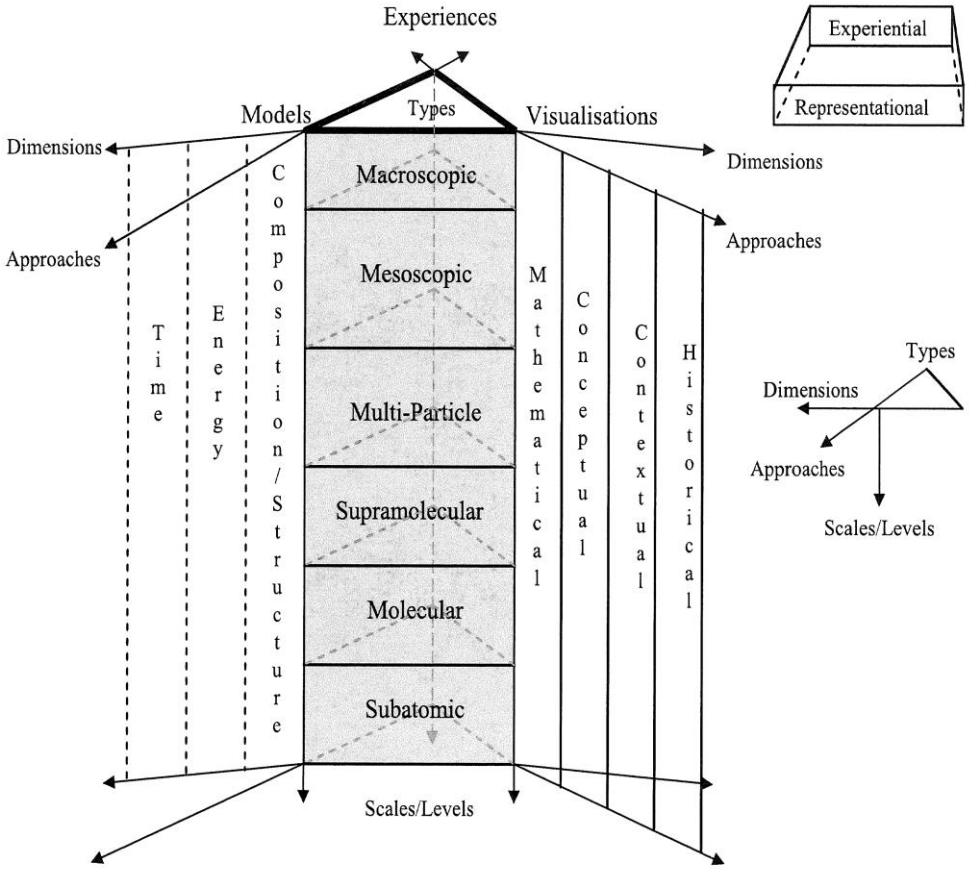


Figure 4. Schéma de la théorie des niveaux de savoir selon Talanquer (2011). Aux « types de savoir » sont ajoutés des facteurs divers (échelles, dimensions, approches) qui créent un espace multidimensionnel.

L'originalité du modèle de Talanquer réside dans l'apport de facteurs qui éclairent les différents types de savoir. Primo, le facteur d'échelle divise plus finement l'organisation de la matière en six catégories. Cette proposition dépasse la dichotomie macroscopique/(sub)microscopique, permettant ainsi une analyse plus rigoureuse des objets, entités ou processus chimiques. Secundo, le facteur dimensionnel rend compte des différentes facettes d'analyse d'une transformation chimique. Le professeur peut ainsi se centrer sur les modifications de composition et de structure, les transferts d'énergie et/ou les modifications en fonction du temps. Tertio, le facteur d'approche (de concepts chimiques, d'une manipulation expérimentale) constitue un autre choix que doit poser l'enseignant : selon que l'approche soit conceptuelle, mathématique, historique ou contextualisée, il convoquera des modèles et des visualisations différentes. Malgré ces apports indéniables, le modèle de Talanquer pèche par une trop grande complexité, ce qui en réduit la portée d'analyse dans les recherches en didactique de la chimie. À ce jour, nous n'avons d'ailleurs trouvé aucune recherche s'appuyant sur toutes les dimensions du « chemistry knowledge space » de Talanquer dans la littérature. Cependant, la triade expériences-modèles-visualisations a trouvé sa place

comme outil d'analyse dans quelques études (de Berg, 2012 ; Dumon et Mzoughi-Khadraoui, 2014).

3.4.2. À propos des formules et équations chimiques

Dans le modèle de Talanquer, les formules et les équations chimiques figurent dans un type de savoir appelé « visualisations ». Deux grandes différences sont à noter par rapport aux modèles précédents.

- Les formules et équations chimiques sont, comme chez Johnstone, regroupées avec les autres modes de communication visuels, formant un niveau de représentation. La différence avec les modèles et les expériences est clairement établie : le rôle des formules et équations chimiques est bien de permettre la visualisation des concepts descriptifs et explicatifs, produits de la pensée conceptuelle. La différence avec le modèle de Kermen et Méheut est subtile. Chez Talanquer, la symbolique chimique ne décrit pas en elle-même, elle permet plutôt une représentation, accessible aux sens, des modèles microscopiques et macroscopiques qui décrivent et expliquent le phénomène.
- Les formules et équations chimiques sont définies plus finement en fonction de facteurs supplémentaires, ce qui permet la formulation de questions sur le choix pertinent (ou non) des représentations dans le processus d'enseignement-apprentissage : à quelle échelle se situe l'objet ou l'entité que le professeur compte représenter ? Quelle est la dimension (temps, composition, énergie) que l'enseignant compte mettre en évidence ? Quelle représentation est la plus adaptée à l'approche que le professeur a choisie pour aborder le concept/processus ?

3.5. LE NIVEAU SYMBOLIQUE QUESTIONNÉ PAR TABER

3.5.1. Retour aux fondamentaux

Dans une publication de 2013, Taber propose un nouveau modèle des niveaux de savoir en réaction aux critiques des différentes versions du « chemistry triplet » énoncées, entre autres, par Talanquer (2011). Ce modèle rend compte de deux apports introduits depuis le « chemistry triplet » originel de Johnstone : une séparation clarifiée du monde empirique et du monde des modèles (déjà effective dans le tétraèdre de Kermen et Méheut, et confirmée par Talanquer) et, surtout, une redéfinition du statut des représentations symboliques (figure 5).

Taber utilise un triangle similaire à celui de Johnstone, mais il en modifie l'orientation. Le niveau empirique (sous le nom de « phénomène chimique ») se retrouve ainsi isolé à la gauche de la figure, pour mieux faire ressortir son appartenance à un monde

particulier : le monde concret, tangible, observable. A contrario, les niveaux macroscopique et submicroscopique sont positionnés à droite de la figure et alignés verticalement. Dénommés « conceptualisations », ces niveaux appartiennent de facto au monde des modèles. Cette distinction théorique et graphique entre monde empirique et monde des modèles est comparable aux propositions antérieures de Kermen et Talanquer.

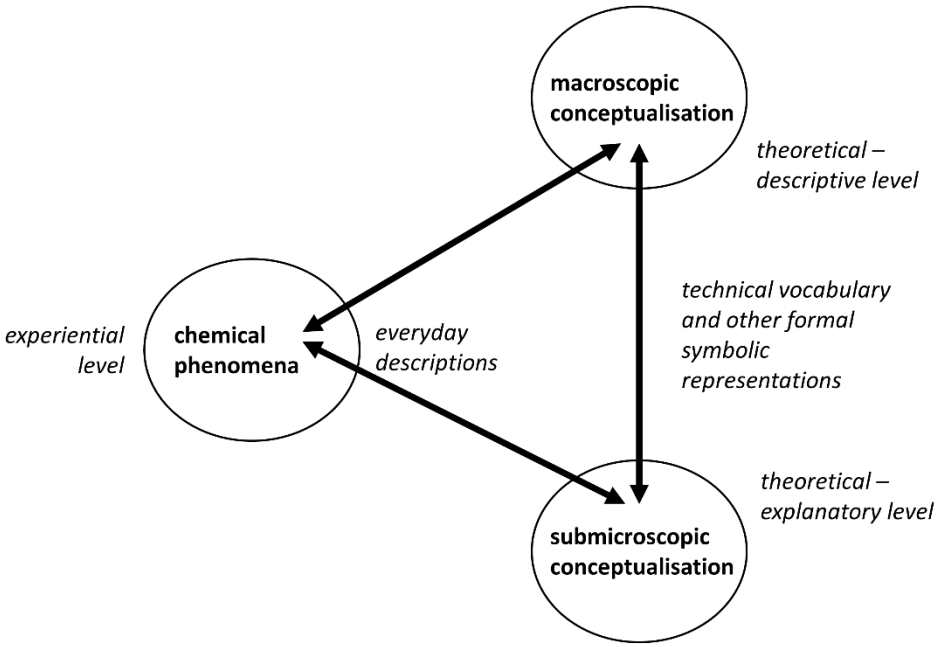


Figure 5. Schéma des niveaux de conceptualisation (macroscopique et submicroscopique) en chimie en relation avec le phénomène observé empiriquement (Taber, 2013).

Taber distingue le niveau empirique des autres niveaux par le truchement du langage employé. L'usage du langage du quotidien (« everyday descriptions ») est ainsi caractéristique du niveau empirique. Par rapport au tétraèdre de Kermen et Méheut, Taber choisit de ne considérer que la première description du niveau empirique[10], considérant qu'une description avec un vocabulaire plus spécifique constitue déjà une conceptualisation macroscopique : « Chemistry is primarily about substances, and substances are already a major abstraction from real-life experience[11] » (*ibid.*, p. 159).

De plus, Taber répartit les fonctions habituellement exercées par les modèles sur les niveaux de conceptualisation macroscopique et submicroscopique. Cette dispersion des fonctions descriptives et explicatives constitue un retour flagrant au modèle originel de Johnstone. Le niveau macroscopique est ainsi un niveau théorique à vocation descriptive, servant avant tout à décrire le phénomène observé avec le vocabulaire

[10] Par ailleurs, dans son article de 2013, Taber ne cite pas Kermen et Méheut (2009), ce qui laisse entendre qu'il a développé son propre modèle sans avoir eu connaissance de la présentation en tétraèdre.
[11] « La chimie est fondamentalement une question de substances, et les substances sont déjà des abstractions majeures de l'expérience réelle » (traduction libre).

spécifique chimique. Le niveau submicroscopique, quant à lui, constitue un niveau théorique à vocation explicative. Il permet aux chercheurs, aux professeurs et aux élèves de donner du sens aux concepts macroscopiques : « Moreover, arguably, the key macroscopic concepts only begin to make sense for most learners in terms of the submicroscopic theoretical models[12] » (*ibid.*, p. 159).

3.5.2. Suppression du niveau symbolique

Taber insiste surtout sur le flou entourant le contenu du niveau symbolique : doit-on le limiter aux représentations purement symboliques ? Quel statut donner alors aux multiples représentations iconiques ? Doit-on placer dans le niveau symbolique les descriptions des appareillages de laboratoire et de la verrerie ? Estimant plus fondamentales les relations entre le niveau empirique et les niveaux de conceptualisation macroscopique et submicroscopique, Taber ne juge pas « utile » de considérer les représentations symboliques (c'est-à-dire, selon lui, l'ensemble des langages de communication et de représentation des concepts chimiques) comme un niveau à part entière :

> Although the domain of symbolic knowledge, in effect the language for communicating and representing chemical concepts, is essential to effective chemistry learning, it is not helpful to think of this as a discrete "level" of chemical knowledge that is one element of an ontological triad of macroscopic-submicroscopic-symbolic[13] (*ibid*, p. 160).

Ces représentations redeviennent alors des « outils de papier » (Klein, 2001), nécessitant certes un apprentissage progressif, mais ne constituant pas un ensemble de connaissances indépendant des autres connaissances en chimie. La place qu'occupe l'ensemble du « vocabulaire technique et des autres représentations symboliques formelles » dans le modèle de Taber est significative : ce vocabulaire figure désormais en tant que medium de communication entre les deux niveaux de conceptualisation submicroscopique et macroscopique (figure 5). Il en ressort également qu'un professeur passant de la description microscopique d'une réaction chimique à l'écriture d'une équation de réaction ne change pas de niveau de conceptualisation dans le modèle de Taber : son discours se situe toujours au niveau microscopique. L'enseignant ne fait que modifier le mode de communication pour transmettre l'information ; les symboles

[12] « De plus, on peut soutenir que les concepts-clés au niveau macroscopique commencent seulement à faire sens, pour la plupart des apprenants, en termes de modèles théoriques submicroscopiques » (traduction libre).

[13] « Bien que le domaine des représentations symboliques, en réalité le langage pour communiquer et représenter les concepts chimiques, soit essentiel pour un apprentissage efficace de la chimie, il n'est pas utile de le penser comme un niveau discret de savoir en chimie, ou comme un des éléments d'une triade ontologique macroscopique-submicroscopique-symbolique » (traduction libre).

chimiques sont substitués aux mots exprimés en langue française pour décrire les mêmes concepts dans le même niveau.

3.5.3. Des liens particuliers entre symboles et niveaux de conceptualisation

Par contre, ce modèle des niveaux de conceptualisation en chimie ne vide pas la question de l'hétérogénéité des représentations formelles. Les représentations de la structure des molécules, d'objets de laboratoire ou autres formules moléculaires et équations de réaction partagent-t-elles les mêmes caractéristiques linguistiques, les mêmes fonctions de représentation ? Taber répond en partie à la question en montrant que certains modes de communication sont préférentiellement liés à l'un ou l'autre niveau de conceptualisation (figure 6).

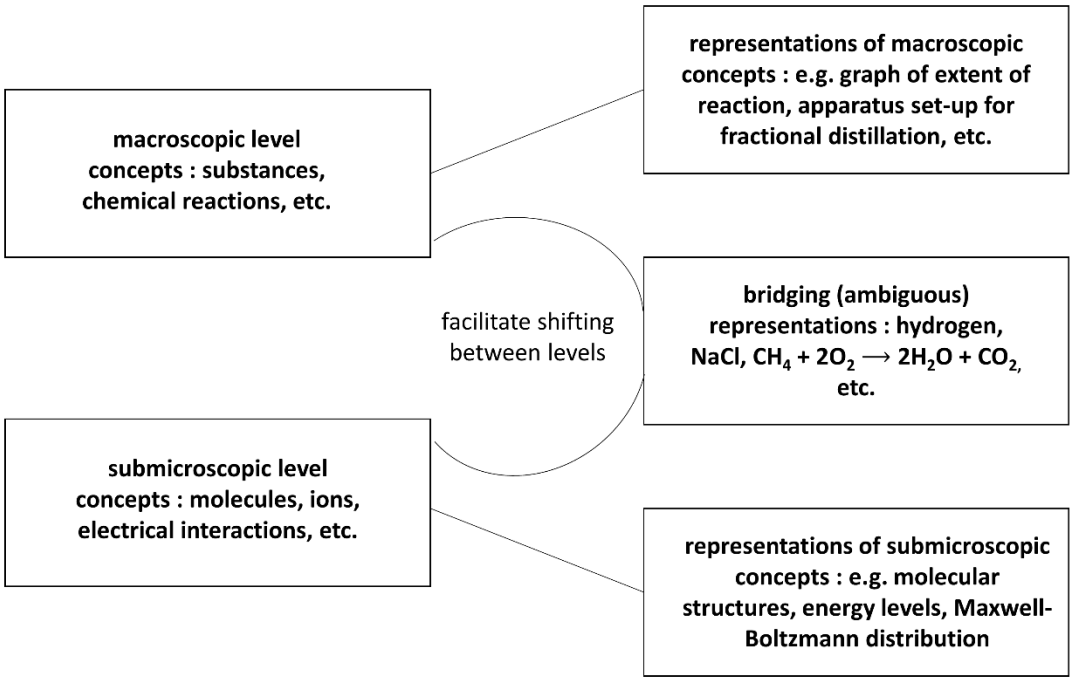


Figure 6. Schéma des niveaux de conceptualisation (macroscopique et submicroscopique) en chimie en relation avec certains modes de représentation (Taber, 2013).

Par exemple, les représentations des appareillages et de la verrerie de laboratoire utilisés durant une expérience de laboratoire sont à associer au niveau de conceptualisation macroscopique. D'un autre côté, les représentations des structures moléculaires sont plutôt à associer au niveau de conceptualisation submicroscopique. Taber insiste surtout sur le caractère ambigu des formules et des équations chimiques, ainsi que des termes de nomenclature chimique : ils peuvent en effet référer à la fois à des concepts macroscopiques et microscopiques, selon le contexte. Selon lui, cette ambiguïté pourrait être utilisée comme pont entre concepts macroscopiques et microscopiques en permettant aux étudiants de passer de l'un à l'autre avec plus de facilité (figure 6).

3.5.4. À propos des formules et équations chimiques

Dans le modèle de Taber, les formules et les équations chimiques ne font plus partie d'un niveau à part entière. On notera deux éléments importants :

- Les formules et équations chimiques sont considérées comme des médiateurs entre les niveaux de conceptualisation macroscopique et microscopique. Elles permettent, par leur rôle représentationnel, de décrire les composants des modèles submicroscopiques et macroscopiques, avec des symboles particuliers. Elles forment avec les autres représentations formelles et le vocabulaire technique un ensemble vaste d'outils de représentation, ne constituant pas un niveau conceptuel. Il est à noter également que cet ensemble d'outils de représentation n'est pas directement connecté au niveau empirique. Cette proposition de Taber va donc à l'encontre des modèles de Kermen et Talanquer qui proposent une connexion directe entre monde empirique et outils de représentation.
- Les formules et équations chimiques sont jugées ambiguës : elles véhiculent des informations se situant dans les deux niveaux de conceptualisation. Taber y voit une opportunité de circuler entre les niveaux macroscopique et submicroscopique. Cette interprétation est somme toute optimiste ; nous verrons plus loin que les caractéristiques de la symbolique chimique peuvent, dans certains cas, empêcher la circulation vers les autres niveaux.

3.6. DISCUSSIONS INTERMÉDIAIRES

Ce compte-rendu des différents cadres théoriques sur les niveaux de savoir proposés dans la littérature nous amène à souligner et discuter les quelques points suivants.

3.6.1. Plusieurs théories des niveaux de savoir

Il n'existe pas donc une théorie, mais des théories des niveaux de savoir identifiables en chimie. Si ces niveaux ont été diversement nommés (de pensée, de représentation, de savoir, de conceptualisation) en fonction des auteurs, c'est avant tout parce qu'ils synthétisent une série de modèles aux implications propres : distinction entre registre empirique et registre des modèles, tension entre le concret et l'abstrait, fonctions dévolues à un modèle (descriptif, explicatif, prédictif) et identification par des modes de communication. Ce statut de « lasagne conceptuelle » n'a pourtant pas empêché le « chemistry triplet » de Johnstone (et ses avatars) d'être l'une des idées les plus performantes et productives de ces trente dernières années en didactique de la chimie (Talanquer, 2011).

3.6.2. La fonction intrinsèquement représentative des symboles

Les fonctions et le contenu du niveau symbolique changent au fur et à mesure des contributions et des modifications apportées au « chemistry triplet » de Johnstone. La destinée du niveau symbolique, initialement inscrit dans le « chemistry triplet » originel comme un niveau à part entière, se termine par son élimination pure et simple des niveaux de conceptualisation par Taber en 2013.

Au-delà de ces versions qui peuvent paraître très différentes, une analyse des théories des niveaux en chimie fait ressortir un point commun essentiel à tous les niveaux appelés « symbolique » : ils présentent avant tout une fonction de représentation. De fait, tous les contributeurs s'accordent sur l'importance du niveau symbolique dans la compréhension et la description des concepts macroscopiques, submicroscopiques, voire du phénomène empirique, sans pour autant s'accorder sur les limites de ce niveau.

Pourtant, certains auteurs confèrent au niveau symbolique des fonctions supplémentaires initialement dévolues aux modèles, comme la fonction explicative quantitative (Gilbert et Treagust) ou la fonction descriptive (Kermen et Méheut). A contrario, Talanquer et Taber restreignent le rôle de la symbolique chimique en insistant sur sa fonction de visualisation des concepts et raisonnements. Ce sont ces mêmes concepts microscopiques et macroscopiques qui sont les vrais dépositaires des fonctions descriptives et explicatives des phénomènes. Pour le dire autrement, on ne décrit pas un phénomène à l'aide de symboles chimiques, on décrit un phénomène à l'aide de concepts microscopiques et macroscopiques représentés par des symboles.

Délimiter le contenu réel du niveau symbolique semble également sujet à discussion : faut-il l'étendre à l'ensemble des modes de communication (Johnstone, Talanquer), ou le restreindre essentiellement aux seules formules et équations chimiques (Gilbert et Treagust, Kermen et Méheut) ? En intégrant les formules et équations chimiques dans un vaste ensemble de représentations formelles et de vocabulaire technique ne formant pas un niveau de conceptualisation à part entière, Taber a quelque peu affaibli le statut spécial des représentations symboliques chimiques, perceptible dans les autres contributions. Elles redeviennent ainsi un « outil de papier » parmi d'autres, avec leurs caractéristiques propres.

3.6.3. La médiation symbolique

Quel que soit le contributeur, les formules et les équations chimiques jouent toujours un rôle particulier dans les théories des niveaux de savoir en chimie. Trois regards complémentaires permettent d'en juger l'importance. Premièrement, les formules chimiques véhiculent à la fois des concepts macroscopiques et microscopiques : elles sont dites « ambiguës » par Taber. Présentant des forces (circulation entre concepts, richesse sémantique) et des faiblesses (confusion entre niveaux, fonction du contexte),

cette caractéristique est essentielle dans la compréhension des mécanismes d'apprentissage des concepts en chimie. Deuxièmement, les formules et équations chimiques combinent – par projection – les trois fonctions des modèles dont elles assurent la représentation (ou visualisation selon Talanquer) : elles peuvent décrire la matière (par exemple, décrire par des formules moléculaires), donner des explications qualitatives (par exemple, pondérer une réaction chimique en indiquant la composition atomique des molécules des réactifs et des produits), ou encore fournir des explications et des prédictions quantitatives (par exemple, prévoir ou justifier une quantité de produit formé à partir de données initiales). Troisièmement, selon Kermen et Méheut, il est même possible de conférer aux symboles chimiques un rôle dans la (seconde) description du phénomène chimique au niveau empirique. Selon ces auteures, les symboles chimiques sont tellement familiers aux chimistes qu'ils les utilisent pour décrire des objets ou des événements sans passer par la langue ordinaire.

3.6.4. Des cadres d'analyse des difficultés des apprenants

Au chapitre 1, nous avons montré que certaines difficultés des élèves relevaient précisément d'un manque de sens donné aux symboles, formules et équations chimiques. Les théories des niveaux de savoir permettent d'éclairer cette déconnexion sémantique, en posant des cadres théoriques, des grilles d'analyse. Reprenons trois grandes difficultés rencontrées, pour la symbolique chimique, dans la littérature spécialisée en didactique de la chimie.

D'abord, le symbole chimique est vu, par certains élèves, comme une abréviation, une manière de rendre une information en peu d'espace (Al-Kunifed *et al.*, 1993). Cependant, cette information se limite souvent à la représentation d'un terme de la nomenclature, et non à ce que signifie ce terme en chimie. Le modèle de Taber propose une lecture théorique de ce phénomène : les outils de représentation se voient déconnectés des niveaux de conceptualisation macroscopique et microscopique. Ils ne jouent plus leur rôle de médiateur. Dans ce cas de figure, l'apprenant est bloqué dans une démarche de conversion d'un système de représentation à un autre, passant par exemple du terme à son symbole et du symbole au terme, sans établir de liens vers les concepts chimiques. Nous donnons à ce phénomène le nom de « boucle symbolique[14] ».

Ensuite, les chiffres utilisés dans la symbolique chimique (indice, coefficient) sont souvent polysémiques ; ils rendent compte d'informations relevant du niveau de conceptualisation macroscopique (proportion, nombre de moles), ou du niveau de conceptualisation microscopique (nombre d'atomes, nombre de molécules). Or, il apparaît que, pour de nombreux élèves, ce sont les significations relevant du niveau microscopique qui sont mobilisées en priorité (Arasasingham *et al.*, 2004). Plus encore,

[14] Un autre éclairage sur cette « boucle symbolique », soutenu par des concepts de terminologie, sera donné dans le chapitre 4.

les indices et coefficients sont parfois confondus dans leur rôle respectif (Marais et Jordaan, 2000), ou vidés de leur sens chimique pour permettre une démarche algorithmique de pondération des équations chimiques (Yarroch, 1985). Il s'agit bien ici de difficultés de relier les représentations symboliques aux niveaux de conceptualisation chimique microscopique et macroscopique. Donner un sens chimique aux indices et coefficients passe nécessairement par une reconnexion fréquente avec les substances et les entités microscopiques.

Enfin, la traduction d'une équation chimique en un schéma particulaire est une tâche complexe pour de nombreux élèves (Nurrenbern et Pickering, 1987). Les élèves qui ne réalisent pas correctement cette tâche sont souvent diagnostiqués comme ne sachant pas connecter le niveau symbolique au niveau microscopique. Talanquer critique cette assertion en relevant les imprécisions sémantiques du « chemistry triplet » :

> Does this task require the ability to move between the representational and the explanatory levels in Johnstone's triplet, or mainly to move between symbolic and iconic forms within the representational level? Can we claim that a student who is successful in these types of tasks actually understands the assumptions and implications of the explanatory model that the particulate drawings are trying to represent[15] ?

Talanquer pose une double interrogation. D'une part, il réfute le lien direct entre la représentation iconique (ou schéma particulaire) et le niveau conceptuel microscopique du « chemistry triplet » de Johnstone. Pour Talanquer, la tâche implique surtout de passer d'un système de représentation symbolique à un système de représentation iconique. Des erreurs dans la réalisation de cette tâche peuvent donc être provoquées par la non-maîtrise des règles de construction des représentations iconiques, et non par une maitrise insuffisante des concepts au niveau microscopique. D'autre part, la réalisation correcte d'une telle tâche ne peut constituer un indicateur fiable de la maîtrise, par l'élève, des concepts microscopiques. La conversion de représentations symboliques en représentations iconiques peut être réalisée sans que les concepts microscopiques implicites soient parfaitement et complètement maîtrisés par l'élève.

On voit ainsi que les théories des niveaux de savoir permettent d'analyser finement une tâche complexe, en précisant notamment les compétences réelles et supposées qu'elle est censée mobiliser.

[15] « Cette tâche requiert-elle la capacité à passer du niveau représentationnel au niveau explicatif du triplet de Johnstone, ou principalement de passer de formes symboliques à des formes iconiques à l'intérieur même du niveau représentationnel ? Peut-on déclarer qu'un étudiant qui réussit ce genre de tâches comprend réellement les hypothèses et les implications du modèle explicatif que des schémas particulaires tentent de représenter ? » (traduction libre de Talanquer, 2011, p. 185).

3.6.5. Identifier un niveau, c'est identifier un système de représentation

L'identification des niveaux de savoir en chimie passe toujours par le repérage de certains éléments linguistiques. Par exemple, une représentation d'un schéma expérimental est souvent reliée au niveau macroscopique ; une représentation de la structure d'une molécule est, la plupart du temps, associée au seul niveau submicroscopique ; une formule moléculaire est à situer au niveau symbolique (quand il y en a un). On l'a vu, la polysémie des formules moléculaires fait voler en éclats cette assignation : l'élève y voit-il un pur symbole, une information microscopique ou une information macroscopique ? Il semble nécessaire de partir des significations que les chercheurs, professeurs et élèves prêtent aux différentes représentations en chimie, pour reconstruire les liens entre représentations et niveaux de conceptualisation.

C'est en empruntant cette voie que nous avons élaboré un nouveau modèle des niveaux en chimie, à même de répondre à certaines confusions énoncées précédemment.

3.7. MODÈLE DES NIVEAUX DE SIGNIFICATION

Notre modèle se base sur trois principes essentiels :

- Nous l'avons vu, toute analyse des situations didactiques passe par le fait de collecter et d'identifier des éléments de langage. Nous avons donc comme objectif de replacer le langage au centre du modèle, les termes, symboles ou images employés étant l'essence même des données recueillies.
- Nous considérons, comme nos prédécesseurs, que les symboles (et, par extension, toute visualisation[16]) ont une vocation essentiellement représentative. L'essentiel est ainsi d'extraire les significations possibles associées à une visualisation. C'est pour cette raison que, dans notre modèle, les niveaux connectés aux visualisations seront des niveaux de signification.
- Chez Taber, les formules chimiques sont dites « ambigües », car elles sont polysémiques par nature. Nous élargissons cette propriété, par hypothèse de travail, à la plupart des visualisations en chimie (terme de la nomenclature, symbole chimique, flèche de réaction, formule semi-développée, etc.).

Par ailleurs, le cadre théorique de Taber repose sur une hypothèse tacite : le vocabulaire technique et les représentations symboliques sont connectés aux concepts de chimie, et uniquement à ceux-ci. Or, certaines études ont montré que ces visualisations peuvent véhiculer des significations qui diffèrent largement des concepts visés (Strauss, 1986 ; Al-Kunifed *et al.*, 1993). Ce phénomène est d'autant plus fréquent chez les jeunes apprenants, qui sont en plein processus d'apprentissage du cortège de significations chimiques à associer à ces différentes représentations. Chez les individus experts, la

[16] Nous empruntons ce terme au « chemistry knowledge space » de Talanquer (2011).

répétition de l'utilisation de la symbolique chimique dans des cas variés a pour effet d'affermir le lien entre concept chimique visé et sa représentation, tout en éliminant progressivement les connexions inutiles dans le cadre de la chimie. Peut-on, dès lors, appliquer ce même cadre théorique modélisant la manière de décrire, d'interpréter ou de représenter un phénomène chimique, aux élèves et aux enseignants ?

Répondant par la négative, il nous paraît opportun de distinguer le discours d'un enseignant qui, de par son statut d'expert, embrasse la quasi-totalité de l'« espace du savoir en chimie » du discours d'un élève qui, selon son niveau de maîtrise de la matière, peut emprunter des schémas de pensée différents. Si un professeur est capable de distinguer une description essentiellement empirique d'une description à l'aide de certains concepts macroscopiques passés dans son langage courant (combustion, métal, états de la matière, espèces chimiques), un élève doit d'abord apprendre à construire ces concepts macroscopiques à des fins descriptives. Plus encore, l'utilisation d'une représentation symbolique sans explicitation par un enseignant peut renvoyer à la fois aux concepts macroscopiques et aux concepts microscopiques, alors qu'un élève peut n'y voir qu'une lettre ou un chiffre sans aucun lien avec le phénomène chimique observé.

En conséquence, afin de se placer du point de vue de l'élève, nous avons reconstruit un cadre théorique permettant de traiter la question des significations que les élèves prêtent à des éléments de langage présents dans l'équation de réaction. Nous nous appuyons sur la distinction entre le monde des objets et événements et le monde des théories et modèles tels que proposés par Tiberghien et Vince (2005). Sur base de signes perçus, les apprenants peuvent convoquer des significations relevant de l'un ou l'autre monde, en fonction du contexte. D'une certaine manière, nous tentons de sonder et présenter ce que Laugier et Dumon (2003) appellent la phénoménologie « privée » de l'élève, parfois en décalage avec la phénoménologie « sociale » des chimistes. Cette relecture de l'interprétation des signes, du point de vue de l'élève, est essentielle car elle peut permettre d'élucider quelque peu les mécanismes menant à la productions d'erreurs.

Plus généralement, nous posons qu'un élève peut construire des significations émergeant à trois niveaux distincts, que nous appelons « niveau de signification », à partir d'une visualisation donnée (figure 7) :

1) Un niveau de signification macroscopique dans lequel l'élève fait référence à l'observable en citant des observations empiriques (changement de couleur, disparition lors d'une réaction chimique, etc.) ou en utilisant des concepts macroscopiques tels que les concepts de substance, de métal, de solide, etc. Nous avons donc regroupé les observations empiriques et les modèles macroscopiques descriptifs ou explicatifs dans ce même niveau de signification. Notons également

qu'à ce niveau, l'élève peut décrire certaines propriétés de la substance considérée : états de la matière, brillance, dureté, malléabilité, conductivité thermique, etc.

2) Un niveau de signification microscopique dans lequel l'élève fait référence aux entités constitutives de la matière (molécules, atomes, ions), à la géométrie moléculaire, aux propriétés microscopiques ou aux particules subatomiques (électrons, protons, neutrons).

3) Un niveau de signification « symbolique[17] » dans lequel l'élève ne perçoit pas les informations que les symboles véhiculent. Il regroupe trois types de significations s'éloignant des concepts visés. Comme Taber, nous assumons le fait de ne pas considérer un niveau de savoir « chimique » qui serait de nature symbolique. Nous pensons par contre que certains élèves ne vont pas connecter les symboles aux concepts qu'ils représentent en chimie, mais élaborer d'autres significations.

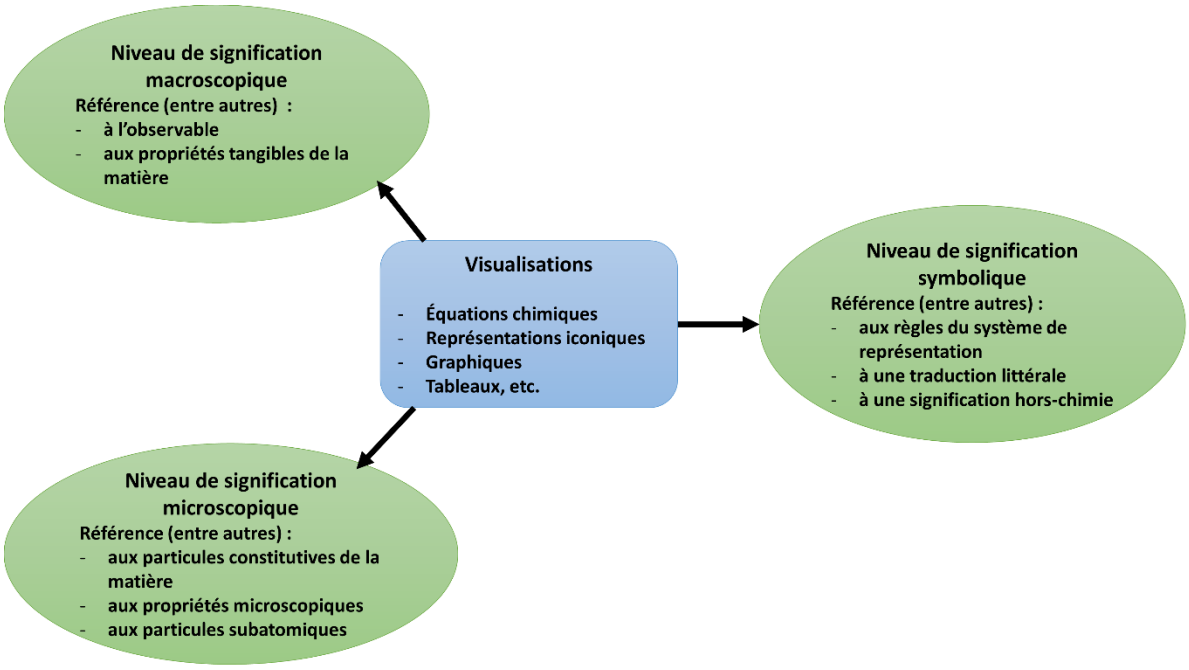


Figure 7. Schéma des niveaux de signification associés à une visualisation pour un jeune apprenant.

Primo, nous considérons le cas où l'élève se limite à décrire les règles de représentation d'un système. Par exemple, le symbole chimique « Na » est un assemblage d'une lettre en majuscule et d'une lettre en minuscule ; l'indice s'écrit en bas et à droite d'un symbole chimique dans une formule chimique ; les formules chimiques des réactifs se

[17] Nous l'avons appelé « symbolique » car nous y voyons un clin d'œil au modèle original de Johnstone, mais également pour montrer que nous complétons le modèle de Taber en considérant l'existence, pour certaines représentations, de significations non liées aux concepts chimiques macroscopiques et microscopiques.

placent à gauche de la flèche. L'élève, ne se focalisant que sur les règles internes au système, se retrouve donc piégé à l'intérieur d'un système de représentation.

Secundo, nous postulons que la simple traduction d'une écriture symbolique en un terme de la nomenclature ne constitue en aucun cas la garantie d'une connexion aux concepts chimiques macroscopiques et microscopiques. La relation entre une écriture symbolique et un terme peut ainsi n'être que de nature « symbolique », c'est-à-dire un simple passage d'un système à un autre, sans pour autant véhiculer des concepts chimiques.

Tertio, l'élève peut aussi prêter à la visualisation une signification hors du cadre strict de la chimie. Ce type de signification symbolique consiste donc plutôt en une projection, dans le réseau conceptuel en chimie, d'un lien représentation/concept issu d'un domaine autre que la chimie.

Chez la majorité des apprenants, les significations du niveau symbolique sont supposées s'éteindre rapidement durant le cursus, pour faire place aux significations des niveaux microscopique et macroscopique.

Prenons l'exemple du symbole chimique « Na » (figure 8) :

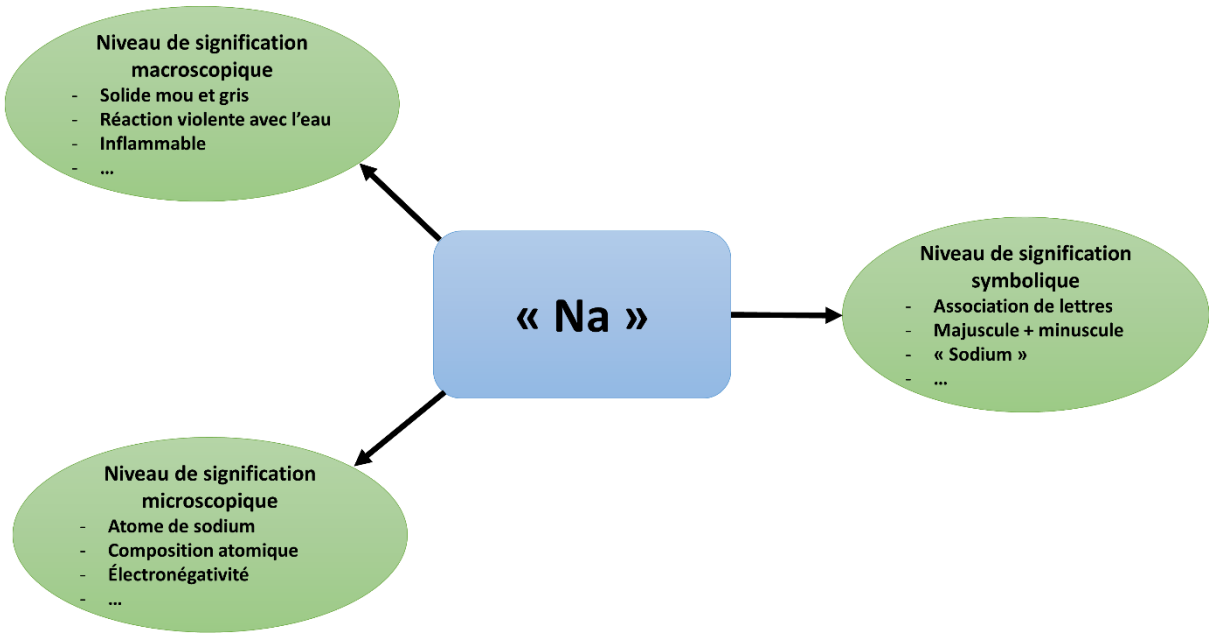


Figure 8. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés au symbole « Na ».

1) Au niveau macroscopique, le symbole « Na » peut représenter la substance « sodium » avec toutes ses propriétés observables : solide mou et gris à température ambiante, présentant un éclat métallique sous certaines conditions, hautement inflammable, capable de réagir violemment avec l'eau, etc.

2) Au niveau microscopique, le symbole « Na » peut représenter l'atome de sodium, et indirectement sa masse atomique relative, sa faible électronégativité, sa composition en particules subatomiques, sa capacité de liaison, etc. Ces caractéristiques microscopiques, véhiculées par le seul symbole « Na », se construisent tout au long du cursus.
3) Au niveau symbolique, le symbole « Na » peut être vu comme la combinaison d'une lettre majuscule et d'une lettre minuscule. Ensuite, « Na » peut encore être traduit dans le langage spécifique à la chimie sous le nom de « sodium », mais sans être connecté aux concepts macroscopiques et microscopiques. Enfin, un apprenant peut voir dans le symbole « Na » une écriture rendant compte du signifié « sans alcool », habituellement apposé sur les étiquettes des boissons non-alcoolisées. L'élève projette ainsi une signification issue d'un autre champ (ici, la signalétique dans le secteur alimentaire) dans le champ de la chimie.

L'application d'un tel modèle implique de répondre préalablement à une série de questions importantes : comment délimiter les types de « visualisations » ? Quelles relations entretiennent les règles de représentation dans un système et les concepts visés ? Dans quelle mesure un type de visualisation génère-t-il davantage de significations de nature symbolique ? Une analyse linguistique des systèmes de représentation utilisée en chimie s'avère indispensable à ce stade.

3.8. CONCLUSIONS

Ce chapitre avait pour but de répondre à trois questions de recherche essentielles pour garantir une analyse fiable et valide de la symbolique chimique et des difficultés rencontrées par les élèves, via les grilles de lecture fournies par les théories des niveaux de savoir. Pour répondre aux deux premières questions, nous avons retracé l'évolution des théories des niveaux de savoir en insistant, pour chaque modèle, sur la position, le statut et la fonction des symboles, formules et équations chimiques. Concernant la troisième question de recherche, certaines difficultés rencontrées par les apprenants ont été explorées en utilisant le cadre du « chemistry triplet », mais également en tenant compte des avis divergents énoncés par d'autres chercheurs (Talanquer, Taber).

Il ressort de cette analyse un paradoxe troublant : le « chemistry triplet » de Johnstone continue à rencontrer un succès important tant en recherche en didactique que dans la formation des enseignants, tout en présentant des flous sémantiques d'importance. Citons, parmi ceux-ci, la difficulté à caractériser ce que signifie précisément un « niveau », l'assimilation entre représentations iconiques et niveau microscopique, la coexistence de deux niveaux différents à l'intérieur du niveau macroscopique initial de Johnstone, la remise en question de l'existence même d'un niveau symbolique comparable aux niveaux conceptuels, etc. Pour ce qui concerne les symboles, formules et équations chimiques, ils constituent soit l'ensemble du niveau symbolique, soit une

partie du niveau symbolique, soit une partie d'un ensemble de représentations formelles qui est à distinguer des niveaux de conceptualisation. Selon nous, cette indécision théorique s'explique avant tout par des difficultés de nature linguistique.

C'est pour cette raison que nous avons construit un nouveau modèle qui se base sur l'existence de niveaux de signification connectés à une visualisation. En replaçant le symbole (ou toute autre visualisation) au centre du modèle, nous appliquons l'idée que toute communication chimique part de l'analyse d'un élément de code, qu'il appartienne à une langue, à un système de symboles, à un ensemble d'icônes, etc. Nous inversons la perspective classique : il s'agit ici d'identifier et de caractériser les éléments de langage pour mieux comprendre les concepts véhiculés. Il est dès lors nécessaire que les concepts linguistiques et sémiotiques de symbole, terme, icône, signe, soient remobilisés pour permettre une clarification des questions inhérentes aux systèmes de représentation, et ainsi étayer une analyse de la symbolique chimique à l'aide des théories des niveaux de savoir. C'est ce travail d'analyse linguistique qui fera l'objet du quatrième chapitre.

Chapitre 4

La symbolique chimique et les systèmes sémiotiques dans l'enseignement-apprentissage de la chimie

For many pupils, the greatest obstacle in learning science and also the most important achievement is to learn its language[1].

(Wellington & Osborne, 2001)

Dans le chapitre précédent, nous avons exploré la position ainsi que la fonction des formules et équations chimiques dans les différentes théories des niveaux de savoir proposées dans la littérature scientifique de 1982 à nos jours. Il en ressort, entre autres, que pour se situer dans l'un ou l'autre niveau de savoir, il est nécessaire de passer par l'identification d'éléments linguistiques particuliers. Les formules et équations chimiques ont ainsi été régulièrement utilisées pour « incarner » un niveau appelé « symbolique ». Cependant, il est apparu que la polysémie des symboles employés dans les formules et équations chimiques rend caduque l'attribution à un seul niveau de savoir, sans l'aide du contexte, autrement dit sans l'analyse des autres modes de représentation présentés conjointement. C'est pour cette raison qu'une analyse linguistique des modes de communication utilisés dans l'enseignement-apprentissage de la chimie constitue un préalable obligatoire pour une utilisation efficace de l'une ou l'autre des théories des niveaux de savoir, y compris le modèle des niveaux de signification que nous avons proposé. Nous posons dès lors deux questions de recherche :

1) Qu'apprend-on du « langage de la chimie » dans les modèles langagiers issus de la littérature ?
2) Dans chacun de ces modèles, quelle est la place occupée par les formules et équations chimiques ?

Nous indiquerons, pour chaque modèle langagier abordé, les informations spécifiques relatives aux formules et équations chimiques.

Dans la suite de ce chapitre, nous établirons une nouvelle taxonomie des systèmes sémiotiques mis en œuvre dans l'enseignement-apprentissage de la chimie lors de communications orales et écrites. Ce modèle linguistique servira d'outil pour décrire les difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique. Nous tenterons de répondre également aux deux questions de recherche suivantes :

[1] « Pour beaucoup d'élèves, le plus grand obstacle dans l'apprentissage des sciences – mais qui en constitue aussi l'accomplissement le plus important – est d'en apprendre le langage » (traduction libre).

3) Quels systèmes de signes peut-on identifier dans le début de l'enseignement-apprentissage de la chimie en utilisant les concepts de sémiologie, de linguistique et de terminologie ?
4) Quelles relations peut-on tisser entre notre taxonomie des systèmes sémiotiques et certaines tâches présentant des difficultés pour les élèves quand ils doivent utiliser la symbolique chimique ?

4.1. INTRODUCTION : CONCEPTS FONDAMENTAUX

L'étude des modes de communication à l'œuvre dans l'enseignement-apprentissage de la chimie s'apparente à l'étude de systèmes sémiotiques (par exemple, les règles d'écriture des formules chimiques) et de signes (par exemple, le symbole atomique « Na »). Avant de débuter cette analyse langagière, rappelons une série de concepts de sémiotique, de linguistique et de terminologie.

La **sémiotique** consiste en l'étude de la vie des signes au sein de la vie sociale (Dubois *et al.*, 2012). Partageant avec elle la même définition, la sémiotique est très proche de la sémiologie[2] proposée dans la théorie structuraliste de Ferdinand de Saussure. La sémiotique peut être vue comme l'étude de tout système de signification en tant que langage. En ce sens, elle est en grande partie une science de l'interprétation (Siouffi et Van Raemdonck, 2012). La sémiotique s'intéresse ainsi aux langues ordinaires, mais aussi aux arts, aux religions, aux codes vestimentaires, couvrant aussi bien les domaines du verbal que du non-verbal.

Un **système sémiotique** est un système de signes. Il est caractérisé par l'organisation d'un ensemble de signes selon des règles établies. Le système est l'un des trois concepts fondamentaux de la sémiologie de Saussure, avec le concept de « code » et le concept de « signe » (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

Le concept de **signe** est au centre des disciplines que sont la sémiotique et la linguistique. Le signe est défini comme « un élément A, de nature diverse, substitut d'un élément B » (Dubois *et al.*, 2012). Umberto Eco reformule cette définition du signe en précisant qu'il est « quelque chose qui est mis à la place de quelque chose d'autre » (Eco, 1988). Dans la sémiotique de Peirce (1978), il existe une relation à trois termes entre le signe, l'objet représenté et l'effet que le signe produit (figure 1).

[2] Les deux termes sont d'ailleurs souvent utilisés en tant que synonymes.

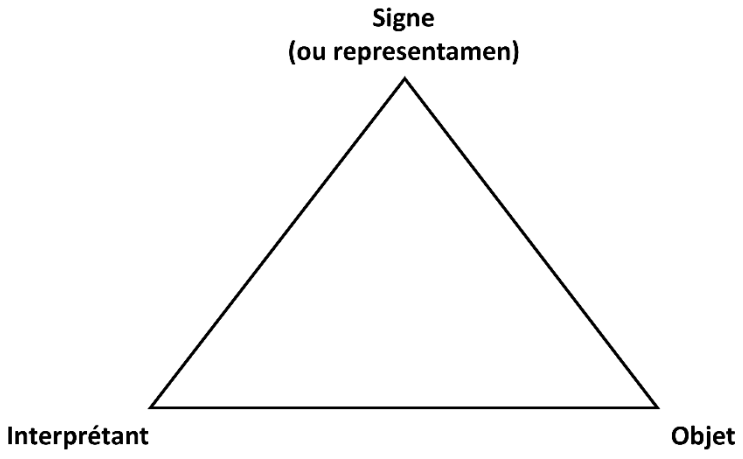


Figure 1. Triangle de la sémiotique de Peirce (1978).

Un signe polysémique peut renvoyer à plusieurs objets différents : le message dépendra alors de l'interprétation réalisée par son récepteur.

Les signes sont divisés en deux catégories.

- Les **indices** : ce sont des phénomènes naturels, immédiatement perceptibles, qui nous font connaître quelque chose d'un autre phénomène qui, lui, n'est pas perceptible. Un indice rend compte du fait de sa proximité avec l'objet qu'il représente. Par exemple, la fièvre est l'indice d'une maladie, la fumée dans le ciel est l'indice du feu. En chimie, on pourrait dire que l'effervescence est l'indice d'une transformation chimique. Formellement, l'indice est dit « naturel » car il n'est pas produit intentionnellement (Dubois *et al.*, 2012).
- Les **signaux** : ils sont, comme des indices, des signes qui rendent compte d'un phénomène non-perceptible. Cependant, le signal est dit « artificiel » car il est produit intentionnellement, dans un but de communication. Le message contenu dans le signal doit être compris par le destinataire. Donc, un signal est volontaire, conventionnel et explicite. Par exemple, une alarme est le signal d'un risque d'incendie dans une maison, une sonnerie de téléphone est le signal de l'intention de communiquer d'une personne ayant composé une combinaison de numéros particuliers (Dubois *et al.*, 2012). En chimie, si le professeur écrit « $HCl_{(aq)}$ » sous la colonne « réactifs » au tableau noir, c'est un signal, signe intentionnel, qui indique à l'élève que l'acide chlorhydrique fait partie des substances à prélever dans l'armoire de laboratoire, pour mener à bien la manipulation expérimentale.

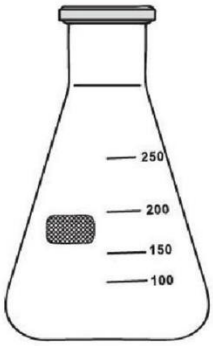
Les signaux sont eux-mêmes divisés en deux catégories, selon le type de relations qu'ils entretiennent avec l'objet qu'ils représentent.

- Les **icônes** : ce sont des signes artificiels qui ont pour propriété d'imiter de manière perceptible ce à quoi il réfère (Prieto, 1968). Dit autrement, l'icône

présente une similitude de fait, un rapport de ressemblance avec l'objet qu'elle représente (Dubois *et al.*, 2012). Ou encore, l'icône procède par la mise en exergue de propriétés identiques à celles de l'objet représenté (Siouffi et Van Raemdonck, 2012). L'autoportrait de Dürer est un bon exemple d'icône, en ce qu'il illustre bien la volonté de ressemblance avec l'objet que le portrait représente (figure 2a)[3]. En chimie, la représentation d'un objet de verrerie, comme un erlenmeyer (figure 3a), constitue un exemple d'utilisation d'icône.

(a) (b)

Figure 2. Exemples d'icône et de symbole dans les arts : (a) autoportrait d'Albrecht Dürer à vingt-huit ans, vers l'an 1500 ; (b) signature d'Albrecht Dürer.



« Na »

(a) (b)

Figure 3. Exemples d'icône et de symbole en chimie : (a) représentation iconique d'un erlenmeyer ; (b) symbole chimique du sodium.

[3] L'autoportrait de Dürer ne constitue pour autant pas une copie conforme simple du sujet représenté. En effet, la représentation en Christ, la position du modèle face à l'observateur, ou le choix du vêtement sont autant de choix qui véhiculent des informations sur le caractère et la fortune du personnage, dépassant ainsi la description de la seule apparence physique.

- Les **symboles** : ce sont des signaux qui procèdent de l'établissement d'une convention entre l'objet et le signe. Les mots d'une langue peuvent être considérés comme des symboles (Souffi et Van Raeldonck, 2012). En reprenant l'exemple de la peinture d'Albrecht Dürer, la signature caractéristique de l'artiste (la lettre « D » inscrite dans la lettre « A ») présente les caractéristiques du symbole. Elle est le signal conventionnel que c'est bien Dürer qui a peint le portrait. En chimie, les symboles abondent : citons par exemple le symbole chimique « Na » qui est bien le signal conventionnel soit de la substance « sodium », soit de l'atome « sodium », soit de l'élément « sodium ».

Notons par ailleurs que Peirce ne considère pas les images photographiques comme des icônes mais comme des indices, car elles s'opèrent par enregistrement (c'est-à-dire par contiguïté entre le signe et son objet). Une photographie « montre » davantage l'objet qu'elle ne le représente. Cette position pose la question de l'intentionnalité. L'idée est en effet défendable que le photographe propose un point de vue, un message, qui ne peut être assimilé au message renvoyé par l'objet en lui-même. Eco (1988) a d'ailleurs proposé que l'« icônisme » soit défini comme « isomorphisme entre forme de l'expression et forme de contenu ». L'icône dépasse alors le statut d'image qui ressemble à un objet pour devenir une image qui rend compte de la façon dont on conceptualise un objet, à la manière de l'autoportrait orienté de Dürer. Ce glissement de l'idée de ressemblance à une certaine forme de convention (qui peut être personnelle) rapproche l'icône selon Eco du symbole selon Peirce. Cette distinction parfois difficile entre icône et symbole constituera une base de discussion quand nous aborderons le statut sémiotique des représentations de la structure des molécules.

En linguistique, science qui étudie la langue, le signe se limite au seul **signe linguistique**. Pour Saussure (1915), il faut distinguer le signe linguistique du symbole. En effet, contrairement au signe linguistique tel que défini par Saussure, un symbole n'est jamais tout à fait arbitraire. Par exemple, la balance est le symbole de la justice par un glissement sémantique : l'idée de justice, de « peser le pour et le contre » est rendue, presque par analogie, via l'équilibre de la balance à plateaux (Dubois *et al.*, 2012). On peut donc voir ou construire une relation entre un symbole et l'objet qu'il représente. Pour Saussure, il n'en est rien entre le signe linguistique et son objet : un chat est appelé « un chat » par pure convention (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

Le signe linguistique tel que défini par Saussure est bifacial : il se compose du signifiant (image acoustique ou expression phonique) et du signifié (rapproché du « concept » sans lui être équivalent). Par exemple, le signe linguistique « arbre » présente à la fois une image acoustique, l'expression phonologique du mot « arbre », et un contenu sémantique, qui comprend les caractéristiques du concept d'« arbre ». Le référent concret est, dans ce cas, l'objet réel « arbre » sous toutes ses formes (figure 4).

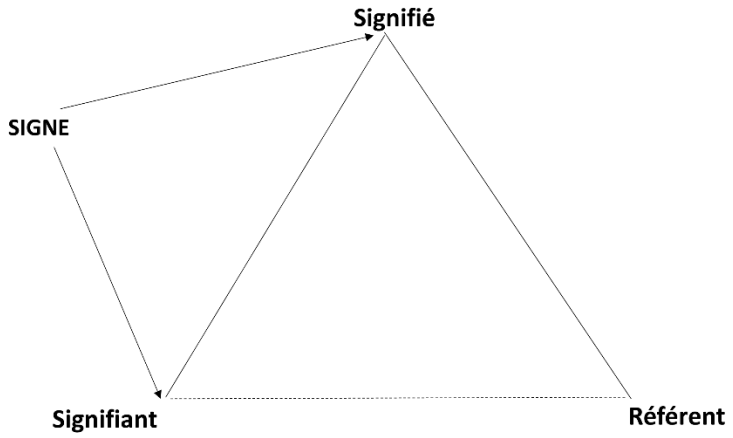


Figure 4. Triangle sémiotique selon Saussure (d'après Chiss *et al.*, 2015).

Il est à noter que, chez Saussure, le référent n'est pas forcément un objet physique perceptible (Chiss *et al.*, 2015) et qu'il n'est accessible, à partir du signifiant, qu'en passant par le signifié. Cette relation indirecte est symbolisée, dans la figure 4, par les pointillés reliant le signifiant et le référent.

Prenons un exemple concret en chimie. Le signe « chlorure d'hydrogène » est composé d'un signifiant (l'image acoustique « chlorure d'hydrogène ») et d'un contenu sémantique (le concept de chlorure d'hydrogène, avec toutes ses facettes microscopiques et macroscopiques). Dans ce cas, le référent est double puisque le signe « chlorure d'hydrogène » renvoie à deux objets différents : la substance « chlorure d'hydrogène » et la molécule « chlorure d'hydrogène ». Nous reviendrons sur ce point particulier dans la suite de ce chapitre.

En bref, la figure 5 reprend les principaux types de signes à considérer pour notre étude.

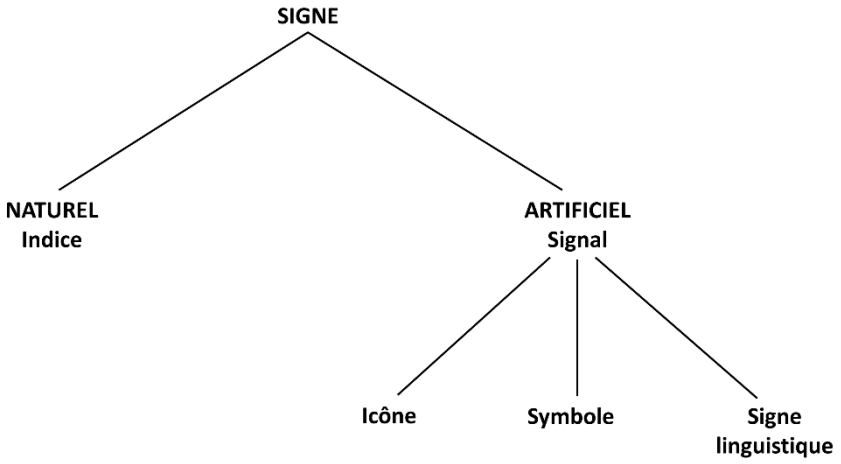


Figure 5. Schéma de relations entre signe, indice, signal, icône, symbole et signe linguistique.

Nous ne pouvons clore cette section sans aborder le concept de **« terme »** (notamment scientifique), tel qu'il est défini en terminologie. Selon celle-ci, les termes scientifiques présentent deux facettes : la désignation (équivalent du signe linguistique) et le concept (ce à quoi renvoie la désignation). Par exemple, le terme « oxygène » est composé d'une désignation (le signe linguistique « oxygène ») et du concept qu'il véhicule (le concept « oxygène »). Ce concept peut lui-même être relié à un objet réel (la substance « oxygène » dans ce cas), dont les propriétés sont à la base des caractéristiques du concept (Depecker, 2003). Le terme est ainsi pris entre la pensée constituée (le concept), la langue (le signe linguistique ou désignation) et le réel (objet). Le triangle terminologique qui en résulte est représenté à la figure 6.

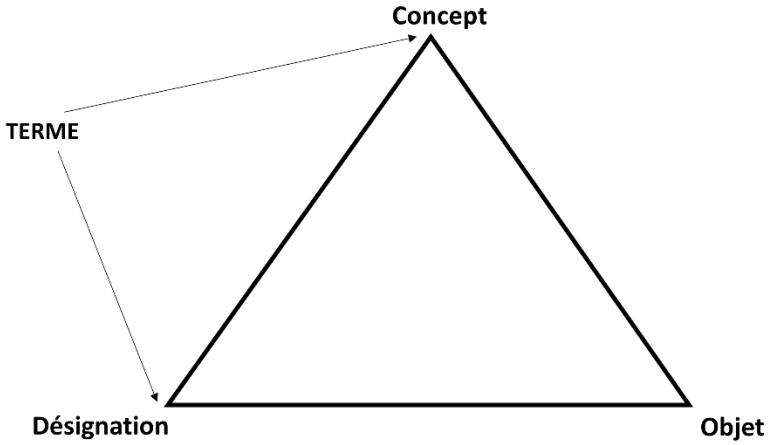


Figure 6. Représentation des relations entre désignation, concept et objet – le terme étant la combinaison d'une désignation et d'un concept.

Le but du terminologue est de vérifier dans quelle mesure la désignation rend compte fidèlement du concept. En cela, le terminologue complète le linguiste : il met en relation l'ordre de la pensée et l'ordre de la langue.

Il est important d'insister sur le fait que la désignation en terminologie consiste bien en un signe linguistique, c'est-à-dire en la combinaison signifiant/signifié des linguistes. Le problème du terminologue réside précisément dans le fait que le signifié lié à la désignation est parfois différent du concept tel qu'il est voulu par le terminologue. En effet, comme le précise Depecker (2003, p.36), « le signe linguistique déborde de sens ». Cette richesse du signifié est d'ailleurs un problème en chimie. Le signe linguistique « oxygène » présente ainsi plusieurs significations hors du cadre strict de la chimie : vie, pureté, régénération, bonne santé, etc. Or, il est évident que ces significations associées à la désignation « oxygène » excèdent largement le concept « oxygène » tel qu'il est construit par les chimistes.

Plus encore, on peut dire que le concept ne se résume pas au signifié. En effet, ce que peut signifier la désignation « oxygène » pour une personne donnée peut ne pas

embrasser la totalité du concept « oxygène » pour un chimiste. En sciences, c'est d'ailleurs le concept, jugé non-ambigu, qui est défini en premier lieu, et non son expression en langue, considérée comme équivoque par nature. C'est ce travail tendant à l'univocité qui a poussé les scientifiques à construire des codes censés rendre compte des concepts entièrement et sans ambiguïté.

Nous verrons que cette richesse sémantique des signes (qui n'épargne pas les symboles, malgré les efforts des chimistes) est essentielle dans la compréhension des significations que les élèves prêtent aux signes employés notamment dans une équation de réaction.

4.2. LANGUE, LANGAGE, PAROLE

La littérature scientifique évoque fréquemment le « langage de la chimie » (Markov, 1988 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012 ; Markic et Childs, 2016). Mais les chimistes utilisent-ils des langues ou des langages ?

Les définitions du concept de **langage** diffèrent selon le champ disciplinaire concerné. Selon les théories de la communication, il y a langage dès qu'il y a système de signes destiné à transmettre une information. En informatique, le langage est parfois simplement l'ensemble de signes ou de codes destinés à donner des instructions (par exemple, le langage Fortran). Dans le champ de la sociolinguistique, on peut voir le langage comme un fait chez l'Homme : l'Homme parle, s'exprime par des sons, de manière volontaire (Siouffi et Van Raemdonck, 2012). C'est d'abord une performance physique qui met en œuvre certains organes du corps, avec des fondements biologiques (activation de certaines zones du cerveau, appareil phonatoire, apprentissage, pathologies, etc.). Ces multiples définitions créent une confusion autour du terme « langage », ce qui permet d'ailleurs son emploi dans de nombreuses occasions, la plupart du temps comme un terme générique pour indiquer un mode de communication. Par ailleurs, il est étrange de constater que, en langue anglaise, il n'y a pas de distinction entre langue et langage : le terme « language » est utilisé pour les deux termes francophones.

La théorie de la linguistique structurale de Saussure propose, quant à elle, une distinction claire entre langue, langage et parole. Nous adopterons ces définitions pour la suite de notre développement.

Le **langage** est la faculté d'expression et de communication entre les hommes. Selon Saussure (1915), elle est « multiforme et hétéroclite » et correspond à « la faculté de constituer une langue, c'est-à-dire un système de signes distincts, correspondant à des idées distinctes » (Saussure, 1915). Le langage présente deux composantes : la langue et la parole. L'existence d'une langue (en tant que systèmes de signes) conditionne la possibilité d'exercer le langage. Sans code, pas d'expression volontaire de sens.

La **langue** est donc définie comme le moyen de mise en œuvre du langage. C'est un code, c'est-à-dire un système de signes régi par un ensemble de règles qui s'imposent à l'ensemble de ses usagers. La langue est un fait collectif, elle se caractérise par son homogénéité, contrairement au langage et à la parole (Chiass *et al.*, 2015). On distingue les langues naturelles (parlées par l'Homme et objets d'étude de la linguistique) et les langues artificielles (pures constructions logiques).

La **parole** est la composante individuelle du langage. On peut encore la définir comme l'exploitation individuelle et concrète de la langue par un individu, à un moment donné (Siouffi et Van Raemdonck, 2012). Dans son *Cours*, Saussure la décrit comme un « acte de volonté et d'intelligence ». Il est à noter que les socio-linguistes contestent le caractère purement individualiste de la parole, celle-ci étant par nature réglée par des conventions sociales.

Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le terme « langage » dans son usage en linguistique structurale, en tant qu'ensemble de deux dimensions : langue et parole.

En appliquant ce qui précède au cours de chimie dans l'enseignement secondaire, on observe que le professeur doit à la fois se soucier des langues qu'il emploie, de l'usage qu'il en fait (*sa* parole) et, bien entendu, de l'usage qu'en font les élèves (*leur* parole). C'est par la parole des élèves que nous pourrons éventuellement juger de leur maîtrise de la langue (par exemple, les règles d'écriture des formules moléculaires) en tant que code.

Tous ces concepts fondamentaux sont autant d'outils de description et d'interprétation des modèles langagiers issus de la littérature et ayant pour intention de délimiter le langage scientifique (ou chimique), ainsi que les sous-catégories qui le composent.

4.3. ANALYSE CRITIQUE DE MODÈLES LANGAGIERS

L'analyse des différences et des liens entre langage ordinaire et langage scientifique a fait l'objet de recherches débouchant sur des taxonomies dont les champs de validité et d'action diffèrent fortement.

4.3.1. Système de Snow

Le système de Snow (2008), lui-même inspiré du travail de Beck *et al.* (2002), porte spécifiquement sur les termes. Il se divise en trois parties :

1) Le langage ordinaire : il se compose de 5000 à 7000 mots, ce sont les termes les plus fréquemment utilisés dans le langage courant.
2) Le langage académique général : il comprend les termes qui sont par nature interdisciplinaires (comme le terme « hypothèse »).

3) Le langage disciplinaire : il est composé de termes spécifiques à une discipline donnée, parfois considérés comme « techniques ».

Certains linguistes distinguent le « langage scientifique » (ou interdisciplinaire) et le « langage technique ». Pour ces auteurs, le langage scientifique est plus généraliste que le langage technique, qui peut être spécifique à une science ou à une méthode particulière (Messaoudi, 2010). Dans le système de Snow, le langage scientifique est donc à rapprocher du langage académique quand le langage technique est assimilable au langage disciplinaire.

Ces vastes catégories de Snow comprennent uniquement des signes linguistiques. Son système exclut donc les formules et équations chimiques. On notera que Snow peine finalement à délimiter le langage scientifique (et, dans ce cas-ci, plus particulièrement la langue scientifique) : les catégories proposées ne sont pas étanches mais semblent plutôt communiquer entre elles.

4.3.2. Système de Wellington

Wellington (2000) propose une taxonomie des signes utilisés en sciences selon quatre niveaux d'abstraction croissante :

- niveau 1 : les termes renvoyant à des objets concrets (par exemple, un « erlenmeyer ») ;
- niveau 2 : les termes renvoyant à des processus ou phénomènes (par exemple, une « fusion ») ;
- niveau 3 : les termes associés à des concepts scientifiques, plus ou moins éloignés d'objets concrets (par exemple, une « liaison chimique ») ;
- niveau 4 : les nombreux symboles utilisés en sciences, parmi lesquels les signes mathématiques ou chimiques (par exemple, le symbole « Na »).

Wellington cible spécifiquement le langage scientifique, et le considère comme un ensemble délimité. Il forge son échelle d'abstraction croissante de deux façons. D'abord, il dessine trois niveaux qui comprennent uniquement des signes linguistiques. Ces niveaux sont agencés en fonction des caractéristiques des objets représentés : du plus concret (niveau 1) au plus abstrait (niveau 3). Ensuite, Wellington conclut son échelle par un niveau terminal comprenant des symboles. Dans ce cas, ce n'est plus l'objet représenté qui est responsable du caractère abstrait, mais bien le symbole, la représentation en elle-même. Prenons un exemple : le terme « chlorure d'hydrogène » est associé au niveau 1 car il renvoie potentiellement à un objet réel (la substance « chlorure d'hydrogène »), mais le symbole « HCl », lui, est associé au niveau 4, alors qu'il renvoie potentiellement au même objet. Wellington prête ainsi une difficulté supplémentaire d'abstraction à l'utilisation des symboles et non des signes linguistiques.

Les formules et équations chimiques peuplent le niveau 4 du système de Wellington, en même temps que les autres symboles utilisés en sciences. Elles font partie du niveau le plus « abstrait » de par le type de signes employé. Les symboles, présents tant dans les formules moléculaires que dans les équations de réaction, sont ainsi vus comme des abstractions puissantes, qui cachent les concepts et substances sous une couche supplémentaire de symbolisme.

4.3.3. Système de Lemke

Parmi ces modèles généraux, Lemke, quant à lui, a proposé quatre grandes catégories composant le langage scientifique, qu'il décrit comme « un système de signes multiples articulés et interdépendants, fait de représentations langagières, mathématiques et visuelles[4] » (Lemke, 1998, p.14). Les constituants principaux de ce système sont les mots, les symboles, les images et les actions. Cette taxonomie très générale est pourtant particulièrement pertinente dans le cadre de l'enseignement-apprentissage de la chimie. En effet, mises à part les actions, qui relèvent du domaine du non-verbal, on retrouve massivement les trois autres catégories, souvent en combinaison, dans les manuels scolaires de chimie.

Suivant cette voie de recherche, d'autres auteurs se sont intéressés aux langages employés spécifiquement par les chimistes, en se focalisant sur l'un ou l'autre langage particulier.

4.3.4. Systèmes de Jacob et Mestrallet

4.3.4.1. Système de Jacob

Dans une publication de 2001, Jacob reprend les niveaux proposés par Wellington en les appliquant à la chimie. Il va plus loin en précisant que «« tous les langages de la chimie peuvent être étudiés comme des langues[5] » (p. 32). Sa classification se décline en quatre niveaux du langage chimique.

(1) Le premier niveau comprend le langage symbolique des chimistes, auquel Jacob assigne un alphabet, une syntaxe particulière ainsi que des règles formelles et sémantiques. Appelé « chemical symbolism », il constitue un « sous-langage[6] »

[4] « A cross-articulated multiple sign system of language-mathematical-visual representation. »

[5] « All of the languages used in chemistry can be studied as *languages*. » Le terme « languages » est écrit en italique dans l'article original, ce qui laisse sous-entendre une signification particulière. Nous posons l'hypothèse que Jacob fait référence au fait que les langages en chimie peuvent être étudiés avec tout l'appareil d'analyse des linguistes.

[6] Jacob utilise ce terme dans la citation suivante : « The different 'sub-languages' used on these levels exhibit distinctive linguistic and epistemological properties and should not be confused with each other » (Jacob, 2001, p. 32).

dans le langage des chimistes délimité par Jacob (par exemple, l'écriture symbolique « HCl »).

Les trois autres niveaux se situent à l'intérieur du langage de spécialité chimique, défini par Jacob comme un langage ordinaire modifié. Il distingue ainsi :

(2) les termes renvoyant aux substances (niveau 2), comprenant les termes de la nomenclature chimique (par exemple, le terme « chlorure d'hydrogène ») ;
(3) les termes permettant de parler des relations entre substances (niveau 3), comme les lois ou les théories (par exemple, la loi des gaz parfaits) ;
(4) les termes et structures linguistiques de nature épistémologique (niveau 4), permettant d'aborder les aspects philosophiques de la démarche réalisée par les chimistes (par exemple, la démarche scientifique de recherche).

Jacob considère son système comme une échelle d'abstraction croissante par rapport à la pratique de la chimie[7]. L'application de cette assertion va à l'encontre du système de Wellington. Les symboles chimiques, composant le niveau le plus abstrait chez Wellington, se retrouvent en effet dans le niveau le plus concret chez Jacob, c'est-à-dire au plus près de la pratique des chimistes. Tout semble dépendre de ce que ces deux auteurs entendent par l'adjectif « concret ». Jacob considère les symboles chimiques comme l'outil premier de description, voire de conception, dans les travaux des chimistes. En ce sens, la symbolique chimique est l'outil quotidien du chimiste, ancré dans son action concrète. Pour Wellington, c'est bien le symbole, en tant qu'écriture différente du signe linguistique, qui est jugé « abstrait ». Il nécessite d'abord un effort d'identification, puis souvent un effort d'interprétation dans un concert d'autres symboles. Par conséquent, Wellington considère que les symboles chimiques sont déconnectés d'une certaine réalité chimique. On touche ici à l'une des caractéristiques fondamentales des formules et équations chimiques : elles sont « concrètes » – connectées à la réalité – pour le chimiste et le professeur de chimie qui les manipulent quotidiennement ; elles sont « abstraites » – déconnectées de la réalité – pour les non-initiés en chimie, au premier rang desquels on trouve les élèves débutants, pour qui la symbolique chimique n'a pas plus de sens qu'une langue étrangère.
Nous pouvons voir également, dans l'échelle de Jacob, une progression allant des signes utilisés dans un champ disciplinaire aux signes utilisés dans un champ davantage interdisciplinaire. Ainsi, le niveau 1 serait le niveau le plus chimique, le plus typique du domaine, alors que le niveau 4, à vocation épistémologique, présente une dimension nettement plus interdisciplinaire.

Donc, dans le système de Jacob, les formules et équations chimiques appartiennent au premier niveau du langage des chimistes. Elles sont caractérisées comme étant

[7] « Levels that exhibit increasing degrees of abstraction from chemical practice. »

- les signes d'une langue particulière, appelée « symbolisme chimique », et comprenant un alphabet, une orthographe, une grammaire propre ;
- les éléments de langage les plus connectés à la pratique des chimistes, véritables outils quotidiens de description, de prédiction, de communication des chimistes.

4.3.4.2. Système de Mestrallet

Par ailleurs, Mestrallet (1980), dans son ouvrage sur la sémiologie des signes de la chimie, s'est particulièrement intéressée à la nomenclature des substances en chimie (niveau 2 de Jacob). Elle propose une structuration de la nomenclature chimique en quatre niveaux :

1) les noms triviaux, qui ont la particularité d'appartenir à la fois à la langue ordinaire ou naturelle (comme le français) et à un des niveaux de langue en chimie selon Jacob : eau, esprit de sel, ammoniac, etc. ;
2) les noms semi-triviaux, qui combinent des informations triviales et des informations de composition : benzène, acétone, toluène, etc. ;
3) les noms fonctionnels, qui donnent des informations sur la composition atomique et la fonction chimique : acide sulfurique, dioxyde de carbone, hydroxyde de sodium, etc. ;
4) les noms systématiques, qui présentent un lien fort avec la structure de la molécule constitutive : 2-méthylpentane, butan-2-ol, etc.

D'un point de vue terminologique, on remarque que les désignations (donc les signes linguistiques) systématiques tendent à représenter une molécule ou une substance sans équivoque. Il y a peu de signification, autre que celle voulue par les chimistes, évoquée par une désignation comme « butan-2-ol ». Par contre, les trois autres catégories sont sujettes à produire des signifiés différents des concepts visés : la désignation « eau » peut renvoyer à la vie, au calme ; la désignation « benzène » peut être associée à l'essence, au dégoût (lié à l'odeur) ; la désignation « acide sulfurique » peut véhiculer des sensations de danger, de destruction. La coexistence actuelle de ces niveaux de nomenclature (synchronie des nomenclatures) constitue à elle seule un problème pour l'apprentissage des langages des chimistes, particulièrement pour l'apprentissage des formules moléculaires associées à ces termes.

La symbolique chimique (niveau 1 de Jacob) a été décrite et développée comme une langue à part entière dans bien d'autres publications sur lesquelles nous reviendrons (Dagognet, 1969 ; Markow, 1988 ; Laszlo, 1993 ; Nemeth, 2006 ; Dumon et Mzoughi-Khadraoui, 2014 ; Dehon et Snauwaert, 2015a ; Dehon et Snauwaert, 2015b ; Canac et Kermen, 2016 ; Dehon et Snauwaert, 2018).

Pas plus dans les systèmes de Snow et Wellington que dans ceux de Jacob et Mestrallet il n'est fait mention d'icônes, de dessins, de représentations de la structure de molécules

ou de schémas expérimentaux. Pourtant, ces représentations constituent un mode de communication présent dans les manuels scolaires et les livres de référence en chimie. Quelques auteurs se sont penchés sur la nécessaire tâche d'analyser certaines de ces représentations particulières d'un point de vue sémiotique.

4.3.5. Système de Khanfour-Armalé et Le Maréchal

Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2009) ont ainsi ciblé les représentations moléculaires en abordant les formules brutes, les schémas de Lewis, les représentations de Fischer, de Cram, de Newman et l'écriture topologique. Ils ont rassemblé ces diverses représentations au sein d'un ensemble de systèmes sémiotiques emboîtés, proposant ainsi un modèle intégrant les relations entre ceux-ci (figure 7). Ces relations sont décrites sur base des trois fonctions cognitives des représentations définies par Duval (1995) : laisser une trace pour communiquer (formation), permettre la transformation de l'information (traitement) et faire apparaître divers aspects de l'information (conversion). L'emboîtement, illustré à la figure 7, rend compte des signes communs aux différents systèmes sémiotiques et de la possibilité de conversion favorisée entre systèmes sémiotiques proches dans l'emboîtement.

Les auteurs posent que « toutes les règles utilisées pour produire des formules brutes sont utiles pour les autres types de représentation », ce qui pourrait justifier l'existence, pour le chimiste, d'un seul système sémiotique constituant un « unique langage familier ». Plus loin, les auteurs précisent cependant que, pour l'enseignement, il s'agit de domaines distincts, dont les règles propres doivent faire l'usage d'un apprentissage spécifique. On retrouve ainsi cette « familiarité » (que Jacob rapproche du « concret ») du chimiste avec les langages symbolique et iconique, mais qui n'est en rien transposable à un non-initié, comme le jeune apprenant.

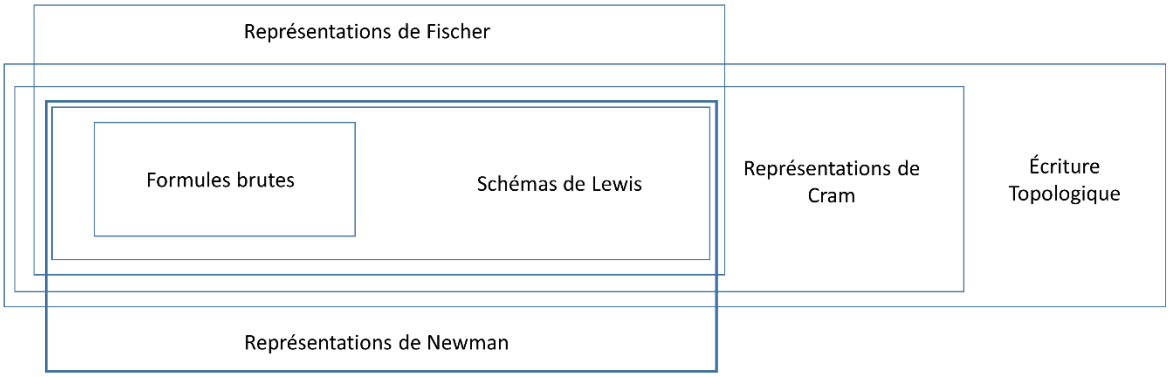


Figure 7. Représentation de certains emboîtements de différents types de représentations moléculaires (d'après Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2009).

Khanfour-Armalé et Le Maréchal effectuent également une analyse sémiotique de ces représentations, notamment en ce qui concerne la distinction à opérer entre symboles et

icônes. Sur la relation de ressemblance, ils écrivent (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2009, p.48) :

> Lorsqu'il s'agit de représenter une molécule, la notion de ressemblance doit être précisée car le représenté n'a jamais été observé visuellement (condition à la base des sémiotiques de Peirce). De plus, quel attribut d'une molécule doit-on utiliser comme critère de ressemblance : sa géométrie, sa densité électronique, son état énergétique ? Qu'est-ce qu'une molécule et qu'est-ce que la science sait d'une molécule qui pourrait nourrir une ressemblance avec une représentation ?

On le voit, le concept d'icône tel que défini par Peirce ne peut s'appliquer complètement quand il s'agit de représenter des molécules. La définition d'Eco, elle, le peut : la forme d'expression que constitue une représentation de Cram correspond à une forme de contenu, qui est la géométrie spatiale de la molécule telle qu'elle est imaginée par les chimistes. Il y a bien là représentation de la façon dont on conceptualise un objet, et donc icône, selon la définition d'Eco. Dans cette même lignée, Édeline parle de représentation de nos « hypothèses interprétatives » de la molécule, plutôt que de la molécule elle-même (Édeline, 2009, p.52).

Les formules moléculaires (ou brutes) sont ici considérées comme un système sémiotique à part entière, en relation avec les autres représentations moléculaires, qui décrivent plus particulièrement la structure des molécules. Elles ne sont pas distinguées des autres représentations moléculaires sur base du critère de ressemblance, mais bien sur base des règles de construction. Les formules et équations chimiques partagent en effet certains signes (par exemple, les symboles chimiques) avec les autres systèmes. Il est également possible de réaliser une opération de conversion d'une représentation dans le système sémiotique des formules moléculaires vers une représentation dans les autres systèmes sémiotiques.

4.3.6. Discussion intermédiaire

L'analyse des modèles langagiers existant dans la littérature nous amène à deux constats.

Premièrement, il apparaît que la sémiotique et la linguistique apportent un éclairage intéressant sur cette question des langages en chimie. Certains auteurs l'exploitent explicitement (Khanfour-Armalé, Mestrallet) quand d'autres l'utilisent implicitement (Lemke, Jacob, Wellington).

Deuxièmement, les modèles proposés sont soit très généraux (Snow, Wellington, Lemke), soit focalisés sur un langage particulier des chimistes (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, Mestrallet). Jacob a bien tenté une description plus large des modes de communication en chimie, mais il s'est limité à la langue symbolique et aux signes linguistiques. De plus, tous ces modèles n'ont pas toujours pour vocation d'éclairer ces langages du point de vue de l'enseignement de la chimie. Il manque donc une

classification à la fois complète et spécifique de l'ensemble des systèmes sémiotiques à l'œuvre dans le processus d'enseignement-apprentissage de la chimie.

Ainsi, les concepts des sciences du langage constitueront nos outils d'analyse afin de construire une nouvelle taxonomie de ces systèmes sémiotiques[8].

4.4. ÉTABLISSEMENT D'UNE NOUVELLE TAXONOMIE LANGAGIÈRE

Abordons brièvement le processus qui a permis l'élaboration de notre taxonomie des systèmes sémiotiques utilisés dans l'enseignement de la chimie. Notre choix est de nous consacrer uniquement à la sémiotique de l'écrit et de l'oral.

4.4.1. Mise en évidence et structuration des langues naturelles

Dans un premier temps, nous avons opéré une distinction entre les langues et les autres systèmes sémiotiques utilisés en chimie. Selon les théories de Saussure (1915), la langue est distincte du langage et de la parole. Elle est, pour rappel, le moyen de mise en œuvre du langage, celui-ci étant défini comme la faculté d'expression et de communication entre les hommes. Si nous adoptons cette définition de la langue selon Saussure, on dénombre **deux langues naturelles** utilisées dans l'apprentissage de la chimie : les élèves et les professeurs peuvent en effet s'exprimer dans leur langue maternelle quotidienne, dite langue « ordinaire » (LO), ou dans une variante de la langue ordinaire (spécifique à la communauté des chimistes) que l'on pourrait appeler « langue scientifique chimique ». Celle-ci est également appelée « langue ordinaire modifiée » (LOm) par Jacob (2001) afin de souligner qu'elle partage les mêmes signes et règles que la langue ordinaire, tout en opérant dans un contexte bien particulier. Cette langue ordinaire modifiée peut être ainsi définie comme « l'usage d'une langue naturelle pour rendre compte techniquement de connaissances spécialisées » (Lerat, 1994, p. 21).

Nous ferons le choix d'expurger de la langue ordinaire modifiée les systèmes de signes artificiels, tels que les systèmes usant de symboles chimiques et mathématiques. Cette approche va à l'encontre de Lerat (1994), celui-ci proposant de définir la langue de

[8] Revenons ici sur la distinction entre taxonomie et modèle. Une taxonomie (ou taxinomie) peut être vue généralement, en sciences, comme une mise en ordre, une catégorisation sur base de critères (taxonomie en biologie, en pédagogie, etc.). Un modèle est diversement défini selon les auteurs. On peut cependant retenir que l'élaboration d'un modèle passe par une sélection d'informations permettant l'explication, l'interprétation, voire la prédiction de phénomènes. Par conséquent, la taxonomie peut servir de base à l'élaboration d'un modèle (explicatif, prédictif), puisqu'elle permet la mise en place d'objets circonscrits qui peuvent ensuite être mis en relation. De plus, l'établissement d'une taxonomie est en elle-même une démarche de modélisation, en ce qu'elle nécessite une sélection d'éléments dans un champ plus vaste. En bref, toute taxonomie peut être vue à la fois comme la base d'un modèle, et le produit d'une démarche de modélisation. Nous utilisons ici le terme « taxonomie » pour rendre compte préférentiellement de la mise en ordre des systèmes sémiotiques, plutôt que de la mise en évidence de relations à visée explicative ou prédictive.

spécialité chimique comme un « plurisystème graphique » incluant d'autres alphabets que l'alphabet latin. Par conséquent, en privilégiant le terme « langue ordinaire modifiée » au terme « langue de spécialité », nous restreignons le type de signes utilisés dans ce système sémiotique.

Précisons également que certains auteurs suggèrent de distinguer la langue de la science « qui se fait » (dans la recherche scientifique) et la langue de la science « qui se transmet » (dans l'enseignement des sciences). Dans le cadre didactique qui nous occupe, c'est la variante enseignée de la langue ordinaire modifiée, telle qu'on la trouve dans les programmes et manuels scolaires, que l'on retiendra.

Dans un deuxième temps et en suivant Jacob (2001), nous avons **divisé la langue ordinaire modifiée en trois niveaux** selon les sujets abordés : désignation (LOm1), lois et relations (LOm2), concepts épistémologiques (LOm3). Le premier niveau de la LOm est lui-même composé de sous-catégories linguistiques. On trouve ainsi dans la LOm1 :

- la désignation d'objets de verrerie (erlenmeyer, bécher, pipette, etc.), d'appareillages (spectrophotomètre, pHmètre, évaporateur rotatif, etc.), d'objets de laboratoire (spatule, tablier, lunettes de sécurité, etc.) ;
- la désignation de substances ; dans ce sous-niveau, la taxonomie sémiotique de Mestrallet permet de rendre compte de la diversité des règles de nomenclature en chimie ;
- la désignation de processus macroscopiques et submicroscopiques (ébullition, réaction chimique, précipitation, etc.) ;
- la désignation de propriétés, de grandeurs ou d'unités (métallique, électronégativité, quantité de matière, mole, etc.).

Ces désignations établies, on peut préciser, dans le deuxième niveau de la langue ordinaire modifiée (LOm2), les relations qualitatives et quantitatives entre objets et concepts par le truchement des lois, modèles et théories. Une relation comme la loi des gaz parfaits appartient à cette catégorie. Enfin, dans le troisième niveau de la LOm (LOm3), on trouve les termes associés à la construction des connaissances en sciences (et donc, en chimie) : démarche scientifique, paradigme, induction, déduction, etc.

4.4.2. Mise en évidence et structuration des langues artificielles

Dans un troisième temps, nous avons distingué **deux langues artificielles** faisant l'objet d'une attention particulière dans les premières années de l'apprentissage de la chimie : la langue symbolique chimique (LS) et la langue symbolique mathématique (LM). Pour rappel, une langue artificielle est une pure construction logique, élaborée volontairement dans un court laps de temps. La langue symbolique chimique est constituée de signes particuliers, dont les symboles chimiques, qui permettent de

représenter les substances et leurs transformations via les formules chimiques et les équations de réaction. La langue symbolique mathématique se distingue de la langue symbolique chimique par le fait qu'elle ne partage ni les mêmes signes (même si certains d'entre eux sont communs), ni les mêmes règles d'usage.

Le terme « langue », pour parler des symboliques chimique et mathématique, peut peut-être choquer certains linguistes puristes. Nous argumentons ce choix en citant trois points communs entre symbolique chimique et le concept de langue en sciences du langage. Primo, la langue symbolique des chimistes est utilisée par une communauté délimitée de personnes. Elle a été forgée à l'intérieur de cette communauté pour répondre à des besoins issus de celle-ci. Il en est de même pour les langues ordinaires comme la langue française, par exemple. Secundo, la langue symbolique des chimistes est structurée par des conventions de nature rationnelle. Les règles d'écriture des formules et équations chimiques suivent en effet une « grammaire » analogue aux règles syntaxiques présentes dans une langue ordinaire. Tertio, l'organisation de la matière par les chimistes est comparable à celle de la langue par le linguiste. Il est possible de trouver les équivalents des morphèmes et des phonèmes de la langue française dans la structure macroscopique et microscopique de la matière, et donc dans la notation symbolique des chimistes[9].

Nous avons ainsi délimité quatre langues dans les systèmes sémiotiques en usage dans l'enseignement-apprentissage de la chimie : deux langues naturelles – constituées de signes linguistiques – et deux langues symboliques – constituées de symboles (figure 8).

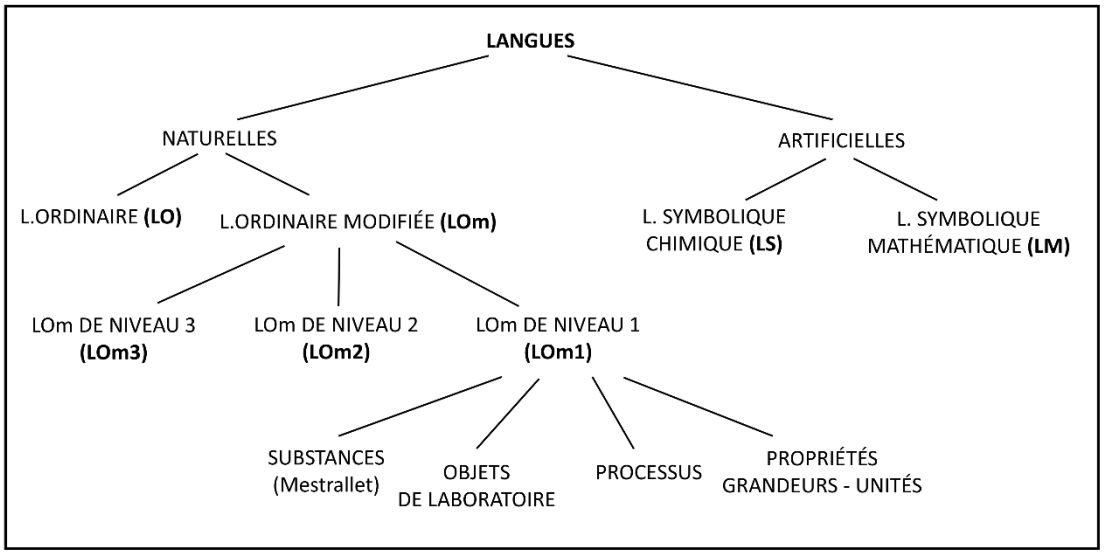


Figure 8. Ensemble des langues naturelles et artificielles utilisées dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.

[9] Nous reviendrons, au chapitre 6, sur les limites de cette analogie entre langue symbolique chimique et langue ordinaire.

Or, il existe des symboles qui, sans faire partie des deux systèmes symboliques ci-dessus, peuvent être utilisés en combinaison avec ceux-ci. Ce sont les symboles représentant les grandeurs, unités de grandeurs et propriétés des substances : par exemple, « n » pour « quantité de matière » ou « mol » pour « l'unité de la quantité de matière ». Ces symboles s'intègrent en particulier dans le système sémiotique de la langue symbolique mathématique, dans des énoncés comme « PV = nRT » ou « n = 4 mol ». Ils peuvent aussi être associés aux symboles de la langue symbolique chimique dans un énoncé comme « C (KCl) = 4 $mol.L^{-1}$ » ou s'intégrer dans une phrase en langue ordinaire modifiée comme « une liaison covalente parfaite est caractérisée par $\Delta\chi = 0$ ». Cet ensemble de signes ne fonctionne donc pas en autonomie, mais s'insère plutôt dans des systèmes plus larges dont ils suivent les règles d'écriture et les formalismes. Notons enfin qu'il faut prendre en compte l'enseignement-apprentissage de ces symboles, lié à celui des termes de la langue ordinaire modifiée. On apprend en effet en même temps le terme « masse molaire » et son symbole (« M »).

4.4.3. Mise en évidence et structuration des systèmes de représentation iconique

Nous avons, dans un quatrième temps, **séparé les systèmes de représentation iconique chimique et la langue symbolique chimique** sur base de la théorie de Peirce (1978). Nous posons, contrairement à Khanfour-Armalé et le Maréchal, que les formules brutes sont à distinguer clairement des autres systèmes de représentation moléculaire, et ce pour deux raisons :

1) Nous pensons, par exemple, qu'une représentation de Cram de la molécule d'eau est iconique par nature (tel que défini par Eco), et ce, même si des symboles sont utilisés pour sa réalisation (figure 9). Elle tend en effet à rendre compte de ce à quoi « ressemble » une molécule d'eau, en mettant en avant ses caractéristiques structurales, telles que les chimistes les imaginent (angles de liaison, géométrie tétraédrique).

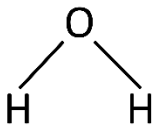


Figure 9. Représentation de Cram de la molécule d'eau.

Ce constat vaut pour tous les types de représentation de l'agencement spatial des atomes dans une molécule ou un cristal. Selon nous, une formule moléculaire comme H_2O est par contre de nature symbolique. Elle se limite à donner des informations de composition et de proportion, sans entretenir de relation de ressemblance avec l'objet qu'elle représente.

2) La langue symbolique chimique se caractérise par des signes particuliers, en nombre réduit, qui diffèrent des signes utilisés pour les représentations de la structure des molécules. Dans une équation de réaction, on trouvera rarement des traits pour signifier des doublets de liaison ou des symboles rendant compte d'un type de configuration (R, S, E, Z), etc. Les représentations de la structure des molécules ne présentent pas non plus les mêmes règles d'écriture : il n'est plus question de suivre un ordre arbitraire d'écriture des symboles chimiques, celui-ci étant imposé par la structure de la molécule.

Qu'il existe une possibilité de conversion d'une représentation du système symbolique chimique (« HCl ») à une autre représentation dans un autre système plus iconique n'implique pas de les considérer comme membres d'un seul grand registre sémiotique, celui des représentations.

On trouve, dans l'enseignement de la chimie, un grand nombre d'icônes. Pour analyser ces représentations iconiques, il faut préalablement distinguer les représentations externes, qui ne sont pas réalisées par les élèves (exemple : un schéma expérimental donné dans un manuel), et les représentations internes qui sont réalisées par les élèves. Parmi celles-ci, on trouve deux catégories : les dessins standardisés et les dessins individualisés. Les dessins standardisés sont caractérisés par des règles de représentation explicites (par exemple, un erlenmeyer) ou implicites (par exemple, un soleil). Les dessins individualisés, eux, ne suivent aucune règle de représentation commune (par exemple, une voiture). Nous distinguons **trois registres iconiques généraux** selon le type d'objet représenté (figure 10).

1) Les représentations iconiques ordinaires (RI^1) pour les dessins d'objets triviaux issus du quotidien des élèves : casserole, bougie, bûche de bois (André *et al.*, 2014). Dans les manuels scolaires, on trouve à la fois des dessins individualisés (une casserole) et des dessins standardisés, suivant des règles de représentation implicites (une bougie). Par contre, il n'existe pas, a priori, de représentations ordinaires dont les règles de représentation sont explicites et conventionnelles.

2) Les représentations iconiques d'appareillage et de verrerie (RI^2) pour les objets de spécialité chimique. Les RI^2 sont caractérisées par des dessins standardisés grâce à des règles de représentation explicites. On trouve souvent, à la fin de manuels scolaires, des fiches-outils décrivant les représentations standardisées de la verrerie de laboratoire (Pirson *et al.*, 2015 ; Mélot et Azaz, 2016).

3) Les représentations iconiques microscopiques (RI^3) pour les objets microscopiques chimiques. Les RI^3 sont caractérisées par des dessins fortement standardisés, aux règles de construction explicites. Ces règles de représentation constituent des objectifs d'apprentissage dans les curricula. Les représentations de molécules, d'atomes ou d'ions sont très variées selon la caractéristique que

l'on veut mettre en avant. Une formule semi-développée plane suffit ainsi à identifier une fonction chimique. Mais pour distinguer deux molécules chirales, il sera nécessaire d'adopter d'autres representations, comme par exemple une représentation de Cram. Nous pouvons inclure dans cette catégorie le modèle des systèmes sémiotiques emboîtés de Khanfour-Armalé et Le Maréchal (2009).

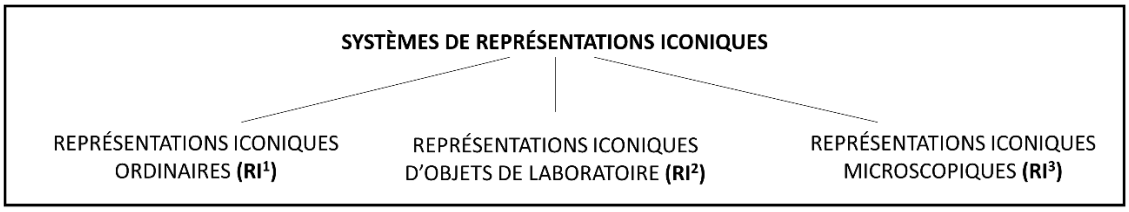


Figure 10. Ensemble des systèmes de représentations iconiques utilisés dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.

La mise en évidence de l'existence de quatre langues et de trois types de représentations iconiques ne suffit pas à épuiser les systèmes sémiotiques de l'oral et de l'écrit utilisés au cours de chimie. En effet, il est demandé aux élèves, dès la première année de l'enseignement secondaire, de réaliser des graphiques rendant compte de l'évolution de la température en fonction du temps lors de changements d'état, ou encore de compléter des schémas représentant le cycle de l'eau (André *et al.*, 2014). Il est donc important de considérer ce type de système sémiotique, par essence multi-connecté aux autres systèmes.

4.4.4. Mise en évidence et structuration des systèmes de représentation graphique

Dans un cinquième et dernier temps, nous avons intégré à notre taxonomie un système de représentations « graphiques » (RG). Il comporte des mises en relations qualitatives (organigramme de la matière, schéma légendé d'un montage expérimental, tableau de comparaison de propriétés, etc.) et quantitatives (graphiques, histogrammes, tableau de données, etc.), comme illustré à la figure 11.

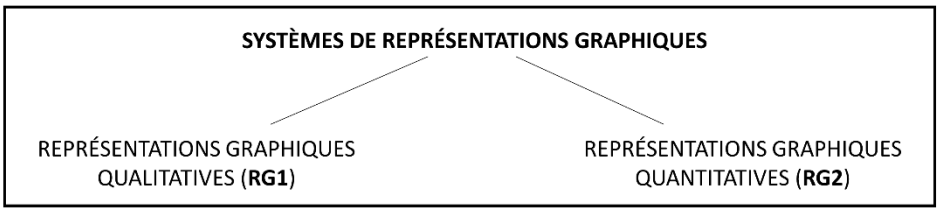


Figure 11. Ensemble des systèmes de représentations graphiques utilisés dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.

L'une des difficultés principales du registre graphique tient au fait que les autres systèmes sémiotiques sont combinés dans ce type de représentations.

Or, les systèmes sémiotiques convoqués varient logiquement selon que la mise en relation soit qualitative ou quantitative. Pour une mise en relation quantitative (RG2), la langue mathématique et la langue symbolique chimique sont massivement utilisées. Pour une mise en relation qualitative (RG1), une variété plus importante de système de signes est convoquée : langue ordinaire, langue ordinaire modifiée (LOm1 et LOm2), langue symbolique chimique (LS), représentations iconiques (RI^1, RI^2, RI^3). La compréhension par les élèves des représentations appartenant au registre graphique dépend donc de leur capacité à identifier et à interpréter les éléments langagiers constitutifs de ces représentations (LOm1, LS, RI^1, RI^2, RI^3), ce qui constitue en soi un défi cognitif.

En bref, notre taxonomie (figure 12) permet d'avoir une idée à la fois complète et précise des systèmes sémiotiques de l'oral et de l'écrit à l'œuvre dans le processus d'enseignement-apprentissage de la chimie.

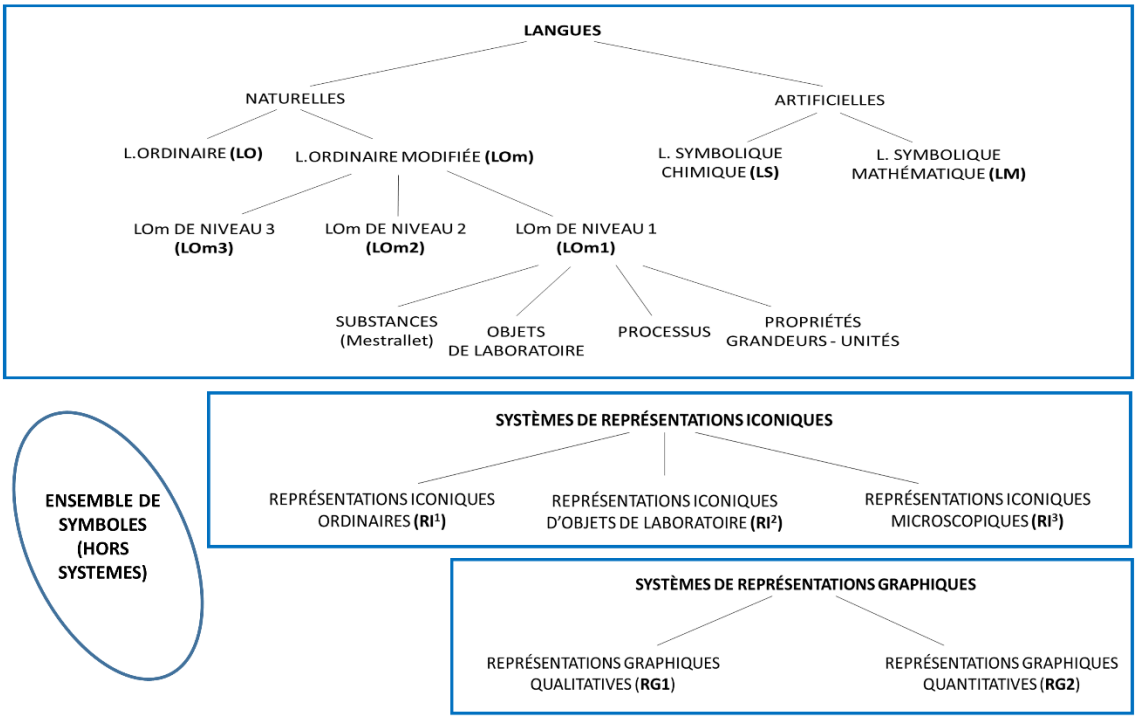


Figure 12. Taxonomie des systèmes sémiotiques de l'écrit et de l'oral à l'œuvre dans l'enseignement-apprentissage de la chimie. Un ensemble de symboles n'appartenant pas strictement à ces systèmes, mais qui peuvent intervenir ponctuellement dans ceux-ci, est adjoint.

4.5. Discussions

4.5.1. Caractéristiques linguistiques principales de la symbolique chimique

Notre objectif était de cerner plus précisément la place qu'occupent les formules et équations chimiques dans le concert des autres systèmes sémiotiques. Il est apparu que

les modèles langagiers issus de la littérature ne nous permettaient pas, d'une part, de délimiter les contours d'une langue symbolique chimique, ni, d'autre part, de disposer d'une taxonomie complète et spécifique à la chimie du point de vue de l'enseignement-apprentissage. À l'aide de notre taxonomie basée sur les concepts des sciences du langage (terminologie, linguistique, sémiotique), nous pouvons maintenant situer plus précisément la position des symboles, formules et équations chimiques.

- Ces représentations font partie de la langue symbolique chimique, l'une des quatre langues constituant les systèmes sémiotiques en chimie.
- C'est une langue artificielle, construite par les chimistes, dans le but de rendre compte des substances et des transformations chimiques, aux niveaux macroscopique et microscopique.
- Elle est caractérisée par des symboles divers (chiffres, flèches, lettres, etc.) et par des règles syntaxiques propres.

4.5.2. Relations entre symboles, termes, concepts et objets

Notre étude linguistique permet de relier plus finement les systèmes sémiotiques et les théories des niveaux de savoir, et ce dans le but d'éclairer certaines sources de difficultés des apprenants face à la symbolique chimique. Pour cela, la terminologie offre un modèle permettant d'intégrer la langue symbolique (LS), la langue ordinaire modifiée de type 1 (LOm1) et les niveaux macroscopique et microscopique. En effet, en terminologie, les termes scientifiques présentent deux facettes : la désignation et le concept. L'objet (réel) vient clore le triangle en fournissant un référent. En chimie, si on prend l'exemple des éléments chimiques, le triangle peut s'enrichir des symboles chimiques connectés aux désignations linguistiques. Le symbole est relié indirectement au concept et à l'objet via la désignation linguistique (figure 13).

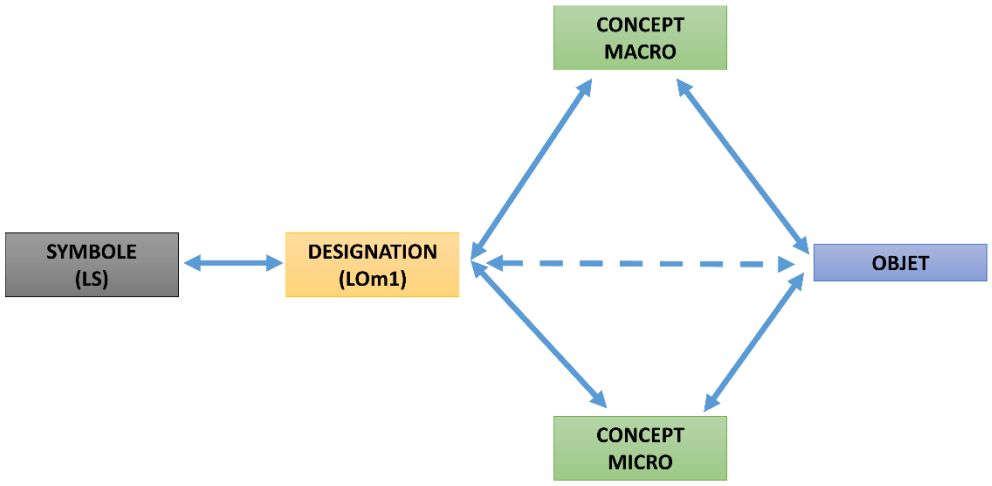


Figure 13. Représentation, pour un élément chimique, des relations entre désignation, symbole, concepts macroscopiques et microscopiques, et objet.

Les relations qu'entretient la désignation linguistique avec le concept et l'objet peuvent être projetées sur le symbole : ainsi, le symbole « Na » est susceptible de véhiculer les caractéristiques du concept « sodium » et les propriétés de l'objet « sodium ». Or, selon Taber (2013), les concepts en chimie sont de deux types : macroscopique ou microscopique. Dans le cas du sodium, on peut effectivement distinguer les caractéristiques macroscopiques (brillant, réagit avec l'eau, etc.) et les caractéristiques microscopiques (nombre atomique, électronégativité, structure électronique, etc.) du concept de sodium. Notons que cette projection des propriétés sémantiques d'une désignation sur le symbole est à l'origine de la variabilité des fonctions du niveau symbolique explicitée au chapitre 3. Il n'est en effet pas étonnant que le niveau symbolique soit explicatif pour certains auteurs et descriptif pour d'autres si, par projection, un symbole endosse les fonctions du modèle qu'il représente.

En chimie, la relation entre désignation et objet est indirecte. Elle passe par l'entremise du concept, ce pourquoi nous avons figuré le lien entre désignation et objet par des traits en pointillés dans la figure 13. En terminologie, l'objet est défini généralement comme un élément de la réalité qui peut être conçu ou perçu. Il est une « matière à description ». Certaines propriétés de l'objet sont sélectionnées par les chimistes pour être converties en caractéristiques du concept. Ce sont ces caractéristiques conceptuelles qui sont connectées directement à la désignation linguistique dans le langage scientifique. Par conséquent, la langue ordinaire modifiée des chimistes a davantage pour vocation de décrire des concepts que de décrire des objets.

Reprenons l'exemple du sodium. En chimie, l'objet « sodium » n'est décrit en réalité que par des concepts, c'est-à-dire des constructions mentales rendant compte de certaines propriétés : il est métallique, réagit avec l'eau, est malléable, se compose d'atomes de sodium, comporte des liaisons métalliques, etc. Au bout d'une démarche de combinaison des caractéristiques, le concept « sodium » (et ses composantes macroscopiques et microscopiques) remplace alors l'objet « sodium » dans le discours des chimistes. Ces relations peuvent s'intégrer au triangle des terminologues (figure 13). Cette figure entre en résonance avec le modèle des niveaux de savoir de Taber (2013). Dans le cas du sodium (ou de tout autre terme rapportant à un élément), les relations sont en réalité plus complexes (figure 14).

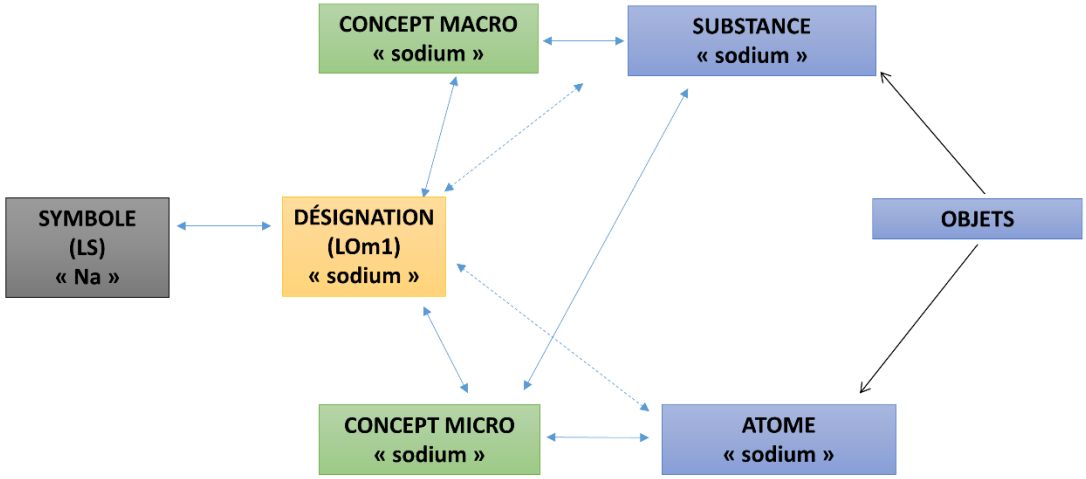


Figure 14. Représentation, pour un élément chimique (ici, le sodium), des relations entre désignation, symbole, concepts macroscopiques et microscopiques, et les objets « substance » et « atome ».

En effet, on peut mettre en évidence le fait que la désignation « sodium » représente en réalité deux objets différents : la substance « sodium » et l'atome de sodium[10]. Dans le cas de l'atome de sodium, il n'y a pas lieu d'envisager une composante macroscopique, alors qu'il est possible de décrire la substance « sodium » macroscopiquement (via ses propriétés observables) et microscopiquement (comme un ensemble d'atomes). La désignation « sodium » représente également un élément chimique. Or, l'élément chimique est un concept, une catégorie virtuelle regroupant des espèces chimiques possédant certaines caractéristiques communes, et non un objet réel. Cette acception toute particulière du terme « élément » a été exclue de la figure 14 afin de se concentrer sur les objets réels représentés et leurs concepts associés.

L'ensemble des relations mises au jour dans cette figure permet d'éclairer certaines problématiques rencontrées dans l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique.

Tout d'abord, remarquons qu'une unique désignation comme « sodium » renvoie au minimum à un symbole (« Na »), deux objets réels (substance « sodium » et atome « sodium ») et trois concepts (substance « sodium », atome « sodium », ensemble d'atomes « sodium »), en plus du concept particulier d'« élément sodium ». La figure 14 met l'accent sur le rôle central joué par la langue ordinaire modifiée, spécialement quand il est question des éléments chimiques. Les désignations linguistiques sont non seulement au centre des relations linguistiques, mais également au centre des relations liant concepts et objets, via les niveaux de conceptualisation. Cette polysémie des

[10] Qualifier l'atome d'objet réel reste bien entendu discutable. Cependant, nous posons l'hypothèse générale que le concept d'atome renvoie à une réalité matérielle qui n'est pas approchable par nos sens.

désignations, et donc des symboles chimiques, est potentiellement à la source de certaines confusions observées précédemment dans les classes (voir chapitre 2).

Ensuite, la mise en évidence de la relation entre symbole et désignation linguistique permet de modéliser le phénomène de « boucle symbolique ». Dans ce cas, l'élève ne se réfère pas aux concepts et objets, il conçoit le symbole « Na » comme une abréviation de la désignation « sodium » (Al-Kunifed *et al.*, 1993). C'est, à notre connaissance, la première modélisation du phénomène de « boucle symbolique » dans la littérature scientifique.

La figure 14 permet aussi de montrer qu'une même désignation comme « sodium » génère deux significations microscopiques rapportant à deux objets différents : la substance « sodium » composée d'atomes de sodium liés, et l'atome de sodium lui-même. Les représentations mentales du sodium comme corps pur ou comme atome sont intimement liées aux objets réels correspondants. La distinction, dans un discours, entre deux objets appartenant à deux niveaux de conceptualisation différents (macro et micro) et représenté par une même désignation constitue un défi majeur pour les enseignants. Ce constat entre en résonance avec d'autres études stipulant la nécessité pour le professeur de préciser à quel niveau se situe son discours (par exemple, Davidowitz et Chittleborough, 2009).

Enfin, notre mise en relation interroge le lien entre la désignation linguistique et le concept d'élément. Ni macroscopique, ni microscopique, ni relié à aucun objet réel, le concept d'élément doit pourtant être considéré dans l'ensemble des significations véhiculées par la désignation « sodium ». De plus, l'élément est lié aux deux objets réels que sont la substance « sodium » et l'atome « sodium ». Il est donc nécessaire, dans l'enseignement de la chimie, de tenir compte de cette troisième voie de signification, encore plus abstraite car dépassant le cadre des niveaux microscopique et macroscopique, ainsi que de reconnecter autant que possible le concept d'élément aux objets concrets dont il est épistémologiquement issu.

4.5.3. Distinction terminologique entre corps moléculaires et corps ioniques

Ce travail sur la désignation linguistique des éléments chimiques peut s'étendre à l'ensemble du vocabulaire de la langue ordinaire modifiée de niveau 1. Il permet de caractériser plus finement les corps moléculaires et les corps ioniques. Ainsi, les désignations linguistiques de corps moléculaires sont reliées de manière égale à deux objets différents. Par exemple, la désignation « chlorure d'hydrogène » renvoie à la substance « chlorure d'hydrogène » ainsi qu'à la molécule « chlorure d'hydrogène » (figure 15). La conceptualisation microscopique reliée à l'objet « substance » inclut les représentations des états de la matière des corps moléculaires. C'est à ce niveau que l'état gazeux (de « $HCl_{(g)}$ », par exemple) est décrit à l'aide de représentations de plusieurs molécules.

Pour une substance composée ionique, la modélisation se voit quelque peu modifiée par le remplacement de l'objet « molécule » par les objets « ions » (figure 16). Le concept de « réseau ionique », à cheval entre les niveaux macroscopique et microscopique, décrit l'objet « substance » d'un point de vue microscopique.

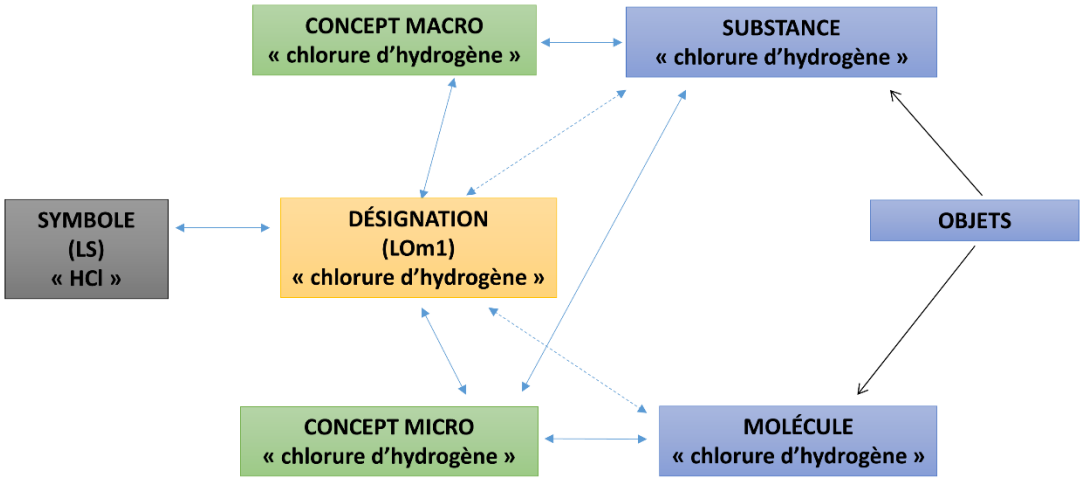


Figure 15. Représentation des relations entre désignation, formule symbolique, concepts macroscopiques/microscopiques et objets pour les désignations de corps moléculaires (ici, le chlorure d'hydrogène).

Les figures 15 et 16 modélisent une des difficultés exposées dans le chapitre 2 : un grand nombre d'élèves conçoivent la formule chimique « NaCl » comme la représentation d'une molécule présentant des liens intramoléculaires covalents et exerçant avec ses semblables des interactions ioniques (Taber et Coll, in Gilbert *et al.*, 2002). On sait que ni la formule chimique ni la désignation n'indiquent si le corps est moléculaire ou ionique, ce qui entretient la confusion. Cette carence symbolique et linguistique peut être dépassée en travaillant spécifiquement les objets « substance » et « ions », ainsi que leur conceptualisation au niveau microscopique.

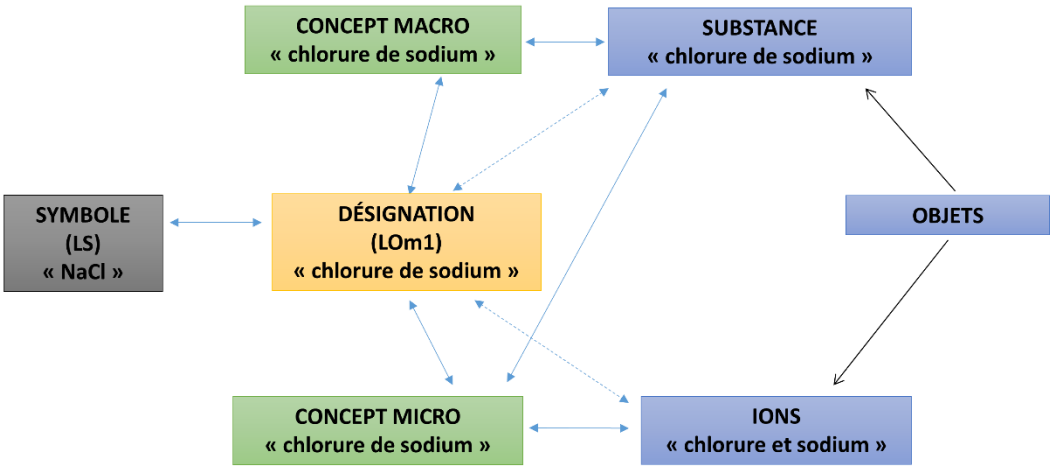


Figure 16. Représentation des relations entre désignation, formule symbolique, concepts macroscopiques/microscopiques et objets pour les désignations de corps ioniques (ici, le chlorure de sodium).

4.5.4. Difficultés relatives à l'usage de termes de la langue ordinaire (LO)

Dans les théories des niveaux de savoir, la langue ordinaire est citée dans la description usuelle des phénomènes empiriques (Taber, 2013). Elle serait l'outil langagier qui permet une première approche d'un phénomène, spécialement au début de l'apprentissage de la chimie. La langue ordinaire est, à ce titre, incontournable. Elle doit être prise en compte dans l'apprentissage des élèves en considérant les obstacles didactiques que son usage peut générer. Nous développerons ici le cas des DMV ou « dual-meaning vocabulary » (Song et Carheden, 2014). Ce sont des désignations qui ont pour particularité de renvoyer à des objets/concepts dans le domaine de la chimie ainsi qu'à des objets/concepts dans l'usage quotidien. Par exemple, en plus des significations chimiques, la désignation « solution » s'enrichit d'une signification conceptuelle dans la langue ordinaire : c'est la résolution finale d'un problème donné. La figure 17 établit les relations entre les différentes facettes du terme « solution ». De tels exemples sont nombreux dans l'apprentissage de la chimie : « base », « réaction », « polaire », « sel » sont des termes associés à des significations usuelles non-pertinentes en chimie (Song et Carheden, 2014). La construction de la langue ordinaire modifiée passe ainsi par un écueil considérable. Les élèves doivent régulièrement connecter de nouvelles significations à des désignations déjà fortement chargées sémantiquement. Si la langue ordinaire peut, de prime abord, jouer le rôle de pont entre le vocabulaire des élèves et le vocabulaire des chimistes, elle peut aussi mener à des confusions tenaces qui sont susceptibles de subsister tout au long d'un cursus.

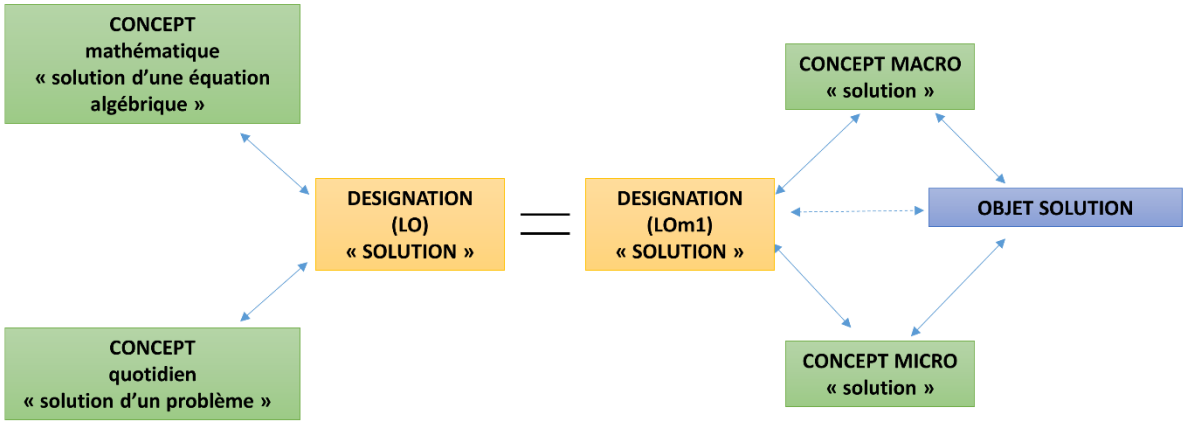


Figure 17. Représentation des relations entre désignation, concepts macroscopiques et microscopiques, concepts usuels et objet pour la désignation « solution ».

4.5.5. Difficultés relatives aux représentations iconiques microscopiques (RI^3)

Les registres de représentation iconique proposés dans notre taxonomie présentent des relations très différentes avec les concepts macroscopiques et microscopiques. Nous ne développerons pas ici les relations entretenues dans le cas des représentations ordinaires de type 1 et 2, celles-ci n'étant pas reliées directement à la symbolique chimique. Par contre, les représentations iconiques microscopiques (RI^3) sont reliées à la langue ordinaire modifiée de niveau 1 et à la langue symbolique. Elles s'inscrivent au niveau microscopique et servent, bien sûr, à la représentation des molécules, mais également à la représentation des réactions chimiques, des changements d'état, des mélanges, etc.

Les RI^3 viennent enrichir les relations entre désignation de corps composé, formule chimique, concept et objets (figure 18). En effet, leur nature microscopique les connecte directement aux concepts microscopiques. Les représentations iconiques microscopiques sont également reliées aux désignations linguistiques et aux formules symboliques : la représentation d'une molécule d'acide chlorhydrique est liée, par nature, à la désignation « chlorure d'hydrogène » ainsi qu'à la formule moléculaire « HCl ». Dans la figure 18, nous avons dédoublé les représentations iconiques microscopiques selon l'objet qu'elles décrivent. Un objet macroscopique peut être décrit microscopiquement à l'aide de plusieurs molécules en interaction (« représentation moléculaire (plusieurs entités) »). A contrario, un objet microscopique peut n'être décrit que par une seule représentation moléculaire (« représentation moléculaire (une seule entité) »).

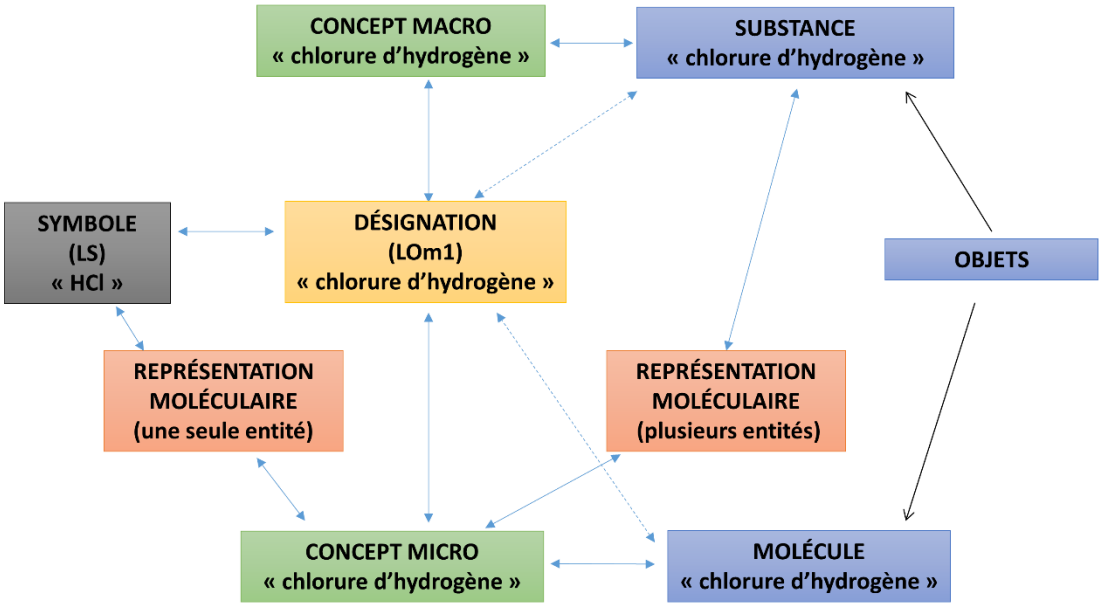


Figure 18. Représentation des relations entre désignation, formule symbolique, représentations moléculaires, concepts macroscopiques/microscopiques et objets pour une désignation de corps composé moléculaire.

La figure 18 confirme le rôle central que tiennent les désignations linguistiques de substances, en relation directe ou indirecte avec l'ensemble des concepts, objets, symboles et représentations iconiques. Elle montre également le rôle potentiel de « pont » que peuvent jouer les représentations iconiques : pont vers la langue ordinaire modifiée, pont vers la langue symbolique, pont vers les concepts microscopiques.

Nous pouvons également ici modéliser l'assertion de Talanquer (2011) à propos du lien entre les schémas particulaires (qui apparaissent sous le terme « représentation moléculaire » à la figure 18) et les concepts microscopiques. Pour rappel, Talanquer met en doute le fait qu'une tâche de conversion d'une équation chimique en un schéma particulaire soit un indicateur fiable de la maîtrise des concepts de nature microscopique par les élèves. On voit en effet, dans la figure 18, que la conversion d'une formule chimique en une représentation moléculaire peut se faire sans connexion au concept microscopique. Il s'agit là d'une relation non-nécessaire ; il est donc tout à fait possible que les élèves appliquent des règles de conversion d'un système sémiotique à un autre sans se poser la question de ce qui est effectivement représenté du point de vue chimique. Nous proposons le terme « boucle iconique » pour caractériser l'hypothèse de Talanquer, c'est-à-dire un lien exclusif et réciproque entre langue symbolique et représentation microscopique. Cette « boucle iconique » s'ajoute à la « boucle symbolique » qui relie exclusivement la langue symbolique et les désignations terminologiques (figure 19).

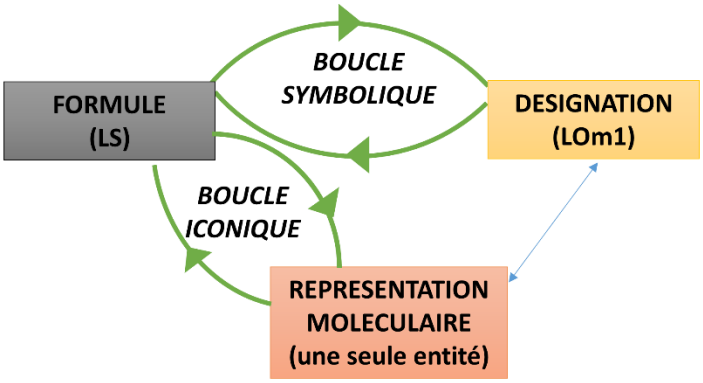


Figure 19. Représentation de la boucle symbolique (entre formule chimique et désignation linguistique) et de la boucle iconique (entre formule chimique et représentation mono-particulaire).

4.6. Conclusions

Ce chapitre avait pour vocation de répondre à quatre questions de recherche ambitieuses. Nous avons montré, dans un premier temps, que les concepts de linguistique et de terminologie constituent un outil de choix pour analyser les modèles linguistiques proposés dans la littérature scientifique. Il ressort de cette analyse qu'il manque une classification à la fois complète et spécifique de l'ensemble des systèmes sémiotiques à l'œuvre dans le processus d'enseignement-apprentissage de la chimie. Plus spécifiquement, la position des symboles chimiques dans les modèles proposés tient parfois du paradoxe : outil quotidien du chimiste, ils figurent au premier niveau chez Jacob (2001), quand, en tant que représentation la plus abstraite, ils occupent le dernier niveau chez Wellington (2000).

Fort de ces constats, nous avons établi une taxonomie des systèmes sémiotiques de l'oral et de l'écrit à l'œuvre dans le processus d'enseignement-apprentissage de la chimie. La symbolique chimique y constitue l'une des quatre « langues ». Artificielle par nature, la langue symbolique chimique entretient des relations particulières avec les autres systèmes sémiotiques, susceptibles, entre autres, d'éclairer les difficultés des élèves face aux formules et aux équations chimiques.

Nous avons ainsi tenté de modéliser certains phénomènes décrits dans le chapitre 2. Un des résultats majeurs consiste en la modélisation d'une « boucle symbolique » et d'une « boucle iconique » qui caractérisent des relations exclusives entre systèmes sémiotiques sans connexion avec les concepts chimiques. Cette modélisation a été rendue possible par l'insertion du triangle des terminologues dans le cadre théorique des niveaux de savoir de Taber (2013). En opérant de cette manière, nous avons inversé la perspective classique : au lieu de partir des concepts, nous sommes partis des signes. Cette perspective sémiotique a l'avantage de rendre plus aisée l'identification de données à l'intérieur de la classe, les élèves et le professeur s'échangeant des signes, et

non des concepts. Il nous reste cependant à définir les liens précis existant entre les signes, les concepts et les objets dans l'esprit des élèves[11].

Dans le chapitre suivant, nous explorerons la symbolique chimique du point de vue épistémologique. En effet, l'étude de la construction progressive de la langue symbolique des chimistes permettra, en théorie, de saisir les relations historiques qu'elle entretient avec les autres systèmes sémiotiques ainsi qu'avec les concepts et objets chimiques. Nous posons ainsi l'hypothèse que l'héritage de ces anciennes relations a des conséquences sur l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique à l'école.

[11] Voir le chapitre 7 pour l'établissement expérimental de ces liens.

Chapitre 5

Epistémologie de la langue symbolique des chimistes : impacts didactiques

Créer une science n'est donc autre chose que faire une langue.

(Condillac, 1798, p. 288)

La phrase de Condillac est bien connue : elle fait l'objet de nombreuses citations dans des ouvrages traitant de l'histoire des sciences, et plus particulièrement de l'évolution des langues en sciences (Dagognet, 1969 ; Laszlo, 1993). Cependant, rares sont ceux qui citent la suite du propos du philosophe français : « […] et étudier une science n'est autre chose qu'apprendre une langue bien faite » (Condillac, 1798, p. 228).

Ce détour par l'apprentissage des sciences, et donc des langues qui leur sont dédiées, est essentiel pour présenter la suite du résultat de nos recherches. Nous nous permettons même d'inverser la proposition de Condillac en arguant que l'étude de la langue permet d'apprendre la science. Dans ce chapitre, c'est par le versant épistémologique de l'étude de la langue symbolique des chimistes que nous explorons les sources des difficultés d'apprentissage des apprenants. En parlant du concept d'équation de réaction, Laugier et Dumon (2004b) faisaient remarquer : « [I]l serait illusoire de croire qu'alors que les scientifiques ont mis des siècles à le construire, les élèves seraient capables de l'utiliser […] sans rencontrer de problèmes » (Laugier et Dumon, 2004b, p. 1133).

Ce décalage entre le temps long passé à forger un concept et le temps court dévolu à son enseignement-apprentissage constitue une grande tension dans le travail quotidien des enseignants : comment aborder un savoir si riche en quelques heures de cours ? Comment choisir les points à mettre en évidence et ceux à passer sous silence ? Comment faire pour que les apprenants, rencontrant souvent les mêmes problèmes que ceux rencontrés par leurs glorieux ancêtres, puissent les résoudre dans le temps de la classe ?

Pour répondre à ces questions, un enseignant doit se plonger dans les archives de sa discipline. Il ne suffit pas, en effet, de connaître le savoir à enseigner pour aborder intelligemment la langue symbolique des chimistes : il s'agit de se promener à nouveau, avec un regard renouvelé, dans « cette sorte de musée qui sans cesse renvoie le chimiste d'aujourd'hui, de façon subliminale, à un climat symbolique toujours actif. » (Edeline, 2009, p. 45). C'est par l'analyse critique de ce « climat symbolique » que l'enseignant pourra, en tirant les leçons du passé, construire celles de l'avenir.

Nous posons la question de recherche suivante : Quelles relations peut-on construire entre l'analyse épistémologique de la langue symbolique des chimistes et certaines difficultés rencontrées par les apprenants ?

5.1. INTRODUCTION ET MÉTHODOLOGIE

L'histoire de la langue symbolique chimique, et plus généralement des systèmes sémiotiques construits par les chimistes, peut être envisagée selon plusieurs points de vue, mais toujours en suivant des lignes de faille, des ruptures.

Edeline (2009) s'est ainsi intéressé au type de signes convoqué dans les systèmes sémiotiques dominants selon les époques, mettant en évidence un aller-retour entre icône et symbole. L'icône alchimique cède le pas au symbole de Berzelius, qui lui-même se fait dépasser par les représentations iconico-symboliques telles que les représentations de Cram ou les projections de Newman. Les ruptures dégagées sont ici d'ordre heuristique : si la fonction sémiotique est conservée (désigner les corps chimiques par des signes), la variabilité de la fonction heuristique permet l'aller-retour entre les signes et l'expérimentation (Edeline, 2009).

Pour développer leur analyse épistémologique de la langue symbolique des chimistes, d'autres auteurs, comme Liu et Taber (2016), se basent sur les besoins rencontrés par les scientifiques dans leurs pratiques. En utilisant le cadre théorique de la sémiotique sociale, ils interprètent les signes comme des ressources sémiotiques que les chimistes utilisent pour agir sur la réalité. En ce sens, l'émergence de la nomenclature de Lavoisier est une réponse à des besoins sociétaux tels que l'enseignement des sciences au plus grand nombre. La langue symbolique est, quant à elle, une réponse à une limite de la langue ordinaire modifiée, incapable de rendre compte de changements quantitatifs complexes et continus.

En plus de ces ruptures sociétales et techniques, Dagognet (1969) propose un point de vue plus langagier sur l'épistémologie des langages en chimie. Ainsi la nomenclature de Lavoisier est-elle qualifiée de « physico-grammaticale » ou encore de « voco-structurale », laissant entendre que la grammaire de la langue des chimistes doit être un miroir de la grammaire de la nature. Cet ensemble sera vite dépassé par l'apparition de la chimie « scripturale et géométrique » qui, nous le verrons, ne sera pas en mesure d'enterrer son ancêtre voco-structural.

Enfin, il est également possible, comme Laugier et Dumon (2004b) d'envisager une lecture de l'histoire des systèmes sémiotiques en chimie, à rapprocher des niveaux de savoir de Johnstone (1982). Avec sa nomenclature et sa première équation de réaction, Lavoisier connecte le niveau macroscopique et une première écriture de nature symbolique. Il faudra attendre Dalton et Berzelius pour que le niveau symbolique soit également relié au niveau microscopique ou « atomico-moléculaire ».

Ces différents points de vue vont nous permettre de retracer, de manière chronologique, l'histoire de l'origine des symboles utilisés par les chimistes, ainsi que de l'évolution des modifications apportées par les différents contributeurs. Nous adoptons ici une trame chronologique classique, qui épouse finalement assez bien les sinuosités de ce long fleuve (très peu) tranquille qu'est l'histoire de la symbolique chimique. En outre, nous proposons en annexe une brève présentation des différents scientifiques cités dans ce chapitre[1].

5.2. DE L'ICÔNE ALCHIMIQUE AUX FLÈCHES DE RÉACTION

5.2.1. L'icône alchimique

Dans son article sur les fonctions des symboles chimiques, Edeline (2009) souligne l'importance de l'héritage que nous ont laissé les alchimistes, notamment européens. Il pourfend l'idée d'une alchimie vue comme une « illusion désolante », une « énorme supercherie » (Edeline, 2009, p. 46). Au contraire, l'alchimie se base sur des principes qui ne s'avèrent guère éloignés des principes scientifiques contemporains, comme les principes d'unité, de simplicité ou de correspondance, sur lesquels nous reviendrons. La différence notable avec la science contemporaine réside dans la primauté de l'image, la confiance en un signe représentant l'équivalent magique du signifié. Nul besoin de mots complexes quand l'image parle d'elle-même, quand le signe (ici, iconique) contient les informations nécessaires et suffisantes à sa pleine compréhension[2].

5.2.1.1. Symboles, icônes et hybrides

Les alchimistes disposent de trois groupes de signes : pour les appareils (à dominante iconique), pour les opérations (symbolico-iconiques) et pour les substances (essentiellement symboliques)[3]. Le signe représentant l'appareil a pour vocation de lui ressembler, d'en saisir les caractéristiques les plus importantes (figure 1).

Figure 1. Quelques icônes alchimiques représentant des appareils (Edeline, 2009).

[1] Dans le texte, un astérisque a été placé derrière les noms des scientifiques compilés dans l'annexe A.
[2] Edeline cite l'exemple frappant du *Mutus Liber*, ouvrage alchimique du XVIIème siècle, qui offre la particularité de n'être composé que d'images, sans aucun mot de commentaire ou d'introduction.
[3] Pour la distinction entre signe, symbole et icône : voir chapitre 4.

L'opération, intrinsèquement dynamique, doit pourtant être représentée par un signe fixe, souvent à mi-chemin entre l'icône et le symbole (figure 2).

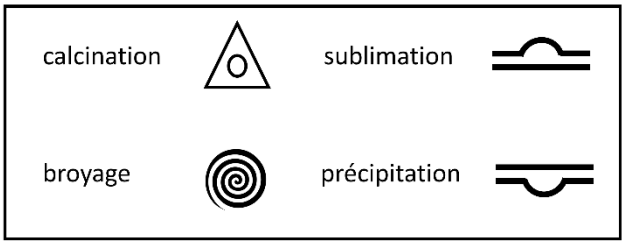


Figure 2. Quelques signes alchimiques représentant des opérations (Edeline, 2009).

Par exemple, la calcination est représentée par un cercle au centre d'un triangle : le cercle figure le résidu de la calcination (partie iconique) quand le triangle est le signe alchimique du feu (partie symbolique).

Enfin, les signes représentant les substances sont très majoritairement de nature symbolique, de par la difficulté de rendre compte de l'état liquide, de l'état gazeux, du solide poudreux, etc. Les alchimistes ont donc préféré forger des conventions arbitraires entre les substances et leurs symboles (figure 3).

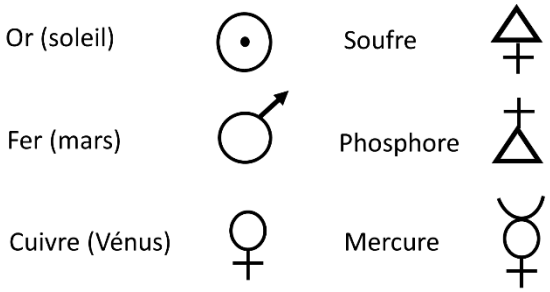


Figure 3. Quelques symboles alchimiques représentant des substances (Edeline, 2009).

Ces signes graphiques sont toujours préférés aux lettres de l'alphabet, jugées trop peu signifiantes. Ils doivent en effet jouer plusieurs rôles qui nécessitent des formes graphiques particulières :

- Le symbole sert de moyen mnémotechnique ou d'abréviation. Par exemple, la correspondance entre le cuivre et son symbole passe par l'intermédiaire de la déesse Vénus. Le miroir est ici le symbole à la fois de la féminité, de la déesse Vénus, de la planète Vénus et de la substance « cuivre ». Les alchimistes ont ainsi parfois recours à une part iconique dans leurs représentations des substances (miroir, lune, fleur, soleil, etc.) pour favoriser la mémorisation de celles-ci.
- Le symbole doit rendre compte des relations que la substance entretient avec d'autres substances ou avec les quatre éléments, plutôt que des propriétés de la

substance elle-même. Le phosphore et le soufre sont ainsi tous deux liés au feu (triangle orienté vers le haut)[4], ce qui leur confère une parenté (figure 3).

- Le symbole doit rappeler visuellement la théorie anthropocosmique qui supporte l'activité des alchimistes. La correspondance entre les planètes et les métaux est une caractéristique essentielle de la nomenclature alchimique, tendant à projeter l'arrangement cosmique sur la composition de la matière, tout en prêtant des qualités humaines tant aux substances qu'aux planètes. Le mercure est, par exemple, jugé féminin et passif, alors que le soufre est décrit comme masculin et actif.

De telles contraintes sémantiques ne pouvaient faire l'objet de consensus stricts à l'époque des alchimistes. Il en résulte une absence d'univocité dans les représentations des unités de la matière : plusieurs symboles sont utilisés pour décrire une même substance (figure 4).

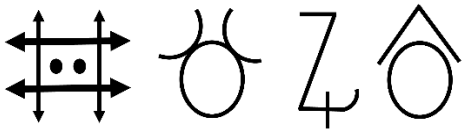


Figure 4. Quelques symboles alchimiques représentant la substance zinc.

Ce fait entrave la communication entre communautés alchimiques distinctes mais il permet par contre de garantir une certaine discrétion sur le contenu d'un traité alchimique, qui ne devient lisible que pour les membres initiés au code avec lequel il a été écrit.

5.2.1.2. Principes alchimiques dans la chimie moderne

Il est également possible de retrouver certains principes fondateurs de la chimie moderne dans l'écriture symbolique des alchimistes. Premièrement, ceux-ci font de la constance dans le changement la pierre angulaire de leur travail. La chimie d'aujourd'hui s'est construite sur cette ambivalence. En effet, la conservation de l'énergie et de la masse, conjuguée à la transformation des substances en d'autres substances, sont les concepts reliés aux deux facettes principales de la chimie moderne : décrire la structure de la matière et décoder la réactivité des substances.

Deuxièmement, la recherche systématique de symétries et d'antagonismes constitue un élément de structuration des démarches alchimiques. Tout est question d'équilibre, d'attraction et de répulsion, de chaud et de froid, de sec et d'humide, de féminin et de masculin. Ces antagonismes se retrouvent dans des catégories de la chimie moderne

[4] Le phosphore est bien entendu lié à la lumière (donc, associé au feu), alors que le soufre est considéré par les alchimistes comme un agent particulièrement actif. Sa couleur jaune renvoie à celle du feu et du soleil.

comme acide/base, oxydant/réducteur, électrophile/nucléophile, métaux/non-métaux, etc.

Troisièmement, les alchimistes ont une inclination pour la représentation en triangle (et les combinaisons de celui-ci). En effet, les symboles des quatre éléments[5] sont constitués de triangles ou de leurs combinaisons (figure 5).

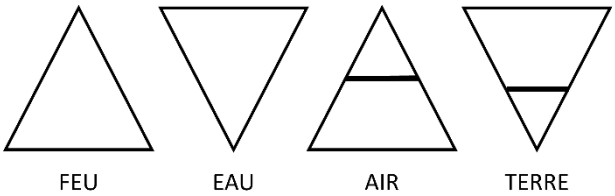


Figure 5. Représentations symboliques des quatre éléments.

Le triangle est également utilisé pour représenter la triade des principes : mercure, soufre et sel[6]. Il traduit la présence d'un médiateur entre deux forces ou objets antagonistes : le sel est ainsi médiateur entre le soufre et le mercure. De la même manière, la chimie moderne tend à reproduire des triades présentant un médiateur (par exemple, le triangle du feu). Il en est de même dans d'autres sciences comme la linguistique (triangle de Peirce) ou la didactique de la chimie (chemistry triplet).

Quatrièmement, la réaction chimique entre deux substances ne peut être représentée valablement, chez les alchimistes, que par des figures permettant une inclusion, une superposition ou encore une liaison entre les deux symboles des substances de départ : il s'agit des premières représentations imagées des réactions chimiques (figure 6).

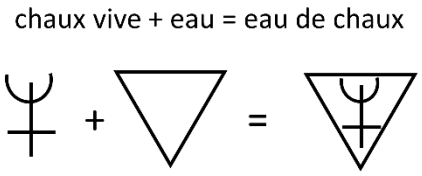


Figure 6. Représentation symbolique de la formation de l'eau de chaux avec les symboles alchimiques (d'après Edeline, 2009).

Ce symbole de l'eau de chaux véhicule à la fois l'idée de la conservation (des éléments) et celle de la transformation (des substances). Il n'a pas pour vocation d'expliquer le processus réactionnel ; il permet simplement de connaître les substances de départ nécessaires à l'obtention du produit.

[5] Les quatre éléments sont liés aux états de la matière. Ainsi, la terre est associée à l'état solide, l'eau à l'état liquide et l'air à l'état gazeux. Le feu rend compte de la chaleur et de la lumière.

[6] En alchimie, le mercure est un des vecteurs de la caractéristique métallique des corps, le soufre est à l'origine de l'inflammabilité des corps, alors que la présence de sel génère le caractère acide des substances.

Nous ne pouvons terminer ce panorama des apports de l'alchimie dans la symbolique chimique actuel sans citer Jean Béguin*, considéré comme l'inventeur de la première « équation » chimique jamais écrite (figure 7).

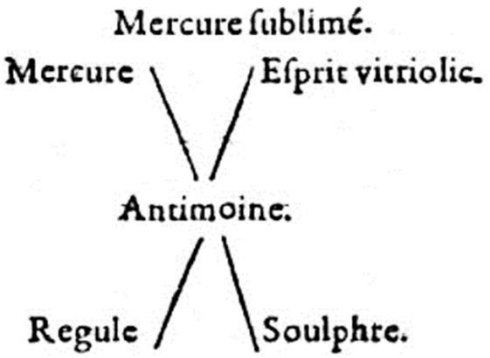


Figure 7. Diagramme de la réaction du sulfure d'antimoine avec le chlorure mercureux (Béguin, 1615, p. 245).

Dans son *Tyrocinium Chymicum* paru en 1610 (édité en français en 1615 sous le titre de « *Les Elemens de chymie* »), Béguin relate le résultat de la calcination et de la distillation d'antimoine[7] en présence de mercure sublimé[8]. Il écrit (Béguin, 1615, p. 167-168) :

> C'est pourquoi retournant à mon propos, je dis que l'esprit vitriolique[9] a une extrême sympathie avec les métaux, et d'autant plus ou moins avec les autres minéraux, qu'ils approchent ou qu'ils sont éloignés de la nature métallique. Et parce que le régule d'antimoine approche plus de la nature métallique que le mercure, voilà pourquoi distillant le mercure sublimé avec l'antimoine, l'esprit vitriolique du sublimé quitte le mercure et se joint et s'attache à l'antimoine. Et se faisant, pressé et chassé par la chaleur […], l'esprit de vitriol se dissout dans l'eau et le régule tombe en poudre blanche au fond du récipient. […] ne reste plus dans la cornue que le mercure du sublimé et le soufre de l'antimoine. […] J'en conclus donc par ces expériences infaillibles que la poudre émétique n'est autre chose que le régule d'antimoine calciné, par l'esprit vitriolique qui est dans le sublimé.

Pourtant, le schéma de Béguin relève davantage d'un diagramme de réaction que d'une équation chimique, en ce qu'il ne rend pas compte de la conservation de la masse. Il s'agit plutôt d'un ingénieux prélude à l'équation chimique moderne, relevant notamment des « affinités » entre certaines substances (ici, entre l'esprit vitriolique et les métaux). Le schéma montre également la composition des réactifs de départ grâce aux produits d'arrivée : le mercure sublimé est composé de mercure et d'esprit

[7] L'antimoine (ou antimoine crud) est l'appellation du sulfure d'antimoine Sb_2S_3 (ou stibnite). L'antimoine « métallique » est nommé « régule d'antimoine ».
[8] Le mercure sublimé (ou mercure doux) est le chlorure mercureux Hg_2Cl_2 (aussi appelé calomel). Le mercure sublimé corrosif est le chlorure de mercure (II), $HgCl_2$.
[9] L'esprit vitriolique est probablement dans ce cas l'acide chlorhydrique, dissous dans l'eau.

vitriolique, alors que l'antimoine se constitue de régule d'antimoine et de soufre. Par ses apports oscillant entre une démarche scientifique méthodique et un vocable alchimique parfois opaque, Béguin se situe au croisement entre l'alchimie et la chimie du XVIIIème siècle.

Bref, l'héritage alchimique est lourd de significations et de symboles en tous genres, basés sur l'observation d'une part, et une libre interprétation d'autre part. La représentation des réactions chimiques (et donc des substances) va considérablement changer au début du XVIIIème siècle avec l'apport de la théorisation de l'affinité chimique.

5.2.2. L'affinité chimique

Boerhaave* a énoncé en 1733 le concept d'affinité comme « la force en vertu de laquelle les particules des corps se recherchent, s'unissent et se retiennent » (Brunold, 1930). En 1718 déjà, Geoffroy* publia la *Table des différents rapports*, qui représente un ordre de réaction entre substances, sur base d'un rapport d'affinité (figure 8).

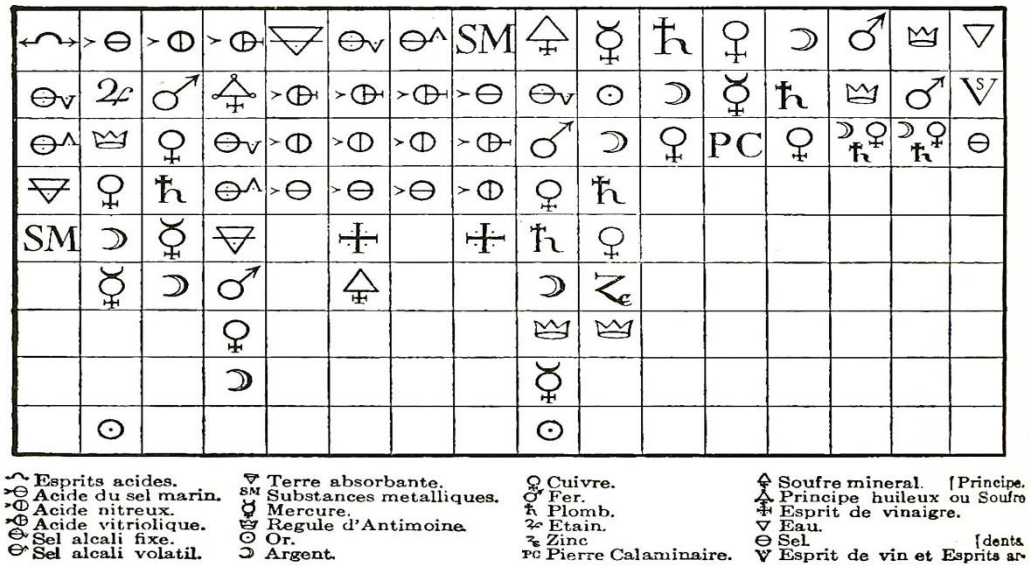


Figure 8. Table des différents rapports entre substances (Geoffroy, 1718).

En plus de son remarquable caractère synthétique, la *Table* de Geoffroy a été conçue dans le but de faciliter son interprétation. Prenons la première colonne qui indique les rapports d'affinité entre les « esprits acides » (en tête de colonne) et d'autres substances (reste de la colonne). On voit que le « sel alcali fixe » (par exemple, NaOH en chimie moderne) a plus d'affinité avec l'acide que le sel alcali volatil (par exemple, NH_3 en chimie moderne). En effet, si un sel alcali fixe est ajouté à un corps résultant de l'union d'un acide avec un sel alcali volatil, une réaction de déplacement se produit et aboutit à la reformation du sel alcali volatil de départ. La capacité d'une substance Z à « chasser » une substance Y d'un corps composé XY rend compte d'une affinité plus forte entre la

substance Z et la substance X que celle qui existe entre la substance Y et la substance X. Cette idée a donné lieu à de nombreux développements au cours du XVIIIème siècle, les chimistes essayant de construire des tables hiérarchisant les degrés d'affinité des substances[10].

En 1756, William Cullen* utilise des accolades et introduit une première flèche de réaction dans un schéma rendant compte d'une réaction de déplacement (figure 9). Il faut comprendre par cette figure que la substance B, initialement liée à A (par l'accolade, qui serait une des premières représentations d'une liaison chimique), se voit déplacée vers C, de par un rapport d'affinité plus important pour la substance C que pour la substance A (Crosland, 1959).

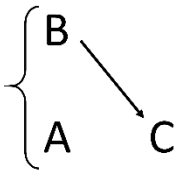


Figure 9. Représentation générale d'une réaction de déplacement selon Cullen.

La figure 10 présente trois exemples d'écriture de Cullen avec les équations de réaction modernes placées en regard. L'ordre d'affinité avec le nitrate apparaît clairement : le zinc déplace le fer, le fer déplace le cuivre, le cuivre déplace l'argent.

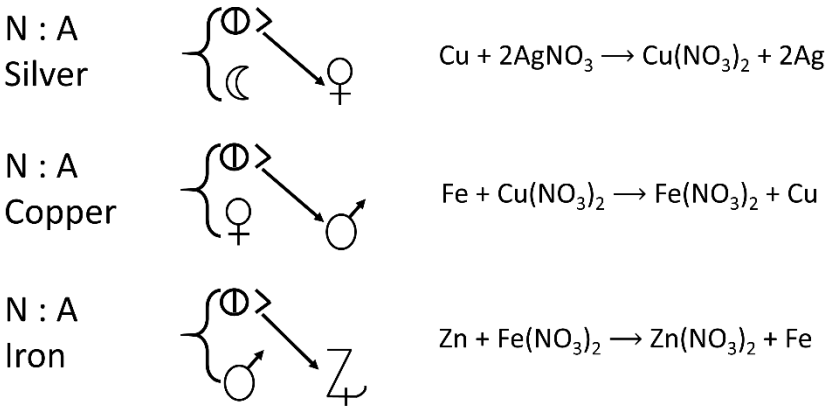


Figure 10. Schémas réactionnels de Cullen et équations chimiques modernes associées (Thims, 2007).

Entre 1775 et 1785, Bergman* publia ses célèbres tables d'attractions électives, en ordonnant plusieurs milliers de réactions chimiques et en utilisant les symboles alchimiques. L'affinité entre substances est alors considérée comme constante, même si de nombreuses anomalies viennent infirmer le classement idéal de Bergman (Bensaude-Vincent et Stengers, 1995). Ainsi, celui-ci constate que certaines réactions

[10] D'où le nom péjoratif de « fabricants de tables » donné aux chimistes travaillant sur l'affinité chimique (Brunold, 1930).

vont parfois dans un sens, parfois dans l'autre, en fonction de la quantité de réactifs de départ. Ce constat jette une ombre sur sa tentative de mise en ordre des réactions chimiques. Pour symboliser celles-ci, Bergman reprend des symboles inspirés de l'alchimie, et empruntés avant lui par Geoffroy. L'utilisation d'accolades multiples, semblables à celles de Cullen, permet une représentation de la réaction chimique sous la forme d'un plan (figure 11).

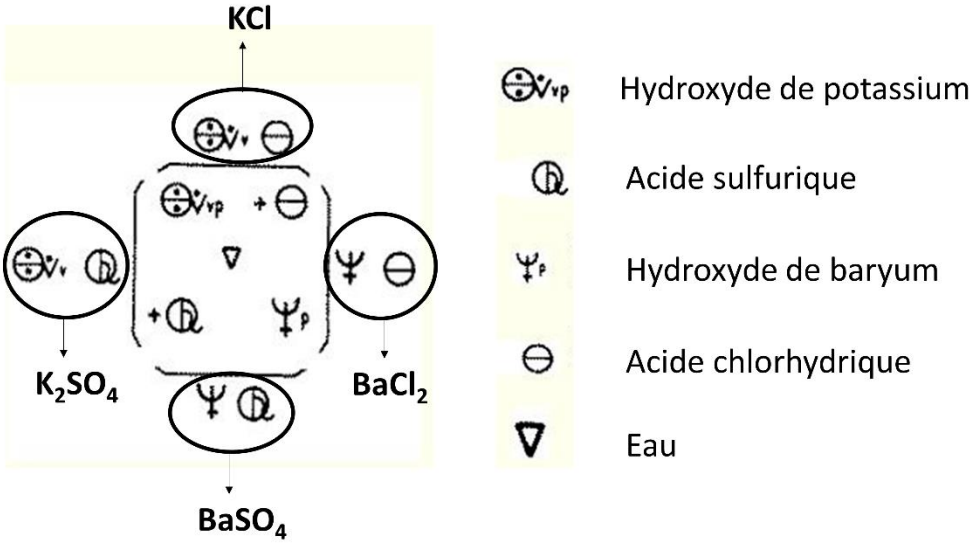


Figure 11. Exemple de schéma réactionnel de Bergman (1785). Nous avons ajouté la légende jouxtant le schéma et les formules moléculaires pour une meilleure compréhension de la figure.

Cette figure représente la réaction entre le sulfate de potassium (indiqué par les symboles jouxtant l'accolade de gauche) et le chlorure de baryum (indiqué le long de l'accolade de droite). Les produits de réaction sont le sulfate de baryum (indiqué le long de l'accolade du bas) et le chlorure de potassium (indiqué le long de l'accolade du haut). Les signes « + » au centre du schéma réactionnel soulignent l'affinité supérieure d'une substance pour une autre (par exemple, l'acide sulfurique pour le baryum). L'eau, symbolisée par un triangle, constitue le milieu de réaction. La symbolique de Bergman a ceci de particulier qu'elle se base sur la représentation d'un composé via deux réactifs qui permettent sa formation. Ainsi, le sulfate de potassium est représenté par la juxtaposition des symboles de l'hydroxyde de potassium et ceux de l'acide sulfurique. Ce type de schéma réactionnel a rencontré un grand succès, puisque l'on en trouve des exemples dans des articles scientifiques jusqu'avant 1900.

La fin du XVIIIème siècle voit la remise en question de la théorie de l'affinité chimique, ainsi que la naissance des premiers systèmes symboliques ordonnés. Cependant, on trouve encore des diagrammes représentant des réactions chimiques jusqu'à la fin du XIXème siècle, avec le remplacement graduel des symboles alchimiques par des noms (figure 12), et enfin le remplacement des noms par les symboles chimiques modernes (Jensen, 2005).

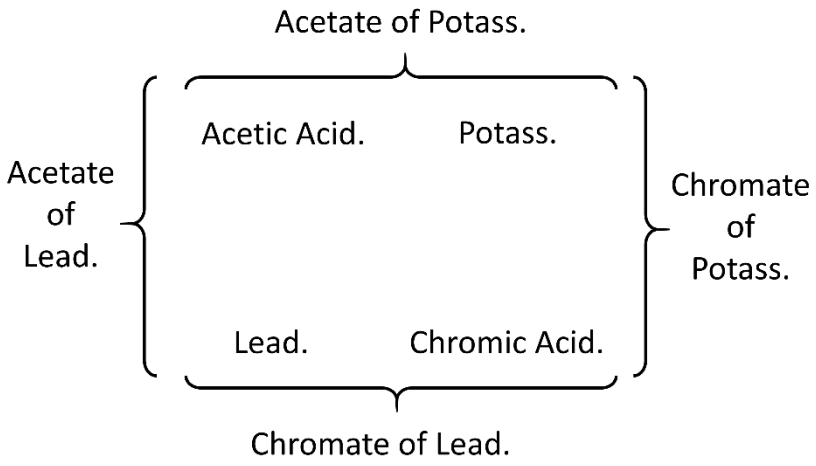


Figure 12. Diagramme représentant la réaction chimique entre l'acétate de plomb et le chromate de potassium (d'après Bidlake, 1858). Les symboles alchimiques sont ici remplacés par des noms issus de la nouvelle nomenclature de Lavoisier.

5.2.3. Lavoisier et la révolution langagière

5.2.3.1. Nécessité et limites de la nouvelle nomenclature

Le langage alchimique ne permet pas une communication efficiente entre savants. Selon Liu et Taber (2016), le manque de nomenclature rationnelle constitue, au XVIIIème siècle, un frein dans l'avancement de la chimie naissante. Les noms des substances sont peu informatifs, s'inspirant d'un lieu (« spanish green » pour l'acétate de cuivre), du processus d'obtention (« esprit de sel » pour l'acide chlorhydrique) ou encore de l'une ou l'autre propriété caractéristique (« aqua fortis » pour l'acide nitrique concentré) (Fabbrizzi, 2008). En France, Lavoisier* voit dans ce langage opaque un obstacle majeur à l'enseignement raisonné des sciences, nécessaire pour résorber le retard industriel français au crépuscule du XVIIIème siècle. Il faut donc rompre avec les pratiques du passé, tout en fédérant un maximum de scientifiques autour du projet[11]. L'explosion du nombre de substances isolées et des méthodes d'analyse allait fournir la clé d'une refondation de la langue des chimistes : la matière semble être constituée de combinaisons d'unités simples formant des parties plus complexes. L'existence de ces « éléments » ou « principes » indécomposables fonde la nouvelle nomenclature de

[11] Lavoisier précise à la fin de la préface de la *Méthode de nomenclature chimique* (1787) que ce travail de refondation doit être considéré comme la mise en œuvre d'un souhait des anciens chimistes illustres, et non comme une remise en question brutale des pratiques de ses prédécesseurs : « Nous pardonnera-t-on d'avoir changé la langue que nos maîtres ont parlée, qu'ils ont illustrée, et qu'ils nous ont transmise ? Nous l'espérons d'autant plus que c'est Bergman et Macquer qui ont sollicité cette réforme. Le savant professeur d'Upsal, M. Bergman, écrivait à M. de Morveau, dans les derniers temps de sa vie : *Ne faites grâce à aucune dénomination impropre. Ceux qui savent déjà entendront toujours, ceux qui ne savent encore pas entendront plus tôt*. Appelés à cultiver le champ qui a produit pour ces chimistes de si abondantes récoltes, nous avons regardé comme un devoir de remplir le dernier vœu qu'ils ont formé » (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 16).

Lavoisier, basée sur le parallélisme physico-grammatical : les préfixes, radicaux et désinences rendent compte de la composition élémentaire des substances. Pour construire ce code original, Lavoisier va emprunter aux racines grecques[12] afin d'éviter toute confusion avec la langue ordinaire, tout en conservant une consonance française.

Cependant, le nouveau langage se verra très vite dépassé par la nécessité d'une écriture symbolique. En effet, la langue ordinaire modifiée forgée par Lavoisier rencontre trois problèmes majeurs (Dagognet, 1969 ; Liu et Taber, 2016).

- Les nouveaux noms n'ont pas entièrement balayé les anciens noms, qui subsistent dans le langage courant des chimistes du XVIIIème siècle, entraînant multidésignations et confusions telles qu'en connaissaient les alchimistes avant Lavoisier. La révolution langagière de Lavoisier n'a donc pas éradiqué les obstacles de communication hérités des alchimistes. Une notation réellement universelle doit alors s'imposer pour clarifier la communication.
- Corollaire du problème précédent, certains termes continuent de véhiculer des significations parasites dans la vie courante, comme par exemple les termes qui n'ont pas été adaptés par Lavoisier (« fer », « or », « mercure », etc.). Par ailleurs, certains termes de l'ancienne et de la nouvelle nomenclature ne fournissent pas les informations de composition souhaitées par Lavoisier (« eau », « ammoniac », « acide muriatique », « acide oxalique », etc.).
- Enfin, la langue ordinaire modifiée de Lavoisier est incapable de rendre des informations quantitatives complexes, comme un rapport volumique des substances formant un corps composé. En effet, le terme « acide sulfurique » n'intègre pas le ratio entre volumes de soufre, d'hydrogène et d'oxygène dans la substance « acide sulfurique ». La découverte de la stœchiométrie par Richter en 1792, et donc de rapports constants entre substances entrant en réaction, offrira une nouvelle opportunité d'identifier les substances non pas par le nom des éléments qui la composent, mais bien par le ratio de ces éléments dans la particule élémentaire.

5.2.3.2. Premier système symbolique, première équation chimique

La première contribution à une écriture symbolique chimique est d'ailleurs associée à la fameuse *Méthode de nomenclature chimique* de Guyton de Morveau*, Lavoisier, Berthollet* et de Fourcroy* (1787). Hassenfratz* et Adet* y proposent un « nouveau système de caractères chimiques » joint à la fin de la *Méthode*. Ce système est dépeint comme « des nouveaux signes adaptés à la nouvelle nomenclature […], de beaucoup préférables aux anciens, et qui ont le grand mérite de peindre aux yeux, non des mots, mais des faits. » (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 311-312). Pourtant, le système de

[12] Qui donneront par exemple « oxygène », « azote », « hydrogène ».

Hassenfratz et Adet emprunte abondamment au symbolisme alchimique, en présentant un grand nombre de figures géométriques classiques (triangles, cercles, droites)[13]. L'apport principal réside dans l'ajout de lettres inscrites dans les figures et permettant d'associer le symbole au nom de la nouvelle nomenclature (figure 13).

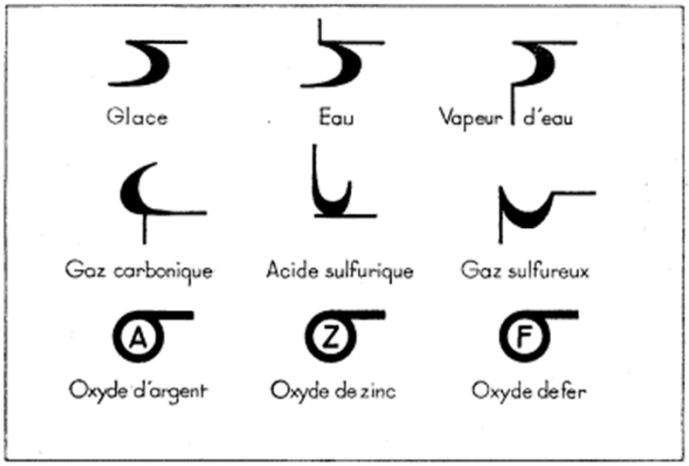


Figure 13. Exemples de symboles du système de Hassenfratz et Adet (Guyton de Morveau *et al.*, 1787).

Cette tentative de formulation ne rencontrera pas le succès escompté, et ne sera d'ailleurs que très peu utilisée par les auteurs de la *Méthode* eux-mêmes. Cet échec s'explique par l'incapacité de ce système à rendre aisément les rapports quantitatifs de combinaison entre éléments, et par l'aversion de Lavoisier pour les systèmes symboliques : c'est bien par le langage oral que celui-ci mène sa révolution, et non par l'usage de caractères hiéroglyphiques pour initiés (Dagognet, 1969). Lavoisier n'utilisera en tout et pour tout qu'une seule fois cette « notation cabalistique » dans son œuvre (Lavoisier, 1782). Cette critique de l'écriture symbolique est pourtant paradoxale au vu de sa volonté de ramener la chimie à une algèbre dans son *Traité Elémentaire de chimie* (1789). Il y écrit en effet la première équation chimique nominative, rendant compte de la conservation de la masse au cours d'une réaction chimique :

« moût de raisin = acide carbonique + alkool »

Cette équation est précédée du très célèbre texte exposant la loi de la conservation de la matière (Lavoisier, 1789, p. 141) :

> Rien ne se crée, ni dans les opérations de l'art, ni dans celles de la nature, et l'on peut poser en principe que dans toute opération, il y a une égale quantité de

[13] Il est à noter que le système de Hassenfratz et Adet implique le recours à des symboles graphiques spécifiques pour des éléments fréquents ou des familles : un trait horizontal pour l'oxygène, un cercle pour un métal, etc. La longueur de la barre verticale indiquait la quantité de calorique contenu dans la substance, ce qui explique les symboles respectifs de la glace, de l'eau et de la vapeur d'eau (figure 13). Les états de la matière étaient donc en partie représentés dans ce système.

> matière avant et après l'opération, que la qualité et la quantité des principes est la même, et qu'il n'y a que des changements, des modifications. C'est sur ce principe qu'est fondé tout l'art de faire des expériences en chimie. On est obligé de supposer dans toutes une véritable égalité ou équation entre les principes du corps qu'on examine et ceux qu'on en retire par l'analyse.

L'utilisation conjointe du signe « + », du signe « = » et la linéarisation de l'énoncé constituent une première, et installent une relation nouvelle entre mathématiques et chimie, qui sera promise à un grand avenir[14]. On retiendra malgré tout que Lavoisier nuance cet usage des mathématiques en chimie en déclarant que « nous sommes encore bien loin de pouvoir porter dans la chimie la précision mathématique » (Lavoisier, 1782, p. 515) et, par conséquent, le lecteur doit considérer les propositions de Lavoisier « comme de simples annotations, dont l'objet est de soulager les opérations de l'esprit » (Lavoisier, 1782, p. 515). Le recours au symbolique, pour Lavoisier, est donc avant tout un outil pratique, mais en aucun cas une alternative à la nomenclature nouvelle.

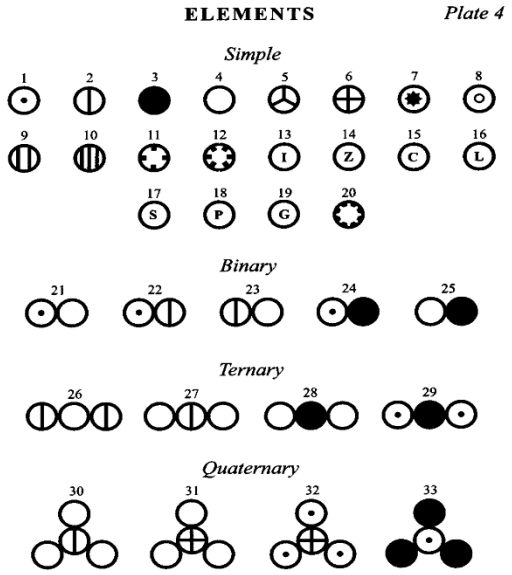
5.2.4. De Dalton à Berzelius

5.2.4.1. Système symbolique de Dalton

Dalton* propose son propre système de notation symbolique dans son *New System of Chemical Philosophy* (1808). Les atomes y sont identifiés par des cercles dans lesquels sont incrustées des formes diverses (barres, étoiles, croix) et des lettres représentant l'initiale du terme associé à la substance en langue anglaise. Par exemple, l'atome de carbone est représenté par la lettre « C » à l'intérieur d'un cercle (figure 14).

Ce système ingénieux ne fut pourtant pas popularisé. En effet, les présupposés théoriques à la base des représentations de Dalton (en particulier l'hypothèse atomiste) n'étaient pas partagés par l'ensemble de la communauté scientifique de l'époque. De plus, les règles d'affinité chimique, qui stipulent que deux particules identiques doivent se repousser, rendaient complexes, voire impossibles, certaines représentations de substances telles que proposées par Dalton (Klein, 2001). Par exemple, deux atomes ne peuvent être liés directement l'un à l'autre pour des raisons d'affinité chimique de même signe. Enfin, le système engendrait des problèmes de communication dus à l'usage d'initiales de termes en anglais, susceptibles de jeter une certaine confusion sur la substance considérée pour les locuteurs non-anglophones. Ainsi, le symbole de Dalton pour l'argent est un « S » (pour « silver ») incrusté dans un cercle, ce qui pouvait être interprété comme un symbole du soufre pour un chimiste de langue française.

[14] Cette intention est précisée dans la *Méthode* (Guyton de Morveau *et al.*, 1787, p. 6) : « Les langues n'ont pas seulement pour objet, comme on le croit communément, d'exprimer par des signes des idées et des images, ce sont, de plus, de véritables méthodes analytiques, à l'aide desquelles nous procédons du connu à l'inconnu, et jusqu'à un certain point à la manière des mathématiciens : essayons de développer cette idée. »



1. Hydrogène
2. Azote
3. Carbone
4. Oxygène
5. Phosphore
6. Soufre
7. Magnésium
8. Calcium
9. Sodium
10. Potassium
11. Strontium
12. Baryum
13. Fer
14. Zinc
15. Cuivre
16. Plomb
17. Argent
18. Platine
19. Or
20. Mercure
21. Eau
22. Ammoniac
23. Monoxyde d'azote
24. Ethylène
25. Monoxyde de carbone
26. Protoxyde d'azote
27. Dioxyde d'azote
28. Dioxyde de carbone
29. Méthane
30. Trioxyde d'azote
31. Trioxyde de soufre
32. Sulfure d'hydrogène
33. Alcool

Figure 14. Exemples de représentations symboliques de Dalton (1808-1827). Nous avons ajouté la légende jouxtant les symboles de Dalton.

5.2.4.2. Système symbolique de Berzelius

La plupart des symboles chimiques actuels sont introduits en 1813 par Berzelius*. Le système rencontre un succès quasi immédiat pour diverses raisons que nous allons développer. Ces raisons sont directement liées aux grandes caractéristiques de la notation symbolique de Berzelius.

1) Une restriction importante dans le choix des symboles

Berzelius choisit non seulement d'utiliser des lettres de l'alphabet latin, mais également d'abandonner toutes formes géométriques, pourtant omniprésentes dans les précédentes contributions. Il justifie ce choix en écrivant (Berzelius, 1813-1814) :

> The chemical signs[15] ought to be letters, for the greater facility of writing, and not to disfigure a printed book. Though this last circumstance may not appear of any great importance, it ought to be avoided whenever it can be done[16].

La raison qu'invoque Berzelius peut paraître prosaïque, mais elle s'inscrit dans les enjeux importants de son siècle : il s'agit de permettre une diffusion facilitée des œuvres scientifiques par impression massive des ouvrages ; les caractères empruntés à l'alphabet latin intégreront plus aisément un texte en langue ordinaire. Par la suite,

[15] Notons que Berzelius parle de « signes chimiques » et non de « symboles chimiques ». Le terme « symbole chimique » sera progressivement introduit dans les années 1830 (de Merten, 2013).
[16] « Les symboles chimiques doivent être des lettres pour une plus grande facilité d'écriture et pour ne pas défigurer un livre imprimé. Bien que cette circonstance puisse apparaître peu importante, il est préférable qu'elle soit évitée autant de fois qu'on le peut » (traduction libre).

Berzelius ajoute à son système des notations qui s'éloignent de la langue ordinaire, mais qui permettent de gagner de la place : le point placé au-dessus du symbole chimique désigne l'atome d'oxygène ; un trait barrant la lettre signifie un dédoublement de la particule (figure 15).

Noms des substances	Formules	« Poids de l'atome » (23)	
		O = 100	H = 1
Hydrogène	H	6,2398	0,50
	~~H~~	12,4795	1,00
Carbone	C	76,44	6,13
Eau	$\dot{\cancel{H}}$	112,48	9,01
Ac. sulfurique (24).	$\dddot{S}$	501,16	40,16
Soude (25)	$\dot{Na}$	390,90	31,32
Chlor. sodique (26).	Na~~Cl~~	733,55	58,78
Alcool	~~CH~~^{3}O	290,31	23,26

Figure 15. Exemples de représentations symboliques de Berzelius (1828).

Ces notations particulières, abandonnées par Berzelius lui-même pour des substances plus complexes, ne seront pas non plus conservées par la postérité, en vertu sans doute de l'argument de leur auteur : tout symbole étranger aux signes de la langue ordinaire rend plus complexe la diffusion des connaissances exprimées dans cette langue. D'ailleurs, pour réaliser son système, Berzelius n'invente stricto sensu aucun symbole (contrairement à ses prédécesseurs) : il emprunte uniquement des symboles existant dans d'autres systèmes sémiotiques.

2) Une référence systématique au nom latin

Berzelius construit ses symboles selon des règles simples basées sur deux grands principes : la primauté du terme latin et la distinction entre métaux et métalloïdes. Il note (Berzelius, 1813-1814) :

> I shall take, therefore, for the chemical sign, the initial letter of the Latin name of each elementary substance: but as several have the same initial letter, I shall distinguish them in the following manner: 1. In the class which I call metalloids, I shall employ the initial letter only, even when this letter is common to the metalloid and to some metal. 2. In the class of metals, I shall distinguish those that have the same initials with another metal, or a metalloid, by writing the first two letters of the word. 3. If the first two letters be common to two metals, I shall, in that case, add to the initial letter the first consonant which they have

> not in common: for example, S = sulphur, Si = silicium, St = stibium (antimony), Sn = stannum (tin), O = oxygen, Os = osmium, &c.[17].

La nomenclature latine est retenue car elle est « commune aux naturalistes de tous les pays, et peut servir à tous, sans qu'il soit nécessaire de la changer suivant la langue » (Berzelius, 1838, p. 266). Le choix du nom latin ne rencontre cependant pas un accord unanime, ce qui engendre de multiples modifications par rapport à la première version de Berzelius. Des symboles associés à des noms latinisés à consonances germaniques ou anglaises[18] sont ajoutés pour équilibrer quelque peu le système. Cependant, la majeure partie des symboles chimiques reste issue de l'abréviation de termes en langue latine[19]. La distinction entre métaux et métalloïdes est liée à la théorie dualistique de Berzelius abordée ci-après.

3) Une mathématisation accrue de la symbolique chimique

Berzelius a l'originalité de développer la notation mathématique déjà embryonnaire chez Lavoisier. Il ajoute des chiffres aux signes « + » et « = », introduits par ce dernier, en leur donnant un sens chimique. On peut lire (Berzelius, 1813-1814) :

> The chemical sign expresses always one volume of the substance. When it is necessary to indicate several volumes, it is done by adding the number of volumes : for example, the oxidum cuprosum (protoxide of copper) is composed of a volume of oxygen and a volume of metal ; therefore its sign is Cu + O. The oxidum cupricum (peroxide of copper) is composed of 1 volume of metal

[17] « Je prendrai donc, pour le symbole chimique, la lettre initiale du nom latin de chaque substance élémentaire. Mais comme quelques symboles présentent la même lettre initiale, je les distinguerai de la façon suivante : 1. Dans la classe que j'appelle métalloïdes, j'emploierai uniquement la lettre initiale, même si cette lettre est commune à d'autres métaux ou métalloïdes. 2. Dans la classe des métaux, je distinguerai ceux qui ont les mêmes lettres initiales en écrivant les deux premières lettres du mot. 3. Si les deux premières lettres sont communes à deux métaux, j'ajouterai à la lettre initiale la première consonne qu'ils n'ont pas en commun. Par exemple, S pour sulphur, Si pour silicium, St pour stibium, Sn pour stannum, C pour carbonicum, Cu pour cuprum, Co pour cobaltum, O pour oxygen, Os pour osmium » (traduction libre).

[18] Par exemple, citons « Na » pour le sodium, en référence au terme germanique latinisé « natrium ». La première version de Berzelius indiquait le symbole « So » pour le sodium.

[19] Notons que Berzelius fait évoluer les règles d'écriture dans son *Traité de chimie* (1838). D'une part, la lettre minuscule ajoutée aux symboles chimiques des métaux n'est plus la première consonne qui n'est pas non-commune, mais bien la première lettre non-commune. D'autre part, il admet quelques exceptions pour les métalloïdes : le chlore, le silicium et le brome présentent des symboles chimiques à deux lettres (Cl, Si, Br) afin de ne pas concurrencer les symboles chimiques du carbone, du soufre et du bore (C, S, B).

> and 2 volumes of oxygen ; therefore its sign is Cu + 2O. In like manner, the sign for sulphuric acid is S + 3O ; for carbonic acid, C + 2O ; for water, 2H + O, &c[20].

Le système de Berzelius répond à la demande pressante de pouvoir représenter les rapports quantitatifs entre éléments formant un corps composé. Le symbole chimique est avant tout la représentation d'un volume de la substance. Il n'est donc absolument pas question, dans cette première version, de représenter la substance d'un point de vue microscopique (atomes, molécules) mais de fournir un symbole pratique rendant compte d'une propriété macroscopique : ici, le nombre de volumes d'une substance entrant en jeu dans la formation d'un composé. L'extension du coefficient stœchiométrique à un nombre d'atomes d'un certain type dans un composé apparaîtra dans les articles ultérieurs de Berzelius, à partir de la fin des années 1820[21]. Il est à noter que le chiffre « 1 » n'est jamais indiqué, à la fois pour simplifier l'écriture et parce qu'il est tacitement véhiculé par le symbole chimique lui-même. Le chiffre « 2 » présent dans l'expression « C + 2O » peut surprendre les chimistes d'aujourd'hui. En effet, il semble relever à la fois de l'indice (car il indique un ratio à l'intérieur d'un composé) et du coefficient (car le chiffre est placé devant le symbole chimique). La confusion a d'ailleurs subsisté jusqu'à la moitié du XIXème siècle.

Le signe « + », en outre, prend une signification spéciale dans l'écriture symbolique de Berzelius. Il sépare les éléments formant le corps composé, tout en soulignant que ces éléments s'« additionnent » pour former la substance. Dans ce système, le signe « + » est également un produit de la théorie qui sous-tend le travail de Berzelius.

4) La conception dualistique de la matière

Dans sa théorie, Berzelius distingue les électropositifs (métaux) et les électronégatifs (métalloïdes), qui s'agglomèrent selon des règles d'« électroaffinité ». Dans l'exemple cité plus haut, le cuivre (électropositif) est attiré par l'oxygène (électronégatif), formant ainsi l'oxyde de cuivre (I ou II). Berzelius reconnaît d'ailleurs une négativité absolue à l'oxygène, « comme il n'est jamais positif relativement à aucun autre » (Berzelius, 1818-1819). Berzelius va plus loin en affirmant que tout corps composé est lui-même issu de l'association de deux constituants, l'un électropositif et l'autre électronégatif.

[20] « Le symbole chimique exprime toujours un volume de substance. Quand il est nécessaire d'indiquer plusieurs volumes, on le fait en ajoutant le nombre de volumes : par exemple, l'"oxidum coprosum" (protoxyde de cuivre) est composé d'un volume d'oxygène et d'un volume de métal ; donc, son signe est Cu + O. L'"oxidum cupricum" (peroxyde de cuivre) est composé d'un volume de métal et de deux volumes d'oxygène ; donc, son signe est Cu + 2O. De la même manière, le signe pour l'acide sulfurique est S + 3O ; pour l'acide carbonique, C + 2O ; pour l'eau, 2H + O, etc. » (traduction libre).

[21] Par exemple, dans son *Traité de chimie* (1838), Berzelius écrit : « Le nombre des atomes est désigné par des chiffres. Un chiffre à gauche multiplie tous les atomes placés à sa droite, jusqu'au premier + ou jusqu'à la fin de la formule » (Berzelius, 1838, p. 265).

C'est la conception dualistique binaire de la matière (Dagognet, 1969). À ce sujet, Berzelius écrit (Berzelius, 1813-1814) :

> When we express a compound volume of the first order, we throw away the « + », and place the number of volumes above the letter : for example, CuO + SO^3 = sulphate of copper, CuO^2 + $2SO^3$ = persulphate of copper[22].

Par cet exemple, Berzelius applique sa théorie dualistique : l'oxyde basique (composé d'un métal et d'oxygène) est électropositif, tandis que l'oxyde acide (formé d'un métalloïde et d'oxygène) est électronégatif. L'abandon du signe « + » initial entre les symboles Cu et O sera très vite généralisé dans le courant des années 1820, mais la présence du signe « + » dans les composés plus complexes perdurera jusqu'au début du XXème siècle. Il est intéressant de noter, dans la version compactée de la formule chimique, le déplacement du chiffre indiquant le nombre de volumes de substance en exposant du symbole chimique : l'oxyde acide « S + 3O » devient « SO^3 ». De nouveau, le chimiste d'aujourd'hui s'étonnera que notre indice actuel soit placé en exposant du symbole chimique, après avoir été placé devant ce même symbole dans les premières propositions de Berzelius. Notons enfin que la théorie de l'électroaffinité impose également une règle de conversion de la formule chimique dans la langue ordinaire modifiée : on commence par citer la partie électronégative pour terminer par la partie électropositive. On dira donc « sulfure de carbone » et non « carbure de soufre », alors que l'on écrira « CS_2 » et non « S_2C ».

5) Des parenthèses qui facilitent l'interprétation

Berzelius inaugure aussi l'usage systématique de parenthèses pour séparer ce qu'il appelle « des volumes de deuxième ordre » : « for example, alum is composed of 3 volumes of sulphate of alumina and 1 volume of sulphate of potash. Its symbol is $3(AlO^2 + 2SO^3) + (Po^2 + 2SO^3)$[23,24] » (Berzelius, 1813-1814).

Ces parenthèses sont un emprunt de plus au système symbolique mathématique, renforçant ainsi l'aspect algébrique de la formule chimique.

---

[22] « Quand nous exprimons le volume d'un composé de premier ordre, on enlève le "+", et on place le nombre de volumes au-dessus de la lettre : par exemple, CuO + SO^3 = sulfate de cuivre, CuO^2 + $2SO^3$ = persulfate de cuivre » (traduction libre).

[23] « Par exemple, l'alun est composé de trois volumes de sulfate d'aluminium et d'un volume de sulfate de potassium. Son symbole est $3(AlO^2 + 2SO^3) + (Po^2 + 2SO^3)$ » (traduction libre).

[24] Le symbole « Po », présent dans la formule chimique donnée par Berzelius, est le symbole précurseur du potassium. Le symbole du potassium devient « K » dans les articles ultérieurs de Berzelius. La formule chimique moderne de l'alun est $KAl(SO_4)_2.12\ H_2O$.

6) Réception et limites

Bien que populaires et rapidement utilisés dans la communauté scientifique, les symboles de Berzelius furent sévèrement critiqués par certains de ses pairs. Langage construit pour être univoque, sans redondance, la symbolique de Berzelius fut jugée plus proche d'un code, d'une sténographie qui a certes « exalté la compréhension » mais aussi « déprim[é] l'imagination » (Knight, 2003). Ce côté clinique du système, sans doute dû aux nombreux emprunts à la symbolique mathématique, ne suggère en effet aucune hypothèse sur la nature même de la matière. L'autre critique majeure concerne les processus en jeu : en plus de ne pas décrire l'intimité de la matière, le système de Berzelius ne tente même pas de décrire les mécanismes de transformation de celle-ci. Bref, pour une partie non négligeable des chimistes de l'époque, la symbolique de Berzelius n'apporte rien de neuf à la discipline, tout au plus des abréviations d'un langage déjà suffisamment performant (Klein, 2002).

Dans une publication célèbre, Ursula Klein (2002) rejoue le procès virtuel de Berzelius en prenant fait et cause pour le chimiste suédois. Par un habile changement de perspective, elle retourne les critiques énoncées ci-dessus en faveur de la symbolique de Berzelius. Klein relève que ce serait précisément l'absence de redondances qui garantit l'univocité : chaque formule chimique est censée représenter une seule et unique substance. Ce serait justement l'absence de référence déclarée à la composition intime de la matière qui permet au système d'être performant (voire performatif) : isolé de toute théorie discutable, il peut servir d'outil à tous les chimistes. Ce serait encore le recours aux signes mathématiques qui fait de la symbolique de Berzelius un outil efficace pour expliquer et prévoir des quantités de produits formés. Enfin, au contraire de la « déprimer », le système de Berzelius exalterait plutôt l'imagination des chimistes, jusqu'à permettre l'élaboration de nouvelles théories, dont le concept de substitution proposé par Dumas en 1827 (Dumas et Boullay, 1827).

5.2.5. De 1814 à nos jours

L'importante proposition de Berzelius a connu, jusqu'à aujourd'hui, différentes modifications dues aux progrès continus enregistrés par la chimie moderne.

5.2.5.1. Formules empiriques, rationnelles et générales

Berzelius distingue, en 1833, les formules empiriques[25] et les formules rationnelles. Les premières sont invariables, en tant qu'elles sont le reflet direct des résultats expérimentaux. Les secondes peuvent varier en fonction de l'intention de l'auteur, tant qu'elles rendent compte de l'attraction entre deux parties d'électroaffinité opposée. La

[25] Les « formules empiriques » sont plus souvent appelées « formules brutes » de nos jours. Cette expression est déjà présente chez Dumas en 1834.

formule rationnelle a pour vocation d'exprimer l'idée de la « combinaison intime » (Berzelius, 1833). Par exemple, la formule empirique de l'alcool est « C^2H^6O » ; par contre, les formules rationnelles de l'alcool peuvent prendre différentes formes (« C^2H^4 + ~~H~~ » ; « ~~CH~~^{3} + O » ; etc.) selon les parties considérées. Cette liberté de combinaison est essentielle pour comprendre les avantages de la notation de Berzelius. De fait, selon Klein, la théorie des radicaux en chimie organique sera bâtie en déplaçant « un peu plus à gauche, un peu plus à droite » (Klein, 2001, p. 28) les symboles de Berzelius dans les formules rationnelles. Ce fait historique confirme l'utilisation de la symbolique chimique comme « outil de papier » dans le cadre de l'établissement de formules rationnelles, guidées par la formule empirique déterminée par l'expérience. Les formules générales sont apparues plus tardivement, et leurs symboles furent introduits progressivement : « X » (pour « non-métal ») en 1838, « MO » (pour l'oxyde métallique) en 1844 (de Merten, 2013). Enfin, les formules synoptiques[26] de Laurent (1848) et les formules de Gerhardt (1853), issues de sa théorie des types[27], annoncent les formules de structure et les représentations iconiques.

5.2.5.2. De l'exposant à l'indice

En 1834, Liebig* commence à écrire en indice (plutôt qu'en exposant) les chiffres donnant le nombre de volumes de substance (puis d'atomes) dans un corps composé. Berzelius désapprouve ce changement brutal, bien qu'il propose lui-même d'utiliser l'indice pour représenter un « double atome ». Par exemple, dans le sulfate ferrique, Berzelius pense que le fer existe sous la forme d'un double atome de fer, qu'il écrit « Fe_2 ». Le sulfate ferrique peut s'écrire « $Fe_2O^3 + 3SO^3$ » (Berzelius, 1838). Les indices et exposants coexistent ainsi dans une même notation symbolique. Ce débat entre Berzelius et Liebig aura pour conséquence directe que seuls les chimistes allemands emboiteront le pas à Liebig, au cours du XIXème siècle, les autres restant fidèles aux préceptes de Berzelius. Il faut attendre le début du XXème siècle pour que se généralisent les indices dans les ouvrages en langue française (de Merten, 2013).

5.2.5.3. Linéarisation de l'équation chimique et usage de la virgule

Entre 1820 et 1850, les équations chimiques symboliques linéarisées commencent à apparaître en étant combinées aux diagrammes d'affinité (Jensen, 2005). On trouve un exemple d'équation chimique linéaire chez Thénard en 1827 (figure 16), ou encore chez

[26] Laurent définit les formules synoptiques comme des « formules dont la disposition soulage la mémoire, et qui supposent des arrangements analogues, dans les corps analogues ». Par exemple, « $CH^2 + O^2$ » est la formule synoptique de l'acide formique, et « $C^2H^4 + O^2$ » est la formule synoptique de l'acide acétique.

[27] La théorie des types postule que « dans l'état de la science, les composés organiques peuvent être ramenés à trois ou quatre types […]. Ces types sont l'eau, l'hydrogène, l'acide chlorhydrique et l'ammoniaque. En échangeant leur hydrogène contre certains groupes, ces types donnent naissance aux acides, aux alcools, aux éthers, aux hydrures, aux radicaux, aux chlorures organiques, aux acétones, aux alcali » (Gerhardt, 1853, p. 337). Gerhardt emprunte les accolades de Bergman pour construire les formules rationnelles.

Fownes en 1847. On note la présence de chiffres en exposant dans les formules chimiques (selon les règles d'écriture de Berzelius), ainsi que la présence du signe « = » entre les deux termes de l'équation.

Formule atomique.

$$H^2 O + S O^3 + Zn = H^2 + (Zn O, S O^3)$$

Figure 16. Équation de réaction de l'acide sulfurique avec le zinc d'après Thénard (1827).

Thénard ajoute une virgule entre les composants du sulfate de zinc (« ZnO, SO^3 »), alors que Berzelius préconise l'usage du signe « + » (« $ZnO + SO^3$ »). Les deux pratiques coexisteront, essentiellement pour la notation symbolique des sels, jusqu'à la disparition progressive de l'écriture symbolique basée sur la théorie dualistique. Pour l'anecdote, Berzelius (1838) propose d'utiliser la virgule pour indiquer le nombre d'atomes de soufre dans le composé, à la manière des points symbolisant l'oxygène, ce qui donne des écritures parfois complexes. La figure 17 montre, avec le « sulfomolybdate potassique », un exemple de cette pratique. Berzelius étend même ce choix graphique en symbolisant le sélénium par un signe « - » et le tellure par un signe « + », placés au-dessus du symbole chimique de l'atome auquel le sélénium (ou le tellure) est lié.

$\dot{K}\ \ddot{\dot{M}}o$	Oximolybdate potassique.
$\overset{,}{K}\ \overset{,,,}{M}o$	Sulfomolybdate potassique.
$\overset{-}{K}\ \overset{---}{M}o$	Sélénimolybdate potassique.
$\overset{+}{K}\ \overset{+++}{M}o$	Tellurimolybdate potassique.

Figure 17. Exemple de notations symboliques avec points (symbole de l'oxygène), virgules (symbole du soufre), signe « - » (symbole du sélénium) et signe « + » (symbole du tellure) placés au-dessus du symbole chimique du potassium ou du molybdène.

Aujourd'hui, la virgule est encore utilisée pour rendre compte de la présence de molécules d'eau dans les formules chimiques des sels hydratés (par exemple, « $CuSO_4,5H_2O$ »), même si le recours au point, voire au point médian, est devenu majoritaire. Elle est aussi employée dans des écritures symboliques spécifiques comme la formule chimique du topaze « $Al_2SiO_4(F,OH)_2$ ». Dans ce cas, la virgule indique que l'on ne connait pas précisément le ratio entre l'ion fluorure et l'ion hydroxyde, tout en garantissant que la somme de leurs contributions vaut 2 dans la formule chimique[28].

[28] Notons enfin que Berthelot propose une équation avec un signe « - » en 1856 et qu'il ajoute les mentions symboliques indiquant les états de la matière (en toutes lettres) dès 1865 (de Merten, 2013).

5.2.5.4. Apparition des représentations de la structure des molécules

Le développement exceptionnel de la chimie organique dans le courant du XIXème siècle eut deux conséquences majeures sur les notations chimiques. La première est l'avènement d'un nouveau système sémiotique : les représentations iconiques qui mettent en avant l'arrangement spatial des atomes dans une molécule. Ce « retour à l'icône » (Edeline, 2009) est motivé en grande partie par l'incapacité du système de Berzelius à distinguer les isomères. Comme l'écrit Dagognet (1969), la langue symbolique des chimistes est performante pour représenter les corps distincts mais elle est inefficace pour distinguer les corps « presque-égaux ». De plus, comme l'arrangement spatial des atomes dans une molécule joue un rôle prépondérant dans les propriétés réactionnelles des substances, il devient nécessaire de caractériser avec précision les liaisons interatomiques et les angles de liaison. Sous l'impulsion de Couper et Kekulé qui postulent l'existence de liaisons entre atomes de carbone, Loschmidt (1861) propose des représentations de molécules faites de cercles emboités et présentant des liaisons simples, doubles ou triples entre atomes de carbone (figure 18).

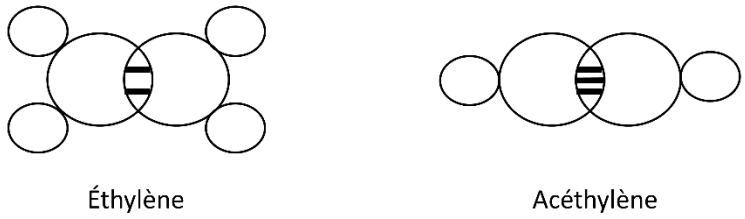


Figure 18. Représentations moléculaires de Loschmidt (1861).

En 1864, les formules de Crum Brown font apparaître les liens chimiques par des traits discontinus. La « formule développée » est née. Elle donnera lieu en une trentaine d'années à de nombreuses versions et modifications de perspective : formule semi-développée plane, projection de Fischer, formule de Haworth, etc.

Néanmoins, Liu et Taber (2016) soulignent que l'amélioration de la représentation de la structure coûte en capacité de traitement quantitatif. Ils en concluent : « As none of these representations is able to afford the whole set of meanings invoked in teaching, they need to be co-deployed to functionally complement each other[29] » (Liu et Taber, 2016, p. 447).

[29] « Comme aucune des représentations n'est capable d'offrir la totalité des significations invoquées dans l'enseignement, elles doivent être co-déployées pour se compléter les unes les autres de manière fonctionnelle » (traduction libre).

Ce « co-déploiement » de systèmes sémiotiques différents est une caractéristique intrinsèque à la chimie qui trouve manifestement sa source dans les cours tortueux de son histoire d'un point de vue épistémologique.

5.2.5.5. Apparition des flèches de réaction

Une deuxième grande conséquence de l'avènement de la chimie organique consiste en l'apparition de nombreuses flèches de réaction différentes[30], qui vont petit à petit remplacer le signe « = » initial issu des travaux de Lavoisier. Le développement de la thermodynamique au cours de la deuxième moitié du XIXème siècle va donner lieu à la création de nouvelles flèches adaptées aux nouveaux concepts élaborés. Ainsi, vers 1884, Van't Hoff introduit le symbole de la double flèche à double pointe (⇄) pour représenter l'équilibre chimique. Dix ans auparavant, en 1874, Hinrichs avait introduit le symbole de la flèche pleine à double pointe (→), sans qu'elle ne soit utilisée avant 1900 par d'autres chimistes. Enfin, la double flèche à simple pointe (⇌) est proposée par Hugh Marshall en 1902. Alvarez (2012) a dénombré les livres utilisant les différents signes et flèches, de 1800 à la moitié du XXème siècle (figure 19). On remarque la chute de l'utilisation du signe « = » à partir des années 1920 et la coexistence de la simple flèche à double pointe et de la double flèche à double pointe au cours du XXème siècle.

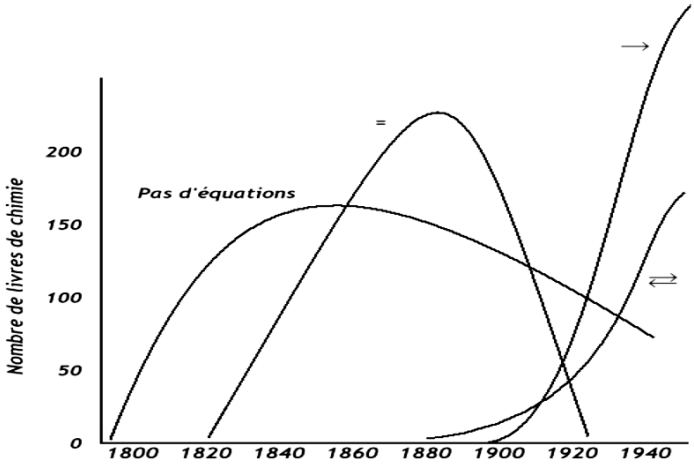


Figure 19. Évolution du nombre de livres présentant des équations chimiques et certains signes (« = », flèche simple, double flèche, etc.) (Bataille *et al.*, 2015, d'après Alvarez, 2012).

Ce constat a été confirmé par Bataille *et al.* (2015), montrant que la majorité des ouvrages de chimie actuels contiennent à la fois des simples flèches et des doubles flèches, souvent utilisées à bon escient. Par contre, ces ouvrages ne présentent pratiquement jamais de signe « = » dans les équations chimiques publiées. Nous ne prenons pas en considération ici les flèches qui décrivent les mécanismes réactionnels

[30] Pour en savoir plus sur les flèches utilisées en chimie, lire Lakshminarayanan (2010), Alvarez (2012) ou Foulon et Bataille (2016).

en chimie organique, même si leur étude d'un point de vue didactique nous semble légitime et importante. Le passage du signe « = » à une flèche de réaction est un moment important de l'histoire de la notation symbolique en chimie, car il impose un décalage inédit avec les mathématiques.

5.2.5.6. De la molécule au réseau ionique

La découverte de l'absence de molécules de NaCl dans la substance « chlorure de sodium » constitue également un nœud dans l'histoire de la chimie. La problématique est enclenchée par Arrhenius, malgré lui, quand il postule en 1884 que « salt molecules are found in solid salts as the smallest particles and decompose into ions by dissolving in water[31] » (Barke *et al.*, 2009). En 1912, Laue découvre, via l'utilisation des rayons X, que le terme « molécule de sel » n'est pas adapté pour décrire les réseaux ioniques mis au jour. À partir de là, il fut ardu d'imposer à la communauté scientifique le fait que le cristal de chlorure de sodium ne contienne pas de molécules de chlorure de sodium (c'est-à-dire un atome de chlore lié à un atome de sodium), mais présente un arrangement d'ions sodium et d'ions chlorures respectant une structure cubique à faces centrées. Bragg témoigne de la résistance de certains de ses collègues quant à abandonner l'idée d'une molécule de NaCl : « Some chemists at that time were very upset indeed about this discovery and begged me to see that there was just a slight resemblance of one atom of sodium to one of chlorine as a properly married pair[32]» (Bragg, 1943). Il est intéressant de noter qu'aujourd'hui encore, l'expression « molécule de NaCl » reste très populaire, notamment dans les magazines scientifiques, les manuels scolaires ou les sites internet (Barke *et al.*, 2009). Par ailleurs, pour sortir de ce problème terminologique, des auteurs contemporains ont proposé de remplacer le terme « molécule » par le terme « formule-unité » dans le cas des corps ioniques (Atkins et Jones, 1998).

5.2.5.7. Désubstantialisation du symbole chimique

Nous ne pouvons terminer ce panorama historique sans évoquer les percées de Gaudin et Avogadro en ce qui concerne la distinction entre atomes et molécules, ainsi que celles de Mendeleïev pour la distinction entre corps simple et élément (Laugier et Dumon, 2004b). La clarification des concepts d'atome et de molécule a permis l'installation définitive des équations chimiques et leur pleine exploitation par les chimistes du XXème siècle. Enfin, le concept d'élément défini par Mendeleïev a considérablement modifié le sens donné à un symbole chimique : celui-ci n'est plus seulement représentatif d'une

[31] « Les molécules de sel se trouvent dans les sels solides, dont elles constituent les plus petites particules, et elles se décomposent en ions en se dissolvant dans l'eau » (traduction libre).
[32] « Certains chimistes de cette époque étaient en fait très fâchés de cette découverte et me demandèrent de voir s'il n'y avait pas quelque chose qui ressemble un peu à une paire associant un atome de sodium et un atome de chlore » (traduction libre).

substance ou d'un atome particulier, il devient également le symbole d'une catégorie virtuelle plus large qui entre en résonance avec le tableau périodique. Cette désubstantialisation du symbole chimique peut être vue comme un aboutissement du système initial de Berzelius, où le symbole est initialement une boîte noire, adaptable à toutes transformations graphiques.

5.2.6. La notation symbolique aujourd'hui

Nous renvoyons au premier chapitre de cet ouvrage pour de plus amples informations sur ce que prônent aujourd'hui les ouvrages de référence (IUPAC, 2007). Cependant, il nous semble important d'insister sur le retour en grâce, dans une certaine mesure, du signe « = » au sein de l'équation chimique. Selon IUPAC, le signe « = » peut être utilisé dans le cas simple d'une équation chimique pondérée. Si l'intention de l'auteur est de montrer la conservation de la masse, alors le signe « = » s'impose. A contrario, s'il souhaite indiquer que la réaction est incomplète, le symbole « ⇌ » est le plus pertinent. Ainsi, face à un éventail de possibilités graphiques, qui sont les produits de l'histoire de sa discipline, le chimiste doit choisir en connaissance de cause quelle représentation sert le mieux ses projets.

5.3. LIENS AVEC LES DIFFICULTÉS DIDACTIQUES DES APPRENANTS

L'analyse épistémologique de la notation symbolique des chimistes laisse apparaître de nombreux liens avec certaines de difficultés didactiques recensées au chapitre 2. Elle intègre également la problématique des niveaux de savoir et des systèmes sémiotiques évoqués dans les chapitres 3 et 4. Nous relevons ainsi sept liens forts entre les faits de nature épistémologique évoqués plus haut et les difficultés rencontrées par les apprenants face à la symbolique chimique.

5.3.1. L'interprétation additive en tant que raisonnement primitif

L'interprétation additive des corps purs composés, c'est-à-dire supposer que ceux-ci sont constitués de corps purs simples juxtaposés ou associés, semble constituer une constante épistémologique dans l'histoire de la chimie jusqu'à la fin du XIXème siècle. En effet, le signe alchimique de certaines substances rend compte de l'existence d'une telle interprétation. C'est le cas, par exemple, du symbole de l'eau de chaux, dans lequel le symbole de la chaux vive est inscrit dans le triangle représentant l'eau (figure 20a).

Figure 20. Exemples de symboles alchimiques issus de la combinaison d'autres symboles : (a) écriture symbolique de la formation de l'eau de chaux ; (b) écriture symbolique de la formation de sulfure d'arsenic (d'après Edeline, 2009).

Ce choix graphique rend compte à la fois de la « disparition » observée de la chaux vive dans l'eau, ainsi que de la possibilité de récupérer la chaux vive par chauffage. La figure 20b montre le cas de la réaction du soufre et de l'arsenic pour former le sulfure d'arsenic. Le symbole du produit formé est, cette fois, l'association graphique des deux symboles, basée sur un élément commun : le trait à la base du triangle dans le symbole du soufre et le trait unissant les deux cercles dans le symbole de l'arsenic. L'imbrication des deux symboles combine les deux substances initiales.

Les alchimistes pensaient ainsi que les substances complexes étaient formées d'au moins deux substances plus simples qu'il était possible d'obtenir à nouveau par chauffage, évaporation ou autres processus réactionnels. Depuis lors, la dualité composition/décomposition, ou synthèse/analyse, n'a cessé d'occuper l'esprit des chimistes. Grâce au concept d'affinité, Boerhaave postule une force d'attraction entre les substances, permettant de former des corps composés ; Lavoisier imagine des blocs simples qui peuvent s'associer et créer sa nouvelle nomenclature ; Berzelius avance l'idée que chaque substance complexe est composée de deux (et seulement deux) entités de signes d'électroaffinité opposés ; Dumas pose l'hypothèse que des groupements peuvent être substitués à d'autres (un méthyle à un chlore ; un chlore à un hydrogène ; etc.), dans le cadre de la théorie des radicaux en chimie organique.

Cette interprétation additive de la matière est donc partagée par d'illustres chimistes ainsi que par une partie des élèves présents dans nos classes (Laugier et Dumon, 2004b). Si l'obstacle est clairement de nature épistémologique selon Bachelard (1938), son origine cognitive reste à élucider. Nous posons l'hypothèse que l'interprétation additive peut être expliquée par une assertion naïve comparable à une « p-prim » (ou « primitive phénoménologique ») de DiSessa (1988), c'est-à-dire une structure cognitive fondamentale qui permet de construire une idée, une explication face à un phénomène observé[33]. Elle peut s'énoncer comme suit : tous les objets complexes doivent être constitués de pièces plus petites. Ces pièces ont conservé leur intégrité pendant le processus et peuvent donc être substituées. Tout objet complexe devient alors comparable à une horloge dont les pièces (rouages, aiguille, etc.) ne sont pas modifiées par leur combinaison ou leur agencement entre elles. On voit que cette « p-prim » est renforcée par la définition de la molécule comme une entité « constituée d'atomes »,

[33] Parmi les p-prims, on peut citer « more A, more B » ou encore « Closer means stronger ».

celle-ci pouvant servir de contrefort analogique à la représentation d'un corps pur composé constitué de corps purs simples. En posant une origine externe à l'enseignement de la chimie, nous allons à l'encontre de Barke *et al.* (2009) qui présente l'interprétation additive comme une conception incorrecte créée par l'école (« school-made misconception »). Si un énoncé comme « l'eau est composée d'hydrogène et d'oxygène » ne peut effectivement que renforcer l'interprétation additive quand il est prononcé par un professeur de chimie, il n'est pas – à notre sens – à l'origine de la difficulté éprouvée par les apprenants. La mise en avant de primitives phénoménologiques dans l'explication de phénomènes chimiques par des élèves de 11 à 16 ans a déjà été proposée par Taber et Garcia-Franco (2010).

Enfin, il est logique d'attribuer un rôle prépondérant aux représentations symboliques post-alchimiques dans le maintien de l'interprétation additive présente chez les élèves. En effet, une notation actuelle comme « CO_2 » renforce l'idée d'une juxtaposition d'un atome de carbone et d'une molécule de dioxygène. Mais les écritures issues de la conception dualistique de la matière de Berzelius sont tout autant représentatives d'une telle interprétation : une notation comme « $CuO + SO^3$ » (sulfate de cuivre) laisse imaginer la conservation des deux substances initiales au sein d'un produit final. Une charge épistémologique aussi lourde doit être prise en compte par les enseignants dans la réalisation d'activités didactiques permettant de traiter le problème spécifique de l'interprétation additive des corps purs composés par les élèves.

5.3.2. Désubstantialisation et « resubstantialisation »

Notre analyse épistémologique montre une désubstantialisation progressive du symbole chimique jusqu'à Mendeleiev, suivie d'une tentative de « resubstantialisation » qui perdure jusqu'à nos jours, notamment dans l'enseignement de la chimie. En effet, dans un premier temps, l'image alchimique était un condensé de la substance en une image, un équivalent « magique » et stylisé. Cette (sur)substantialisation du signe sera progressivement gommée par les intentions normatives de Dalton, qui impose un décalage entre le symbole et les propriétés de la substance, et celles de Berzelius, qui finit par ne garder qu'un lien langagier entre les symboles et la substance (« abréviation » du terme). Klein (2002) a relevé que c'est précisément cette désubstantialisation du symbole qui a permis aux chimistes de se saisir de la notation symbolique de Berzelius et d'en faire un « outil de papier » explicatif et prédictif, d'un point de vue quantitatif. La symbolique de Berzelius va connaître une dernière étape de désubstantialisation par l'entremise de Mendeleïev et la constitution d'une nouvelle signification du symbole chimique : la représentation de l'élément chimique, concept désubstantialisé par excellence. Cependant, le développement de la chimie organique a nécessité une reconnexion aux substances, et plus particulièrement à leur arrangement spatial : c'est la naissance des représentations iconiques rendant compte de la structure

des molécules dans l'espace. D'autres systèmes sémiotiques emboîtés (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2009) sont ainsi créés pour pallier le manque de concrétisation des symboles chimiques.

D'un point de vue didactique, la « sténographie » désubstantialisée de Berzelius (Dagognet, 1969) est ainsi à l'origine de quelques difficultés énoncées dans le chapitre 2. Par exemple, de nombreux élèves ne voient dans le symbole chimique qu'une abréviation (Al-Kunifed *et al.*, 1993 ; Laugier et Dumon, 2004b) qu'ils ne connectent pas aux niveaux de savoir microscopique et macroscopique de Johnstone ou aux niveaux de conceptualisation de Taber. Il n'est pas étonnant de poser un tel constat quand on sait, d'une part, que les symboles de Berzelius n'ont initialement pas été créés pour rendre compte de concepts microscopiques, et que, d'autre part, ils ont été utilisés par les chimistes du XIXème siècle essentiellement comme des outils langagiers. Confrontés au vide sémantique du symbole chimique, les élèves ont alors tendance à convoquer des significations parfois issues d'autres champs (Depecker, 2003), ou à utiliser des démarches algorithmiques performantes (notamment pour la pondération des équations chimiques) sans lien avec les substances aux niveaux macroscopique et microscopique. Un des grands défis de l'enseignement de la chimie actuel est ainsi de « resubstantialiser » les symboles et les formules chimiques. Cette démarche doit être menée en reliant la symbolique chimique aux propriétés macroscopiques des substances et aux entités microscopiques, tout en conservant les avantages de simplicité et d'efficacité du système.

5.3.3. « Mathématisation » et « démathématisation »

La démarche algorithmique de pondération des équations chimiques observable chez les apprenants est également liée à la mathématisation progressive de la symbolique chimique au cours de l'histoire. Lavoisier est le premier grand instigateur[34] du rapprochement entre langage chimique et langage mathématique, tout en incarnant le premier censeur de celui-ci. Pourtant « loin de pouvoir porter dans la chimie la précision mathématique » (Lavoisier, 1782), il écrit la première « équation » chimique en usant des signes « + » (emprunté aux chimistes du début du XVIIIème siècle) et « = ». La linéarisation progressive de l'équation chimique renforce d'autant plus le parallélisme entre les systèmes symboliques chimique et mathématique.

Berzelius rapproche encore davantage les deux systèmes symboliques en ajoutant un chiffre en exposant du symbole chimique, pour indiquer le nombre de volumes de la substance (puis le nombre d'atomes de chaque type) impliqué dans la formation du

[34] Lavoisier s'est cependant basé sur les travaux des « fabricants de tables » d'affinité tels que Bergman ou Richter et ses travaux sur la stœchiométrie.

corps composé[35]. Le chimiste suédois parle, de surcroît, de « formules chimiques »[36] pour désigner la combinaison de ses signes chimiques (Berzelius, 1818-1819).

À partir des années 1830, une vague de distanciation par rapport aux mathématiques est enclenchée. Liebig repositionne en indice du symbole chimique le chiffre indiquant la composition en nombre d'atomes. Ce changement a précisément pour but de distinguer plus aisément une équation chimique d'une équation mathématique. Plus tard, le remplacement du signe « = » par une ou des flèche(s) de réaction constitue une autre étape de distanciation par rapport au système symbolique mathématique. Ce retour de balancier historique a même pour conséquence de provoquer une remise en question du terme « équation » au profit d'un terme plus neutre comme « schéma réactionnel » (Barke *et al.*, 2012, p. 193).

Cette oscillation entre rapprochement et distanciation des deux champs disciplinaires débouche aujourd'hui sur la recherche d'un difficile équilibre dans le cadre de l'enseignement de la chimie. La proposition émise par IUPAC de permettre la coexistence d'un signe « = » et de flèches dans les équations de réaction, en fonction des intentions de l'auteur, est le produit de cette recherche d'un compromis langagier. Cependant, les programmes de chimie en Fédération Wallonie-Bruxelles continuent à prôner le seul recours aux flèches de réaction et à ne pas évoquer l'usage du signe « = », tout en usant de résolutions d'exercices numériques[37]. Le paradoxe des professeurs de chimie est ainsi posé : il s'agit, d'un côté, de « démathématiser » quelque peu la symbolique chimique, et d'un autre de maintenir un lien fort entre les deux champs disciplinaires, notamment quand les élèves doivent pondérer une équation chimique ou résoudre un problème stœchiométrique.

5.3.4. Confusion épistémologique entre indice et coefficient

L'une des principales difficultés des élèves face à la symbolique chimique consiste en la confusion entre les rôles (ou l'écriture) de l'indice et du coefficient (Yarroch, 1985 ; Marais et Jordaan, 2000). Notre analyse montre que cette confusion a des origines épistémologiques. En effet, c'est Berzelius qui invente l'« indice », en tant que représentant du nombre de volumes de substance nécessaire à la formation du composé, mais en lui prêtant quatre formes différentes. Primo, l'indice « 1 » n'est pas noté, ce qui

[35] Sur ce thème, Berzelius commente avec un certain mépris les critiques des mathématiciens : « On a aussi dit que ces formules produisaient un effet désagréable sur le mathématicien, parce que le nombre connu dans l'algèbre sous le nom d'exposant, et qui est placé en haut sur la droite, a une valeur plus grande que dans ces formules, et qu'il fallait avant tout reconnaître les droits des mathématiciens ; une semblable objection ne mérite pas d'être réfutée » (Berzelius, 1838, p. 266).

[36] Avant Berzelius, Lavoisier (1782) avait déjà introduit le terme « formule » pour indiquer une composition de substance.

[37] Voir le chapitre 1 pour un relevé des attendus programmatiques concernant la symbolique chimique en FWB.

sous-entend que le symbole chimique porte l'information de la quantité unitaire de volume. Secundo, l'indice apparaît sous la forme d'un chiffre devant le symbole chimique, comme dans la notation « C + 2O ». Il s'agit ici d'une notation particulièrement intrigante pour un élève d'aujourd'hui, l'indice étant placé à la manière d'un coefficient. Pourtant, c'est bien la même fonction qui est remplie par le chiffre « 2 » dans la notation « C + 2O », et dans une écriture moderne comme « CO_2 ». Tertio, l'indice « 2 » est noté dans certains cas sous la forme d'un trait barrant le symbole chimique, ce qui rend l'écriture moins pratique mais plus concise (par exemple, « ~~H~~ » pour « H_2 »). Quarto, l'indice peut être indiqué en exposant du symbole atomique, comme dans la notation « $CuO + SO^3$ ».

Des quatre notations de l'indice proposées par Berzelius, une seule arrivera jusqu'à nous : celle qui impose de ne pas noter l'indice « 1 »[38]. Il faudra attendre Liebig en 1834, et un certain temps d'assimilation chez les chercheurs non-allemands, pour que les chiffres indiquant les volumes de substance (ou le nombre d'atomes) formant un corps composé soient notés en indice du symbole chimique. Le coefficient stœchiométrique sera réinvesti en chimie organique, et sa distinction avec l'indice deviendra effective à partir du début du XIXème siècle. Jusqu'à un temps relativement proche, donc, indice et coefficient étaient confondus dans le champ disciplinaire, au moins de manière symbolique. Il n'est dès lors pas surprenant de rencontrer des difficultés analogues chez les apprenants, notamment quand ils assignent le même rôle aux deux signes (Yarroch, 1985).

5.3.5. Déconnexion entre symbole chimique et terme de la nomenclature

Il a été observé que les élèves éprouvent des difficultés à relier, dans certains cas, un symbole chimique à un terme de la nomenclature (Keig et Rubba, 1993 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012). Cette difficulté peut être vue comme une conséquence logique de l'utilisation actuelle d'un système symbolique mis au point en 1814. En effet, la symbolique de Berzelius est le produit de son époque. Nous avons montré précédemment que le chimiste suédois s'était basé sur des termes latins (ou des termes en langue étrangère latinisés) et que le choix des symboles (une ou deux lettres) était dicté par la distinction qu'il opérait entre métalloïdes et métaux. Or, en transposant ces règles à l'époque moderne, il devient nécessaire d'opérer des changements majeurs, comme nous l'avons indiqué au chapitre 1. Les règles de Berzelius, actuellement, impliquent un lien entre symbole et langue française (hors de propos en 1814) et ne disent rien d'une distinction entre métalloïdes et métaux. Cette transposition didactique masque les motivations de Berzelius à l'origine de ses choix. Les élèves n'éprouvent

[38] Et, pour être tout à fait complet, la proposition plus tardive de représenter les « doubles atomes » via un chiffre placé en indice du symbole (comme dans « H_2 »). Cette pratique sera reprise pour représenter les corps purs simples polyatomiques, comme le dioxygène.

bien entendu que peu de difficultés quand le symbole et le terme en français sont liés (« H » pour hydrogène, par exemple). Cependant, des erreurs surviennent quand le symbole est lié à un terme qui n'est pas issu du français (« Na » pour sodium) ou quand il s'agit de déterminer une deuxième lettre appartenant au nom en langue française (« Mg » pour magnésium). Même les nouveaux symboles, correspondant à des éléments récemment découverts, ne peuvent être déduits simplement en appliquant les nouvelles règles édictées (Koppenol *et al.*, 2016), de par l'obligation, notamment, de connaître les symboles précédemment utilisés dans l'histoire, mais qui n'ont pas été conservés. Il en résulte souvent, pour les apprenants, une étude « par cœur » des symboles chimiques qui renforce un peu plus encore la désubstantialisation du symbole chimique, en le déconnectant du terme original dont il est l'abréviation, ainsi que des règles langagières dont il est issu.

5.3.6. Complémentarité et opposition

Il est également possible d'établir un lien entre la tendance de la chimie à la dualisation, évoquée au cours de notre analyse épistémologique, et celle de certains élèves à assigner des rôles opposés aux substances, notamment ceux d'agent et de patient. Ces derniers entrent en réaction car ils seraient complémentaires : la réaction permet de rencontrer leurs « attentes » énergétiques et de former ainsi des produits plus stables énergétiquement. L'opposition des fonctions semble nécessaire pour conceptualiser la matière, tant celle-ci a été renouvelée et redéfinie selon les époques. La parenté est évidente entre la dualité passif/actif (ou masculin/féminin, sec/humide, etc.) des alchimistes, la dualité électropositif/électronégatif de Berzelius et les dichotomies actuelles que sont les dualités électrophile/nucléophile ou acide/base. De nouveau, il est possible d'assigner le statut de p-prim selon DiSessa à ces raisonnements élémentaires, consistant d'une part à poser le fait que les opposés s'attirent de par leur complémentarité, et, d'autre part, à affirmer que l'un des protagonistes est plus responsable que l'autre de l'établissement ainsi que de l'issue d'un phénomène. Les représentations symboliques véhiculent encore ce type de représentations dans des exemples comme « Mg + HCl » (l'acide est écrit en deuxième position car il est, selon certains élèves, plus réactif que le métal) ou simplement « NaCl » (l'élément le plus électronégatif s'écrit en deuxième position et « prend » l'électron du sodium). Si l'ordre d'écriture symbolique est le résultat de la prise en compte de fonctions opposées mais complémentaires, alors il est logique de penser que cette dualité a des conséquences sur les représentations de la réaction chimique construites par les élèves. On retrouve d'ailleurs ce genre de phénomène de dualité dans une assertion comme « le nucléophile attaque le site électrophile » lors de la description de mécanismes réactionnels en chimie organique (Taber, 2015). Le nucléophile est dans ce cas l'agent, quand l'électrophile constitue le patient.

Notons enfin que cette complémentarité des contraires empêche d'imaginer l'existence de molécules composées d'atomes identiques. Dans ce cadre, les atomes d'oxygène, aux propriétés et aux impératifs énergétiques identiques, ne seraient pas complémentaires et ne devraient donc pas former de molécules telles que le dioxygène ou l'ozone. Cette réticence à accepter le concept de molécules homoatomiques s'observe tant dans l'histoire de la chimie que dans l'esprit de certains élèves d'aujourd'hui (Friedel et Maloney, 1992).

5.3.7. Un système dynamique

Enfin, soulignons le mouvement incessant qui anime le système sémiotique symbolique des chimistes, et qui peut paraître paradoxal pour nos élèves, amenés à étudier des signes souvent présentés comme immuables. Le retour du signe « = » dans l'équation de réaction, prôné par IUPAC et testé pendant quelques années en France, est un bon exemple de l'évolution des notations symbolique actuelles en chimie. On notera également que la découverte récente de nouveaux éléments a provoqué l'élargissement naturel de notre « alphabet » élémentaire à de nouveaux symboles : Nh (pour Nihonium), Mc (pour Moscovium), Ts (pour Tenessine), Og (pour Oganesson)[39]. Le système symbolique n'est d'ailleurs pas le seul système sémiotique mouvant en chimie. Par exemple, les règles de nomenclature chimique des oxydes non-métalliques ou les pictogrammes de danger ont été récemment modifiés. Ces changements démontrent la nécessité de faire évoluer les systèmes de représentation en fonction des nouveaux défis que ne manque pas de poser la communication en chimie aujourd'hui.

5.4. CONCLUSIONS

Le cours de l'évolution de la symbolique chimique s'avère donc tortueux, serpentant entre les contraintes techniques et théoriques, les tensions politiques, les rivalités personnelles et les compromis de façade. Il apparaît cependant que le temps fait son office et lisse la pierre rugueuse, offrant – par érosion – l'impression d'une pierre polie et sans défauts. Dagognet (1969, p. 86) avait saisi pleinement ce phénomène en précisant que, comme « les traités s'efforcent d'effacer les guerres autant que de les en empêcher », la symbolique chimique actuelle cache les circonvolutions de l'histoire et constitue un point de consensus qui empêche (pour un temps) les digressions. La symbolique chimique suggère bien du « non-dit » (Barlet et Plouin, 1994), mais ce contenu caché est riche : une formule chimique rend compte autant de signifiés contemporains qu'elle ne témoigne, en creux, des décisions et des discussions qui ont amené à sa réalisation. C'est ce contenu significatif que nous avons interrogé dans ce

[39] Le choix des nouveaux symboles éclaire les règles de la « novlangue » (voir chapitre 1) qu'est devenue la notation symbolique originale de Berzelius. Les termes de la nomenclature sont littéralement créés pour l'occasion en fonction, principalement, de lieux (Japon, Moscou, Tennessee) ou de noms de chercheurs (Oganessian), comme le précise une note récente de IUPAC.

chapitre, dans le but de le relier avec les difficultés rencontrées par les élèves. Force est de constater que le poids épistémologique engendre potentiellement des difficultés pour les apprenants. Nous pouvons dès lors énoncer un double constat.

Premièrement, des primitives phénoménologiques (ou « p-prims ») peuvent être à l'origine de phénomènes observés dans l'histoire des notations chimiques, ainsi que de difficultés éprouvées par les apprenants. L'idée que tout objet complexe est composé de parties plus petites, substituables, supporte l'interprétation additive des corps purs composés comme étant constitués de corps purs simples juxtaposés ; l'idée que la matière soit divisée en catégories dichotomiques engendre une dualité agent/patient que l'on retrouve dans certaines productions d'élèves ; le raisonnement selon lequel les opposés s'attirent et que les semblables se repoussent constitue un obstacle à la conceptualisation des molécules homoatomiques comme le dioxygène ou le dihydrogène.

Deuxièmement, l'histoire de la chimie est marquée par des mécanismes de désubstantialisation et de « resubstantialisation » du symbole chimique, ainsi que de mathématisation et de « démathématisation » de l'équation de réaction. Actuellement, il s'avère que l'enseignement de la chimie est marqué par une « resubstantialisation » de la symbolique chimique (c'est-à-dire une reconnexion aux niveaux de conceptualisation microscopique et macroscopique) et par une « démathématisation » relative de l'équation chimique (c'est-à-dire un renforcement des signes et des significations de nature chimique). Il subsiste pourtant une tension dans ces mécanismes, susceptible d'influencer les pratiques enseignantes. Il est de la responsabilité des auteurs de programmes et de celle des professeurs de chimie de trouver un équilibre permettant de faire de la symbolique chimique un outil quantitatif pratique, sans l'enfermer dans un huis-clos hermétique.

En plus des mécanismes de « démathématisation » et de « resubstantialisation », un autre phénomène didactique relatif à la symbolique chimique est à l'œuvre : le recours, dans les classes, à une comparaison « linguistique » entre la langue symbolique des chimistes et la langue française. Cette mise en correspondance entre les deux systèmes sémiotiques permet d'effectuer un rapprochement entre les symboles chimiques et les lettres de l'alphabet, entre les formules moléculaires et les mots, entre les équations chimiques et les phrases. Dans le chapitre suivant, nous allons interroger les ressorts de cette analogie et tenter de déterminer les relations qu'elle peut entretenir avec certaines difficultés rencontrées par les apprenants.

Chapitre 6

L'analogie entre la langue française et la langue symbolique chimique : analyse linguistique et didactique

Si l'atome était une lettre, une molécule serait un mot.

(Matthys *et al.*, 2011)

Les phonèmes sont en quelque sorte les « atomes » du langage.

(Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

La singularité de certains systèmes sémiotiques utilisés en chimie (et donc dans son enseignement) et présentés dans le chapitre 4 est à l'origine des rapprochements décrits dans les citations ci-dessus. Il semble notamment évident que l'enseignement-apprentissage du système symbolique chimique puisse s'appuyer sur une mise en relation de celui-ci avec les caractéristiques d'une langue ordinaire, comme la langue française. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude d'une analogie, présentée dans des sources diverses, qui met en correspondance la langue française (ses symboles, ses règles d'écriture, sa structure) avec différents systèmes grâce auxquels le chimiste décrit la matière. Nous appelons ce rapprochement « analogie de l'alphabet »[1].

Cette analogie se base sur un axiome central : les structures de la langue ordinaire et celles de la matière sont similaires à plus d'un titre. L'analyse épistémologique développée au chapitre 5 nous a montré que Berzelius a choisi les symboles chimiques en puisant dans les lettres de l'alphabet latin pour des raisons pratiques : il fallait que les symboles chimiques s'intègrent aisément dans un texte en langue ordinaire. En faisant des symboles de l'alphabet latin les symboles des unités chimiques, Berzelius traçait ainsi les premières mises en correspondance entre les deux systèmes de signes. Depuis lors, ce lien historique est resté tacite dans l'usage. Cependant, il arrive fréquemment que cette analogie resurgisse dans certaines séquences de leçons issues de manuels scolaires ou dans des articles de recherche en didactique de la chimie. Nous avons posé l'hypothèse que l'enseignement (via une démarche qui va de la citation anecdotique à l'exploitation planifiée) d'une analogie entre la langue française et la

[1] Nous emploierons l'expression « analogie de l'alphabet » pour représenter l'analogie entre les symboles chimiques (ainsi que les atomes ou les éléments qu'ils représentent) et l'alphabet français. Nous considérons en effet uniquement l'alphabet français pour cette étude, bien que l'ensemble de l'analyse s'applique à toute autre langue incluant un système symbolique graphique. Par ailleurs, nous utiliserons parfois l'adjectif « latin » pour décrire l'alphabet français, même si quelques différences subsistent aujourd'hui entre les deux systèmes de signes. Nous justifierons l'usage du terme « analogie » dans la suite du chapitre.

structuration de la matière par les chimistes pouvait avoir des impacts didactiques susceptibles d'engendrer certaines difficultés recensées dans le chapitre 2. En utilisant les cadres théoriques de Gentner et Holyoak (voir plus loin), nous posons trois questions de recherche :

1) Quelles sont les caractéristiques des domaines source (langue française orale et son écriture graphique) et cible (structure de la matière en chimie et son écriture symbolique) dans les analogies observées ?
2) Comment fonctionnent ces analogies dans les cadres théoriques de Gentner et de Holyoak?
3) Quels sont les impacts didactiques potentiels de l'usage de l'analogie de l'alphabet sur la compréhension et l'utilisation de l'écriture de la symbolique chimique par les élèves ?

6.1. ANALOGIE DE L'ALPHABET : SOURCES ET FRÉQUENCE

Les citations placées en exergue ci-dessus proviennent respectivement d'un manuel scolaire belge à destination d'élèves de 14-15 ans et d'un livre de référence universitaire en linguistique. Ces deux énoncés sont des exemples de la connexion que des auteurs issus de domaines variés réalisent entre le français moderne et la chimie. Ce rapprochement entre les deux disciplines se retrouve plus fréquemment dans des manuels scolaires (Matthys *et al.*, 2011 ; Pirson *et al.*, 2015) et dans des livres de référence de niveau universitaire (Hill *et al.*, 2008 ; Wouters, 2014 ; Tro, 2015) traitant spécifiquement de chimie, que dans des ouvrages dédiés à la linguistique ou à l'apprentissage de la langue française (Baudrillard, 1976 ; Siouffi et Van Raemdonck, 2012 ; Haïpam, 2016). On trouve également l'analogie de l'alphabet dans des livres et articles de didactique de la chimie (Markow, 1988 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Nemeth, 2006 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012) où le langage des chimistes est étudié et décrit avec les outils développés par les linguistes. Enfin, de nombreux sites internet et revues généralistes s'intéressant à l'enseignement de la chimie relaient l'hypothèse de l'existence d'un « alphabet de la chimie » (Eastes, 2010) et d'une « analogie de l'alphabet » (David, 2002). Bref, penser la chimie en corrélation avec une langue naturelle, comme le français, est une idée répandue.

En restreignant l'étude aux manuels scolaires et aux livres de référence de niveau universitaire, on remarque une grande disparité dans la manière de présenter l'analogie de l'alphabet. Certains auteurs rapprochent les lettres de l'alphabet et les éléments chimiques, comme Tro (2015, p. 56) :

> Tout comme les combinaisons de seulement 26 lettres de l'alphabet en français permettent la formation d'un nombre presque illimité de mots, chacun possédant son sens particulier, les combinaisons des 91 éléments naturels

permettent l'existence d'un nombre quasi illimité de composés, chacun possédant ses propriétés propres.

D'autres insistent sur le lien entre les lettres de l'alphabet et les atomes (Matthys *et al.*, 2011, p. 22). Enfin, Wouters (2014, p. 10), par exemple, insiste sur l'analogie entre les symboles chimiques et les lettres de l'alphabet en déclarant qu'« il convient de mémoriser ces symboles qui constituent l'alphabet de base du chimiste ». Si, dans ces trois cas, les lettres de l'alphabet constituent toujours le pendant linguistique de l'analogie, le pendant chimique varie ainsi selon les auteurs (élément, atome/molécule ou symbole chimique). Il en va de même pour la forme de la présentation de cette analogie : certains optent pour un tableau comparatif « en français / en chimie » (figure 1) (Pirson *et al.*, 2015), d'autres pour un plan (Matthys *et al.*, 2011), d'autres encore pour un texte continu (Tro, 2015 ; Wouters, 2014).

En français	En chimie
Une lettre : P	Un atome : H
Un mot est composé de lettres liées entre elles : je, ami	Une molécule est composée d'atomes liés entre eux : KI, NaOH
Il y a 26 lettres dans notre alphabet : a, b, c,…	Il y a une centaine d'atomes connus : H, He, Li,…
Avec 26 lettres, on peut écrire un grand nombre de mots : livre, ciel, musique, paix, gâteau, sport…	Avec 100 atomes, on peut former un grand nombre de molécules : KBr, $CuCl_2$, $Al_2(SO_4)_3$, HF, NaCl,…
Beaucoup d'assemblages de lettres n'existent pas : tma !?	Beaucoup d'assemblages d'atomes n'existent pas : HNaBa !?
Dans un mot, l'ordre des lettres n'est pas quelconque : chimie et non michie	Dans la formule d'une molécule, l'ordre des symboles n'est pas quelconque : $CaSO_4$ et non $SCaO_4$

Figure 1. Tableau comparatif entre chimie et langue française (Pirson *et al.*, 2015).

Dans les recherches en didactique de la chimie, l'analogie entre langue française et chimie a été développée de multiples façons, notamment en parlant de « grammaire chimique » pour les règles d'écriture des formules moléculaires et des équations chimiques, d'« adjectifs » pour qualifier les symboles des états de la matière, de « verbes » pour décrire le rôle d'une flèche dans une équation de réaction (Nemeth, 2006). On en oublierait presque les spécificités (notamment l'aspect symbolique) du langage des chimistes, tant la parenté entre les deux domaines paraît étroite. Mais si l'analogie de l'alphabet semble puissante à première vue, il convient de nuancer sa pertinence en développant ses fondements et ses conséquences appliquées dans le champ de la didactique de la chimie : quelles sont les caractéristiques de cette analogie selon les cadres théoriques existants ? Peut-on envisager une imprégnation de cette

analogie dans l'esprit des élèves ? Ensuite, nous pouvons nous interroger sur les implications potentielles d'une telle analogie sur la compréhension par les élèves de la langue symbolique des chimistes : ne sont-ils pas susceptibles d'intégrer des propriétés langagières valables dans le domaine de la langue française mais incorrectes dans le domaine de la chimie ? Un rapprochement trop étroit entre symbole chimique et lettre de l'alphabet n'est-il pas un facteur de déconnexion entre le symbole chimique et les objets et concepts qu'il représente ?

Ce chapitre a pour vocation d'éclairer ces problématiques en employant des concepts de linguistique et de terminologie[2] aptes à décrire les systèmes langagiers. Par ce biais, comme d'autres chercheurs avant nous, nous émettons l'hypothèse que le code symbolique des chimistes peut être étudié comme une langue avec les outils forgés par les linguistes, cela avec toutes les précautions d'usage vu les caractéristiques singulières qu'il présente (Mestrallet, 1980 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Dumon et Mzoughi-Khadraoui, 2014 ; Taber, 2015). Dans un premier temps, nous allons préciser l'usage des analogies en sciences ainsi que rappeler quelques cadres théoriques décrivant le concept d'analogie. Dans un deuxième temps, les caractéristiques principales des deux domaines impliqués dans l'analogie seront détaillées. Dans un troisième temps, nous développerons le fonctionnement de l'analogie de l'alphabet selon les cadres théoriques évoqués, en ciblant particulièrement le lien entre symboles chimiques et lettres de l'alphabet. Enfin, nous examinerons des implications didactiques potentielles ainsi qu'une proposition concrète d'utilisation de l'analogie de l'alphabet dans le cours de chimie.

6.2. LES ANALOGIES EN SCIENCES : CADRES THÉORIQUES ET USAGES

6.2.1. Cadres théoriques

L'approche structurale de Gentner a fourni une des définitions les plus fécondes de l'analogie. Celle-ci serait une forme de comparaison qui dépend des similitudes syntaxiques existant entre une source (« base domain ») et une cible (« target domain »). L'analogie est ainsi définie comme une mise en correspondance d'objets ayant des attributs (ou propriétés) et présentant des relations entre eux dans leur propre domaine (Sander, 2000). Si l'on prend l'exemple de l'analogie entre le modèle atomique de Rutherford et le système solaire, on peut représenter aisément les relations et attributs des objets composant l'analogie (figure 2). Les flèches pointent, par convention, vers les objets, en partant des relations ou des attributs considérés. Dans les représentations de Gentner, le domaine source est placé à gauche et le domaine cible est placé à droite.

[2] Pour une description précise de ces concepts, voir le chapitre 4.

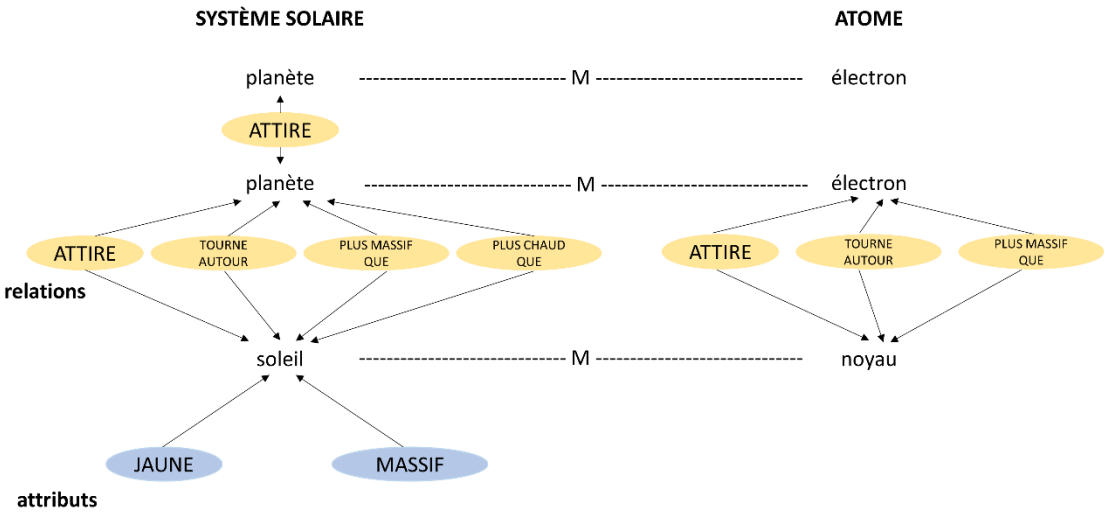


Figure 2. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie entre le modèle de Rutherford et le système solaire (d'après Gentner, 1983). M signifie « mapped ».

Dans sa typologie des modes de comparaison, Gentner décrit l'analogie comme une comparaison dans laquelle ce sont essentiellement les relations qui sont mises en correspondance entre la source et la cible, et pas (ou peu) les attributs des objets. A contrario, elle décrit la « similitude littérale » comme une situation dans laquelle les attributs d'objets, mais aussi les relations, sont mis en correspondance. Nous voyons d'emblée que, chez Gentner, la comparaison entre lettres de l'alphabet et les symboles chimiques (et les concepts représentés par ceux-ci) relève bien de l'analogie, en ce qu'elle se base principalement sur la mise en correspondance de relations entre objets simples (lettres, symboles chimiques) et objets complexes (mots, formules moléculaires) composés de ces objets simples. Cependant, les analogies selon Gentner ne sont pas des correspondances parfaites. Dans la figure 2, une contradiction est même observable : si les planètes s'attirent, les électrons, eux, se repoussent.

Dans un autre cadre théorique développé par Holyoak, des similitudes pragmatiques et sémantiques sont ajoutées au cadre de Gentner, basé uniquement sur les similitudes syntaxiques. En effet, pour décrire plus précisément l'analogie, il serait nécessaire de prendre en compte les buts, les ressources ou encore les contraintes des domaines source et cible. En guise d'illustration, Holyoak propose de représenter l'analogie entre le problème d'une tumeur à détruire et le problème d'une forteresse à capturer selon des aspects pragmatiques (figure 3). Dans les tableaux de Holyoak, le domaine source est présenté dans la colonne de droite, alors que le domaine cible est présenté dans la colonne centrale.

Schéma de problème	Problème de la tumeur	Problème de la forteresse
Buts	Utiliser des rayons pour détruire une tumeur	Utiliser une armée pour capturer une forteresse
Ressources	Puissance des rayons suffisante	Importance de l'armée suffisante
Contraintes	Ne pas administrer une forte intensité des rayons à partir d'une seule source	Ne pas envoyer une troupe importante par une seule route
Solution	Administrer des rayons de faible intensité provenant simultanément de plusieurs directions	Envoyer des petits groupes de soldats simultanément par plusieurs routes
Résultat	La tumeur est détruite par les rayons	La forteresse est capturée par l'armée

Figure 3. Analyse, selon le cadre de Holyoak, de l'analogie entre le problème de la tumeur à détruire et celui de la forteresse à capturer (d'après Gick et Holyoak, 1980).

Ce sont bien les similitudes de buts et de contraintes qui sont mises en correspondance dans cette analogie, et non des relations ou des attributs. Cependant, dans le cadre de Holyoak, les similitudes syntaxiques sont tacites : les relations entre objets ainsi qu'entre attributs sont les éléments supportant les similitudes sémantiques et pragmatiques. Par exemple, c'est la relation commune (« capable de détruire ») entre rayon et tumeur d'une part, et entre armée et forteresse d'autre part, qui permet la construction de la similitude de buts.

Ensuite, Sander (2000) propose de considérer l'analogie comme une catégorisation à part entière. Réaliser une analogie consisterait donc à trouver des correspondances entre une source et une cible, et à créer ainsi une nouvelle catégorie ou à élargir une catégorie existante. Par exemple, durant l'enfance et l'adolescence, le concept de mère évolue par analogies successives d'une catégorie très étroite (la mère qui nourrit, qui soigne l'enfant) à une catégorie plus large intégrant les mères chez les animaux et les mères métaphoriques (« mère patrie »).

Ces trois cadres théoriques sont complémentaires en ce qu'ils précisent le type de comparaisons pouvant être définies comme des analogies, selon l'angle de vue adopté. Il faut en outre mentionner l'existence des analogies naïves ou spontanées (proches des préconceptions), construites par les élèves sans avoir été suscitées par le professeur. Ces analogies naïves se réalisent d'autant plus facilement dans l'esprit des élèves que le domaine source est proche du domaine cible, permettant ainsi une extension du domaine de validité (Hofstadter et Sander, 2013).

6.2.2. Usage des analogies en sciences

Les analogies sont utilisées massivement par les chercheurs en sciences, mais également par les enseignants de sciences. Les exemples sont particulièrement nombreux en physique : analogie entre loi de Coulomb et loi de la gravitation de Newton, entre le courant électrique et un débit d'eau, entre la Terre et un aimant, etc. (Podolefsky et Finkelstein, 2006). On trouve également trace d'usages d'analogie en chimie pour décrire les modèles atomiques (« plum pudding », système solaire) ou pour aborder le concept d'élément chimique (Khanfour-Armalé et Le Maréchal, 2008). Les principaux rôles des usages des analogies dans l'enseignement sont de deux types : proposer une terminologie pratique qui permette une communication aisée du concept (ou de la catégorie), et rendre possible des inférences à partir de la mise en correspondance de deux domaines.

6.3. CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE SOURCE

6.3.1. Unités et combinaisons

La langue française, et plus particulièrement sa structure et son écriture graphique, constitue le plus souvent le domaine source de l'analogie de l'alphabet. Pour entamer ce point particulier de notre étude, il est utile de décrire brièvement certaines notions de phonologie en complément des concepts de linguistique structurale exposés dans le chapitre 4. D'un point de vue phonologique, une langue ordinaire est constituée d'unités distinctives appelées phonèmes, qui, assemblées, forment les unités significatives minimales appelées morphèmes. Les morphèmes sont les éléments constitutifs des mots ou lexèmes[3]. Ainsi, le mot « pain » est formé phonologiquement d'un seul morphème, constitué lui-même des deux phonèmes /p/ et /ɛ̃/[4]. Ces éléments de langue peuvent être reproduits à l'écrit sous la forme de graphèmes, unités graphiques représentant les unités distinctives orales que sont les phonèmes[5] (Lazard, 2006).

L'alphabet latin, quant à lui, est un ensemble de symboles[6] destinés à représenter graphiquement les phonèmes d'une langue, donc à reproduire des sons. Chacun de ces symboles est appelé lettre. Les graphèmes peuvent être simples ou complexes selon le nombre de lettres qu'ils contiennent. Dans l'exemple évoqué, <pain> est un lexème

[3] Le concept de « mot » est très vaste en linguistique. Le mot peut être graphique (suite de lettres entre deux blancs), phonétique (suite de sons entre deux pauses), sémantique (porteur d'une unité de sens) ou lexical (entrée du dictionnaire), etc. Ce dernier type de mot est aussi appelé « lexème ». Si le mot reste, dans le langage courant, l'unité de base de la langue, c'est le morphème qui est considéré en linguistique comme la plus petite unité significative (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).
[4] Les phonèmes sont représentés conventionnellement entre barres obliques /x/.
[5] Les graphèmes (comme les lexèmes) sont représentés conventionnellement entre crochets <x>.
[6] Pour la distinction entre signe, symbole, icône, indice et signe linguistique, voir chapitre 4.

constitué d'un graphème simple (<p> pour le phonème /p/) et d'un graphème complexe (<ain> pour le phonème /ɛ̃/).

Il est à noter que l'ensemble des vingt-six lettres de l'alphabet n'épuisent pas l'ensemble des phonèmes (au nombre de trente-quatre) exprimés en français moderne. Une combinaison de lettres est parfois nécessaire pour rendre compte de certains phonèmes. C'est le cas avec le phonème /ɛ̃/ qui peut être écrit selon 40 graphèmes différents (de <ain> à <hein> en passant par <ingt>). Le rôle principal des lettres de tout alphabet est donc de reproduire à l'écrit des éléments linguistiques de nature phonologique.

6.3.2. Origine des lettres de l'alphabet latin

À l'origine, les lettres de l'alphabet français étaient des pictogrammes, des icônes faisant référence plus ou moins explicitement à des objets concrets. L'histoire de la lettre « A » illustre bien le passage du pictogramme à l'idéogramme. La première représentation de cette lettre fut celle d'un bovin, car le taureau se nomme *aleph* en phénicien. Le phonème /a/ était donc représenté par un référent concret (le taureau, plus précisément sa tête) parce que son signifiant (*a-leph*) débutait par ce phonème. La représentation subit ensuite des changements d'inclinaison : cornes pointées vers le ciel, puis sur le côté, et enfin vers la terre, pour aboutir au « A » d'aujourd'hui (figure 4). Bien entendu, plus rien, à notre époque, ne relie le « A » au taureau des Phéniciens. Mais ce fut une étape nécessaire : en perdant son contenu sémantique, il était « prêt à devenir ce A tout court, un A sans signification ni mystère qui ne pourra produire de sens que lié à des séries d'autres signes à l'intérieur des mots » (Zali, 1997). Vidée de ses représentations, la lettre de l'alphabet latin est disponible pour générer une multitude de significations sans jamais interférer par elle-même.

Figure 4. Évolution des graphies de la lettre « A » (seules quelques graphies jugées pertinentes sont représentées par les auteurs) (Cartier, 2012).

6.3.3. À propos des combinaisons des lettres de l'alphabet

La combinaison de lettres pour former un mot repose sur des règles d'usage. Ainsi, toutes les combinaisons de lettres ne sont pas rencontrées : un mot comme <tma> ne figure dans aucun dictionnaire francophone. En linguistique, c'est, entre autres facteurs, la dimension phonologique qui régule la sélection des mots. Un mot ne prend sa place dans le vocabulaire d'une langue que s'il est énonçable dans celle-ci. La combinaison

des phonèmes doit être suffisamment fluide et harmonieuse que pour permettre une intégration aisée dans le concert des autres mots.

Ensuite, parmi les combinaisons possibles en langue ordinaire, il apparaît que les graphèmes répondent à un ordre précis, à des contraintes d'écriture. En langue ordinaire, il n'est par exemple pas permis d'écrire le graphème <lampe> sous une forme comme <lamp> ou <lamps> (et encore moins <pelam>, qui constituerait une autre combinaison de phonèmes). L'ordre des graphèmes doit avant tout reproduire l'ordre d'énonciation des phonèmes. Cette contrainte vérifiée, la sélection des lettres dans la structuration d'un « mot » (l'usage du <m> avant le <p>, comme dans <lampe>, par exemple) dépend de règles conventionnelles aux origines diverses : racines étymologiques, règles orthographiques classiques ou modernes, évolution naturelle de la langue, intégration dans un champ lexical, etc. À la dimension phonologique s'ajoutent donc des dimensions étymologiques, graphiques, morphologiques, syntaxiques, sémantiques et lexicales (Siouffi et Van Raemdonck, 2012).

Enfin, dans un mot, les lettres de l'alphabet n'ont pas d'effet sur le contenu sémantique. En effet, on l'a dit, les lettres de l'alphabet sont (aujourd'hui) purement abstraites, elles ne véhiculent plus aucune signification. De ce fait, les caractéristiques phonologiques de la lettre influent sur l'image acoustique, mais pas sur le contenu sémantique. La lettre « a » peut ainsi générer des images acoustiques différentes selon les partenaires qu'on lui affecte à l'écrit (<ain>, <au>, <â >, <aul>, <ha>, etc.), sans générer de signification supplémentaire par elle-même.

6.4. CARACTÉRISTIQUES DU DOMAINE CIBLE

6.4.1. Unités et combinaisons

La chimie, et plus particulièrement la structure de la matière qu'elle propose et son écriture symbolique graphique, constitue le plus souvent le domaine cible de l'analogie de l'alphabet. La matière est organisée, au niveau macroscopique, en unités significatives appelées « substances » ou « corps purs » (par exemple, le chlorure de sodium), lesquelles contiennent des occurrences isolables appelées « éléments chimiques »[7] (par exemple, l'élément « chlore »). Au niveau microscopique, les molécules[8] composant les corps purs sont constituées d'atomes. Les éléments

[7] Le concept d'élément, en chimie, ne renvoie pas d'ordinaire à une réalité macroscopique, mais constitue une catégorie virtuelle regroupant des espèces semblables (c'est-à-dire présentant un même nombre atomique Z). Dans le cas qui nous occupe, nous considérons l'élément selon la définition énoncée par Mendeleiev : « Le terme "élément" caractérise les particules matérielles qui forment les corps simples et composés (…). Le mot "élément" appelle l'idée d'atome » (Mendeleiev, 1871, p. 693).
[8] Les molécules sont ici considérées comme un ensemble d'atomes liés, quel que soit le type de liaisons (Pirson *et al.*, 2015). Cette définition permet de décrire KOH, KI ou NaCl comme des molécules (voir figure 1), ainsi que le programme de l'enseignement secondaire en FWB le permet (voir chapitre 1).

chimiques et les atomes nécessitent une symbolisation graphique pour transmettre l'information à l'écrit. Ce sont les symboles chimiques imaginés par Berzelius, complétés, au fil de la découverte de nouveaux éléments, par d'autres symboles forgés par ses successeurs jusqu'à aujourd'hui.

6.4.2. Origine des symboles chimiques

On l'a vu, la création des symboles chimique suit l'impératif de « faire court », de ramasser en un petit nombre de signes un maximum d'informations intelligibles par une communauté ciblée : les chimistes initiés. Les symboles doivent représenter les substances au mieux, tout en occupant l'espace le plus restreint possible sur une feuille de papier. Les symboles chimiques permettent ainsi de reconstruire sur le papier la structure fine de la matière. Berzelius (1813-1814) a construit son système symbolique selon des règles clairement établies (voir chapitre 5), même si de nombreux écarts existent (les symboles « Na », « K », « Zn » ou « W » ne suivent pas les règles originelles). Mais les symboles chimiques proviennent tous de l'abréviation de termes (essentiellement issus du latin) selon des règles syntaxiques arbitraires.

6.4.3. À propos des combinaisons d'atomes, de symboles

En chimie, c'est dans les propriétés intimes des atomes qu'il faut chercher les paramètres favorisant une combinaison (une molécule) plutôt qu'une autre. Tous les atomes, à l'exception des atomes de la famille des gaz rares, visent à la stabilisation énergétique via la formation d'un assemblage. La valence ou potentiel de liaison est l'un des paramètres associés à la formation des combinaisons. Par exemple, on déduit la tétravalence du carbone de l'impossibilité de la formation d'un assemblage comme « CH_5 » et de l'existence, a contrario, de la molécule « CH_4 », le méthane. En chimie, les combinaisons d'atomes permises répondent à des impératifs énergétiques, dont la valence est un des outils de prédiction pour les élèves.

Par ailleurs, au-delà des impératifs énergétiques qui régulent l'arrangement entre atomes de soufre, d'oxygène et d'hydrogène, la formule moléculaire de l'acide sulfurique doit s'écrire « H_2SO_4 » et non « SH_2O_4 ». Il est à noter que l'ordre d'écriture des symboles chimiques dans une formule moléculaire a subi de profondes modifications au fil des changements de convention accompagnant souvent les progrès techniques et théoriques (Dagognet, 1969). En chimie minérale, l'écriture actuelle se base généralement sur l'ordre croissant d'électronégativité. La formule chimique de l'acide sulfurique s'écrit ainsi H_2SO_4, car l'électronégativité de l'hydrogène (2,1) est inférieure à celle du soufre (2,5), elle-même inférieure à celle de l'oxygène (3,5). La même règle s'applique aux sels ou aux oxydes.

De nombreux autres cas viennent cependant bousculer la hiérarchie établie et démontrer la souplesse de l'écriture des chimistes : les hydroxydes (comme NaOH), les bases

aminées (comme NH_3) ainsi que la symbolique en chimie organique dans son ensemble (comme CH_4) ne suivent pas l'ordre d'électronégativité. Les chimistes ont décidé, dans ces cas précis, de mettre en avant un ou plusieurs atomes jugés particulièrement importants : l'azote dans la base aminée, le groupement hydroxyde dans les bases hydroxydées, le carbone dans les molécules organiques. Il arrive même, en chimie organique, que des informations de structure moléculaire soient véhiculées par la formule moléculaire. C'est le cas de la formule de l'acide acétique (CH_3COOH) qui reproduit, bien qu'imparfaitement, la connectivité des atomes dans la molécule. Les formules moléculaires, et plus spécifiquement l'ordre des symboles chimiques, sont par conséquent riches de significations portant non seulement sur la composition, mais également sur la structure et la réactivité. En chimie, il s'ensuit que les règles d'écriture (comment on écrit) sont pleinement au service de l'intention (ce que l'on veut communiquer).

Enfin, la signification d'un symbole chimique pris isolément (par exemple « C ») n'est pas identique à la signification de ce même symbole au sein d'une combinaison (par exemple « CO_2 »). Dans une réaction chimique, les éléments ne changent pas. Par contre, les atomes, supports matériels de l'élément, peuvent être considérablement modifiés par la déformation du nuage électronique menant à l'établissement de liaisons ioniques ou covalentes[9]. Or, la conservation du symbole dans une formule moléculaire ne véhicule que l'idée de conservation des éléments (Roundy, 1989). Ce fait facilite d'ailleurs la démarche de pondération des équations de réaction, les symboles se reconnaissant de part et d'autre de la flèche. Mais, dans les formules moléculaires, le processus de transformation au niveau atomique est, quant à lui, caché. Pour pouvoir visualiser les changements dus aux atomes partenaires, il faut se reporter aux représentations des liaisons chimiques dans lesquelles on peut retrouver des signes précisant les charges pleines (Ca^{2+}) ou partielles ($H^{\delta+}$) portées par les atomes. Bien entendu, les équations de dissociation ionique ou d'oxydoréduction peuvent contenir ce genre de signes, mais, au début de l'apprentissage de la chimie, il est plus fréquent de travailler avec des équations de réaction sans ions. Le renoncement aux signes précisant certains changements électroniques dans les formules moléculaires trouve sa cause principale dans un souci de garantir une expression graphique légère et fluide, mais qui perd de facto en précision. Chargés sémantiquement, les symboles chimiques utilisés au sein d'une combinaison voient donc une partie de leur contenu sémantique modifié par leurs partenaires.

[9] Pour rappel, c'est bien la conservation des atomes qui est enseignée en troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone, et non la conservation des éléments (voir chapitre 1).

6.5. FONCTIONNEMENT DE L'ANALOGIE DE L'ALPHABET

6.5.1. Analyse selon les cadres théoriques de l'analogie

L'analyse des différents énoncés de l'analogie de l'alphabet selon le cadre théorique de Gentner montre qu'au moins quatre versions distinctes de cette analogie coexistent dans la littérature, selon les objets, relations et attributs mis en correspondance[10].

(1) La première version consiste en l'analogie entre les phonèmes et les atomes. Nous l'appelons **analogie structurelle phonologique** car elle implique le recours à la structure de la langue orale. Cette analogie n'est principalement présente que dans les ouvrages ou les articles traitant spécifiquement de linguistique (par exemple, Walter, 1984 ; Siouffi et Van Raemdonck, 2012). D'ailleurs, dans ce cas précis, la chimie constitue la source et la structure orale de la langue joue le rôle de cible au sein de l'analogie. Les phonèmes assument ici le rôle d'« alphabet » de la langue orale, ils incarnent le pendant des lettres dans l'expression graphique de la langue. La représentation de cette analogie structurelle phonologique selon le cadre de Gentner (figure 5) met en évidence la préséance de la relation de composition (entre phonèmes et morphèmes ; entre atomes et molécules) et le peu d'attributs mis en correspondance. Cette forme de l'analogie de l'alphabet pèche par un manque de proximité entre le domaine cible et le domaine source, ce qui affaiblit son fonctionnement. De plus, le domaine source qu'est l'organisation de la matière vue par le chimiste n'est pas forcément familier pour un étudiant en lettres. On notera que, dans de rares cas, c'est l'élément chimique qui est mis en correspondance avec le phonème.

[10] Nous avons modifié le sens de certaines flèches par rapport au cadre théorique de Gentner. Le sens des flèches reliant les relations aux objets a été inversé, afin de rendre compte plus clairement de la relation entretenue. Ainsi, dans la figure 5, une flèche part de l'objet « molécule » vers la relation « composé de », alors qu'une autre flèche part de la relation « composé de » pour aboutir à l'objet « atome ». Le sens des flèches indique donc que « la molécule est composée d'atomes ». Par contre, le sens des flèches reliant attributs et objets a été conservé par rapport au cadre théorique de Gentner.

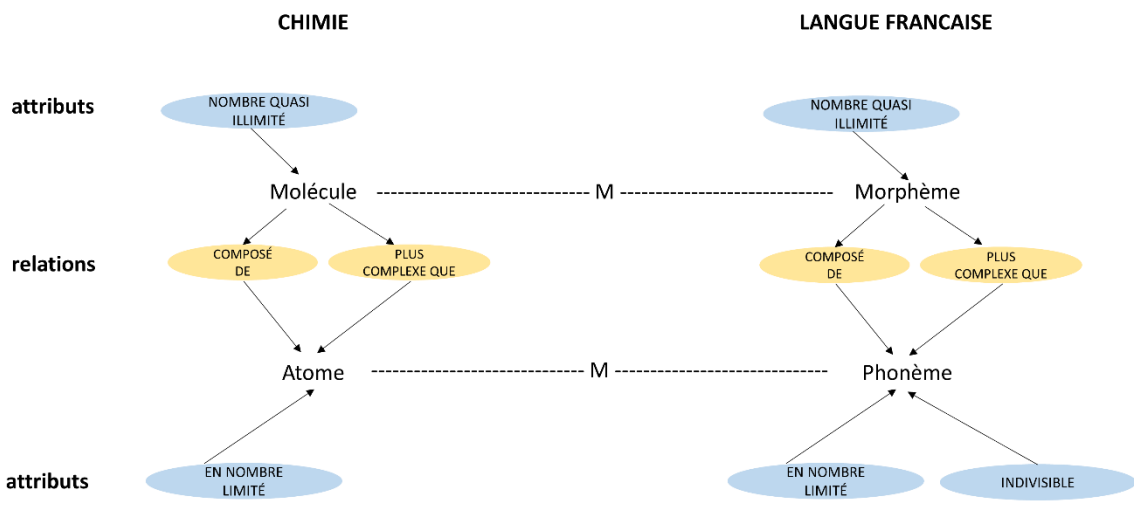


Figure 5. Analyse selon Gentner de l'analogie structurelle phonologique, mettant en correspondance les atomes et les phonèmes.

(2) La deuxième version est l'analogie entre les lettres de l'alphabet et les éléments chimiques. Nous l'appelons **analogie structurelle macroscopique** car elle implique, au niveau des combinaisons, une mise en correspondance entre les corps purs composés et les mots. Cette analogie est surtout présente dans les livres de référence universitaires (Hill *et al.*, 2008 ; Tro, 2015). On trouve, en figure 6, la représentation de cette version de l'analogie de l'alphabet selon le cadre de Gentner. La mise en correspondance d'un système graphique avec la structure de la matière affaiblit la portée de l'analogie en éloignant le domaine cible du domaine source.

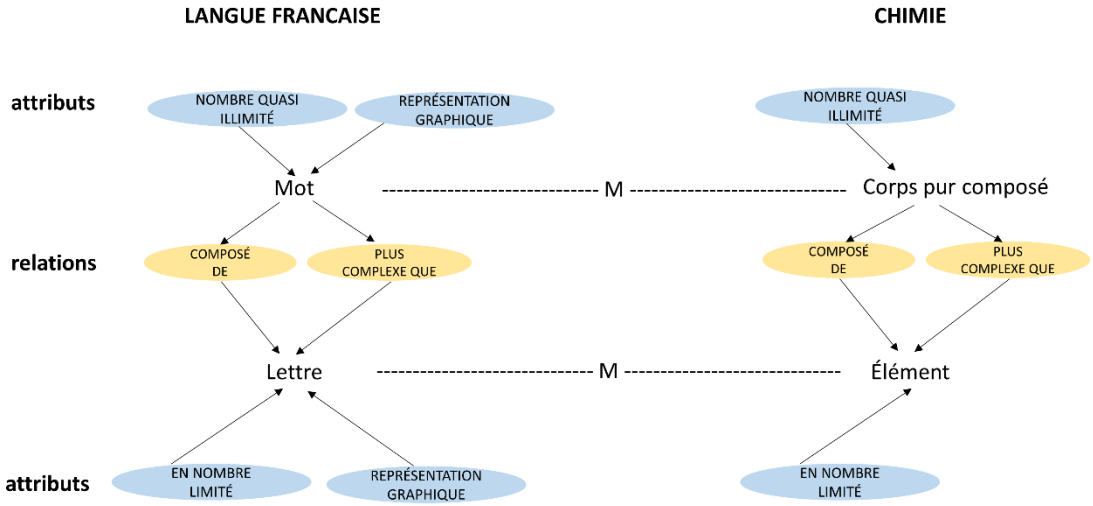


Figure 6. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle macroscopique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les éléments.

(3) La troisième version est l'analogie entre les lettres de l'alphabet et les atomes. Nous l'appelons **analogie structurelle microscopique** car elle implique, au niveau des combinaisons, une mise en correspondance entre les molécules et les mots. On

retrouve cette version de l'analogie principalement dans les manuels scolaires (Matthys *et al.*, 2011 ; Pirson *et al.*, 2015). En observant la figure 7, on remarque que les propriétés de cette version de l'analogie de l'alphabet sont comparables à celles de l'analogie structurelle macroscopique développées plus haut.

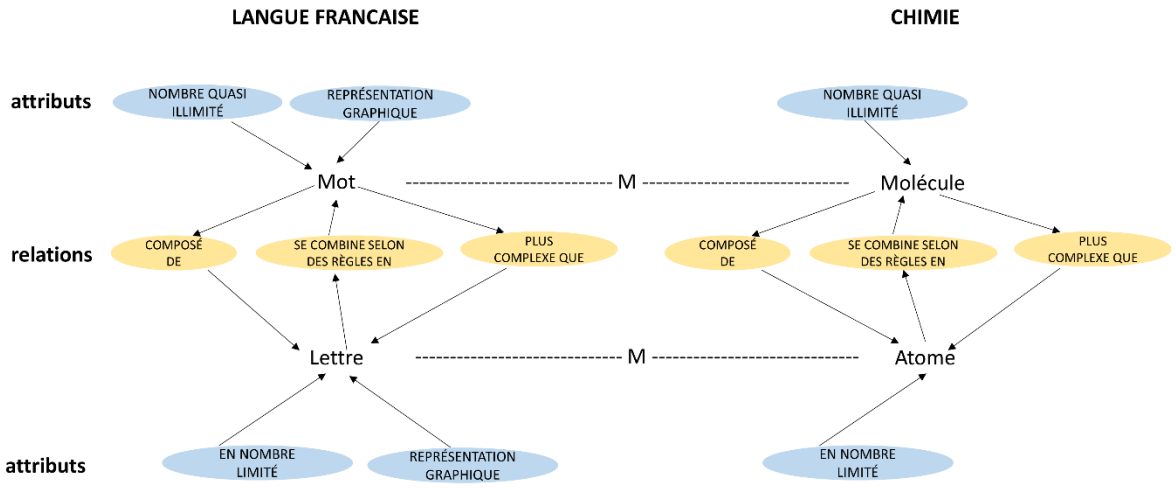


Figure 7. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle microscopique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les atomes.

Cependant, les manuels scolaires consultés développent une nouvelle relation au sein de cette analogie : une relation de combinaison, qui implique l'usage de règles et ayant pour conséquence d'interdire certaines combinaisons (mots, molécules) et certains arrangements dans l'espace (de lettres, d'atomes). Cette relation supplémentaire renforce la proximité entre domaine cible et domaine source.

(4) La quatrième et dernière version de l'analogie compare les lettres de l'alphabet et les symboles chimiques. Nous l'appelons **analogie structurelle graphique**, car elle implique une mise en correspondance entre les écritures graphiques en langue française et en chimie (figure 8). Cette version de l'analogie de l'alphabet est présente tant dans les manuels scolaires (Pirson *et al.*, 2015) et les livres de référence universitaires (Wouters, 2014), que dans les articles de recherche en didactique de la chimie (Markow, 1988 ; Laszlo, 1993 ; Jacob, 2001 ; Nemeth, 2006 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012), dans lesquels elle constitue la version majoritaire.

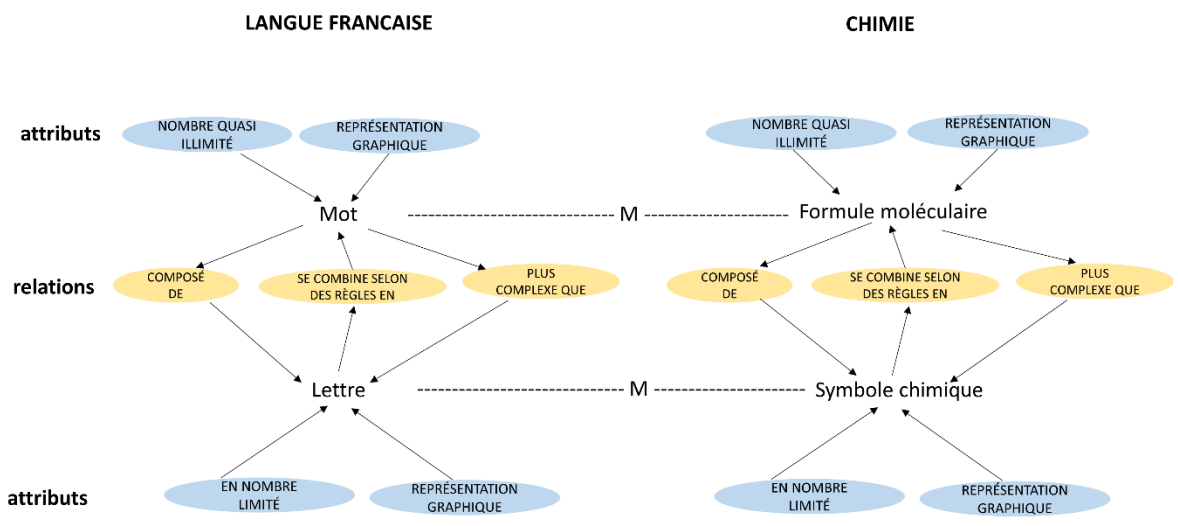


Figure 8. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle graphique, mettant en correspondance les lettres de l'alphabet et les symboles chimiques.

En plus des relations, ce sont les attributs des lettres et symboles chimiques qui renforcent la proximité entre les deux domaines dans cette version de l'analogie : ces représentations graphiques sont constituées des mêmes symboles de base, présents en nombre limité. Cette proximité forte entre attributs des objets et entre relations, conjuguée à la grande familiarité que les apprenants entretiennent avec l'écriture graphique de la langue française, rend cette analogie structurelle graphique propre à marquer durablement les élèves. L'analogie structurelle graphique a ceci de particulier qu'elle combine potentiellement les quatre versions de l'analogie de l'alphabet en une seule mise en correspondance, comme le montre la figure 9.

C'est, bien entendu, la charge sémantique du symbole chimique qui est en grande partie responsable d'un regroupement des analogies de l'alphabet en une seule. En effet, le symbole chimique « C », par exemple, véhicule à la fois les concepts d'atome de carbone (et ses caractéristiques principales, comme le nombre de protons) et d'élément carbone (en tant que catégorie virtuelle regroupant tous les atomes de même nombre atomique)[11]. Du côté linguistique de l'analogie, c'est la lettre de l'alphabet, en tant que représentante graphique des phonèmes, qui permet d'intégrer l'analogie structurelle phonologique dans le schéma général de l'analogie structurelle graphique.

[11] Les relations entre le symbole d'un élément et les désignations, concepts et objets ont été modélisées au chapitre 4.

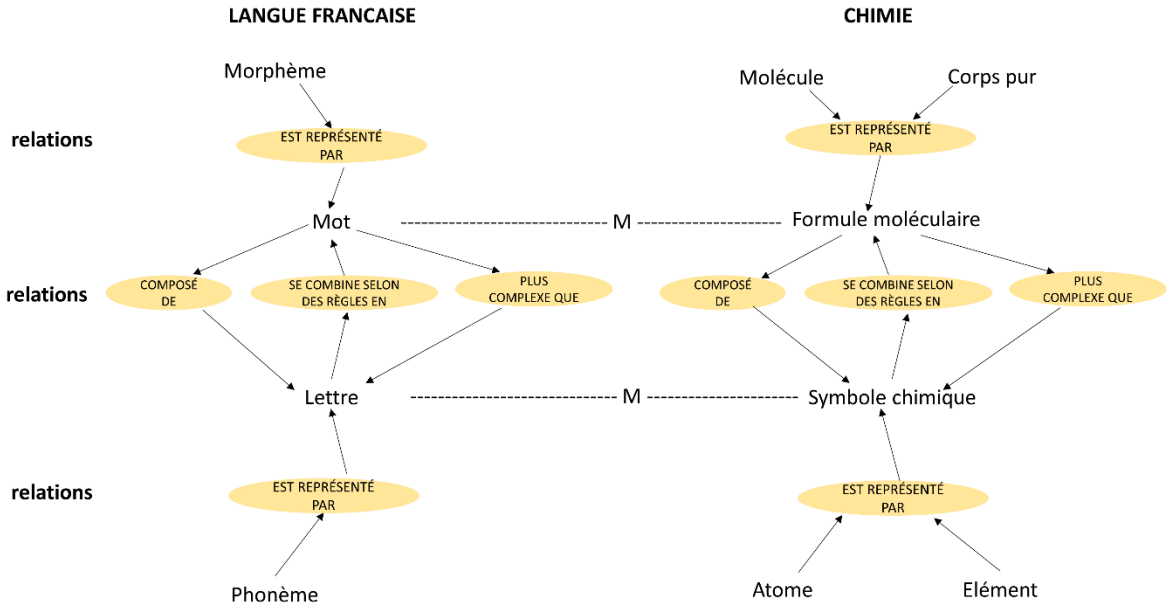


Figure 9. Analyse selon le cadre de Gentner de l'analogie structurelle graphique, et relations avec les autres versions de l'analogie (par souci de lisibilité, nous n'avons pas représenté les attributs).

En plus d'être la plus riche syntaxiquement, cette version de l'analogie de l'alphabet peut également être développée du point de vue pragmatique de Holyoak, comme le montre la figure 10.

Schéma de problème	Ecriture graphique du français	Ecriture graphique en chimie
Buts	Utiliser des symboles pour représenter des images acoustiques, de sons	Utiliser des symboles pour représenter des corps purs / des molécules
Ressources	Symboles en relation avec des unités distinctives (phonèmes)	Symboles en relation avec des unités distinctives (éléments / atomes)
Contraintes	Espace restreint Nombre de symboles limité	Espace restreint Nombre de symboles limité Insertion dans un texte en langue française
Solution	Utiliser des lettres combinées pour représenter les phonèmes, puis les morphèmes	Utiliser des symboles combinés pour représenter les éléments / atomes, puis les corps purs / molécules
Résultat	Le mot est constitué de lettres combinées	La formule moléculaire est constituée de symboles chimiques combinés

Figure 10. Analyse selon Holyoak du problème de l'écriture graphique de la langue française et de l'écriture graphique en chimie.

D'importantes similitudes pragmatiques (buts, ressources, contraintes) se dégagent entre les domaines cible et source, ce qui renforce encore la pertinence de cette version de l'analogie de l'alphabet, ainsi que sa capacité d'imprégnation.

6.5.2. Développements de l'analogie de l'alphabet

Ces similitudes constituent le point de départ de développements parfois étonnants de l'analogie de l'alphabet. Ainsi, dans *Tableaux et langages de la chimie* (1969), Dagognet rend compte en ces termes de la révolution linguistique enclenchée par Lavoisier : « Il ne s'agit donc plus simplement de ranger ou de convenir d'un nom, mais de décomposer ou de reconstruire à la fois les choses et les mots (le parallélisme physico-grammatical) » (p. 22). On le voit, la « langue de la nature » et la « langue des chimistes » doivent être décomposées et reconstruites en parallèle. Ce processus, proche, dans ses intentions, de la décomposition structurale de la langue opérée par les linguistes, amène à des nouvelles mises en correspondance.

Parmi les « primitifs » ou « indécomposables » sélectionnés par Lavoisier, se trouvent les « super-simples ». Cette catégorie, qui reprend entre autres l'oxygène, l'hydrogène et l'azote, comprend des éléments « semblables à des voyelles ». Si Dagognet n'en dit pas plus sur les relations entre les voyelles et les super-simples, on peut émettre l'hypothèse que c'est la fréquence à laquelle on observe ces éléments dans les corps composés qui est à l'origine d'une telle mise en correspondance. De plus, l'oxygène, l'azote et l'hydrogène constituent des éléments fixes, qui caractérisent des fonctions chimiques, et auxquels se lient d'autres éléments plus variés. Si l'on prend l'exemple des oxydes métalliques, l'oxygène serait l'équivalent de la voyelle, alors que le métal serait l'équivalent de la consonne.

Plus loin, pour décrire les formes allotropiques, Dagognet les compare à des « mots distincts, irréductibles, mais écrits avec un seul alphabet et constitués éventuellement des mêmes syllabes » (Dagognet, 1969, p. 148). Par exemple, le graphite et le diamant seraient ainsi comparables à des mots différents, pourtant composés d'une seule et unique lettre (ici, l'atome de carbone, ou le symbole chimique « C »). De manière évidente, le concept de « syllabe » est ici peu transposable au concept de forme allotropique. Pourtant, cette mise en correspondance, moins étayée du point de vue des relations et des attributs, est le signe d'une volonté d'exploiter au maximum l'analogie de l'alphabet, même si le résultat n'est pas toujours pertinent.

Ensuite, le problème de l'isomérie est l'occasion d'une nouvelle mise en correspondance entre homonymes en langue française et homonymes en chimie. La description de molécules très semblables avec un « alphabet à quatre lettres seulement (C, N, O, H) » (Dagognet, 1969, p.175) rencontre un obstacle majeur : des formules chimiques identiques (par exemple, C_4H_{10}) renvoient à des molécules différentes (par

exemple, le butane et le méthylpropane)[12]. Cette « homonymie chimique » est, de facto, fréquente en chimie organique (fructose/glucose, éthanol/diméthyléther, etc.).

Plus encore, à côté des « homonymes chimiques », on trouve également des « synonymes chimiques ». C'est le cas des composés qui sont représentés par plusieurs formules chimiques différentes[13]. Par exemple, l'acide acétique peut être représenté par « CH_3COOH » ou « $C_2H_4O_2$ ». Ces deux formules peuvent donc être caractérisées comme des « synonymes », dans le sens où elles renvoient à une seule et même substance. En chimie, chaque représentation différente d'une même substance, d'une même molécule, a en fait pour vocation de présenter une facette particulière de l'objet qu'elle représente. Si « $C_2H_4O_2$ » indique la composition atomique brute de l'acide acétique, « CH_3COOH » informe sur la trame structurale de la molécule d'acide acétique. Renvoyant strictement au même objet, ces formules chimiques véhiculent cependant des informations complémentaires sur cet objet. Il en résulte que les synonymes en chimie ne sont pas interchangeables ; leur usage est contraint par l'intention du locuteur. À une information sur la composition atomique, la structure moléculaire ou l'état de la matière correspond une représentation symbolique adaptée. Cette rhétorique par accumulation semble nécessaire aux chimistes pour « dire l'indicible » (Laszlo, 1993).

Enfin, Laszlo va encore plus loin dans l'analogie de l'alphabet en identifiant des paraphrases (alternance textes/représentations moléculaires), des métaphores (cubane), des métonymies (fluoroscéine), des troncations (THF), etc. De telles mises en correspondance sont autant de signes de la vigueur de l'analogie de l'alphabet (avec une fréquence plus importante pour sa version structurelle graphique), ainsi que de sa portée potentielle dans l'esprit des apprenants.

6.5.3. Points de divergence dans l'analogie structurelle graphique

L'analogie structurelle graphique présente cependant quelques points de divergence importants entre les deux domaines mis en correspondance.

6.5.3.1. Un système de l'écrit

Premièrement, si les deux systèmes symboliques ont une vocation à dominante graphique, les formules chimiques, elles, ne sont pas conçues pour être énoncées oralement. Même s'il peut arriver à un chimiste de dire [aʃ-dø-ɔ][14] pour exprimer la formule chimique de l'eau, ce n'est qu'un emprunt acoustique au français moderne.

[12] Cette limite de l'écriture symbolique est d'ailleurs à l'origine de l'émergence des représentations iconiques rendant compte de la connectivité des atomes dans l'espace (voir chapitre 5).
[13] Ou plusieurs noms différents. « HCl » peut ainsi être appelé « esprit de sel », « acide chlorhydrique » ou « chlorure d'hydrogène ».
[14] Écriture phonétique de H_2O.

Ceci démontre que, dans le cas du code symbolique chimique, l'oral est subordonné à l'écrit. La langue symbolique des chimistes, contrairement aux graphèmes des langues ordinaires, n'est pas faite pour rendre des sons, mais bien pour représenter des substances. Il est davantage question ici d'abréger que de reproduire. Cette distinction est essentielle pour expliquer le contenu sémantique des symboles des deux systèmes.

6.5.3.2. Un système en expansion

Deuxièmement, nous avons constaté que les lettres de l'alphabet ne pouvaient reproduire tous les phonèmes de la langue française ; il est nécessaire de combiner les lettres entre elles pour « traduire » certains phonèmes à l'écrit. Le Z ou le Y, par exemple, ont été introduits dans l'alphabet latin pour intégrer au vocabulaire des mots empruntés au grec et pour reproduire des phonèmes particuliers. Mais de tels apports sont rares aujourd'hui. En chimie, chaque élément est représenté par un seul et unique symbole chimique. D'ailleurs, il est régulièrement nécessaire d'ajouter de nouveaux symboles lors de la découverte de nouveaux éléments. C'est le cas, par exemple, des atomes artificiels récemment synthétisés et ajoutés à l'ensemble des symboles chimiques du tableau périodique de Mendeleïev : « Nh » (pour Nihonium), « Mc » (pour Moscovium), « Ts » (pour Tenessine) et « Og » (pour Oganesson). Donc, contrairement à l'alphabet latin, le système symbolique des chimistes se distingue par son expansion permanente.

6.5.3.3. Un système qui tend à l'univocité

Troisièmement, il est intéressant de noter que si les phonèmes possèdent plusieurs graphèmes, il n'en est rien pour les éléments chimiques. En effet, l'azote est partout symbolisé par la lettre « N » dans les langues utilisant l'alphabet latin, même si le terme scientifique qui lui est associé peut varier fortement (« nitrogen » en anglais, « stickstoff » en allemand, etc.). Tous les autres symboles concurrents (comme « Az ») ont été éliminés au cours du développement du langage de la chimie moderne. Cette relation exclusive entre symboles et éléments chimiques est essentielle en ce qu'elle exige une rigueur d'utilisation ainsi qu'une compréhension profonde du lien entre l'organisation de la matière et son pendant graphique[15].

6.5.3.4. Un système connecté aux termes de la nomenclature

Quatrièmement, contrairement aux lettres de l'alphabet qui ne véhiculent, pour jouer efficacement leur rôle, aucune signification en elles-mêmes (en-dehors de leur rôle de représentation graphique du phonème), les symboles chimiques sont, par essence, connectés aux termes de la nomenclature chimique. Cette relation abréviation/abrégé

[15] Bien entendu, on trouve des symboles différents dans des langues n'utilisant pas l'alphabet latin : c'est le cas par exemple des symboles chinois, japonais, coréens et de certains symboles russes.

constitue une grande part du contenu sémantique des symboles chimiques, sans pour autant le remplir. En effet, les symboles chimiques sont reliés tant aux désignations de nature linguistique qu'aux concepts, dont ils sont le graphème véhiculaire ou « idéogramme »[16]. Le lien entre symboles chimiques et objets réels s'avère plus distendu, moins direct, mais l'entremise d'intermédiaires puissants (désignation linguistique, concept chimique) permet malgré tout de passer de l'un à l'autre. L'analogie entre symboles chimiques et lettres de l'alphabet s'en trouve à tout le moins bousculée : il devient tout à coup moins pertinent de placer sur un pied d'égalité un système constitué de symboles (volontairement) neutres sans concepts attachés et un système de symboles (volontairement) chargés de sens, connectés à des concepts et à des objets réels.

6.5.3.5. Un système prédictif

Cinquièmement, la langue symbolique des chimistes présente une importante dimension prédictive. Un des avantages déterminants de la nouvelle méthode de nomenclature de Lavoisier fut la prédiction théorique de composés inconnus à l'époque[17]. La nomenclature systématique (en –ite, en –ate, etc.) permettait en effet de combiner théoriquement les composés les uns avec les autres d'un simple point de vue langagier (Lavoisier, 1789). De plus, l'équation de réaction permet également de déterminer à l'avance des quantités de produits formés en vertu de la loi de conservation de la masse. Enfin, certains principes constitutifs de la chimie organique, comme le principe de substitution, ont été énoncé à partir du seul langage symbolique de Berzelius. La langue symbolique chimique est donc avant tout un « outil de papier » (Klein, 2001) à visées descriptive et prédictive. Néanmoins, cette dernière dimension est, par nature, limitée. Est-on certain qu'une réaction chimique prévue « sur papier » soit possible expérimentalement[18] ? Comment prévoir la formation d'un composé dont la langue symbolique des chimistes est incapable de rendre compte ? Ces limites sont à prendre en compte dans l'enseignement de la chimie.

6.6. DISCUSSION

6.6.1. Liens avec les difficultés des apprenants

L'analyse de l'analogie de l'alphabet selon les cadres théoriques de Gentner et de Holyoak a révélé l'existence de quatre versions différentes de l'analogie de l'alphabet.

[16] Dans son traité de terminologie, Depecker (2003) considère les symboles chimiques comme des désignations de nature symbolique. Le symbole « Al » peut donc être lu comme une des désignations possibles associées au concept d'« aluminium ».
[17] Pour une information complémentaire sur ce sujet, voir le chapitre 5.
[18] Par exemple, « le chlorure de sodium et le nitrite d'hydrogène réagissent pour former le nitrite de sodium et le chlorure d'hydrogène » est l'énoncé d'une réaction chimique impossible en vertu de la loi de Berthollet.

Il apparaît que selon l'objet chimique mis en correspondance, le discours de l'enseignant se trouve positionné dans l'un ou l'autre des niveaux de savoir selon Johnstone (1982) : symbolique, microscopique ou macroscopique. Or, un jeune apprenant éprouve précisément des difficultés à se situer et à circuler entre les niveaux de savoir (Gabel, 1999 ; Chittleborough et Treagust, 2007 ; Talanquer, 2011 ; Taber, 2013). Cette difficulté se voit renforcée par l'utilisation d'un symbole chimique qui est, par essence, connecté aux deux autres niveaux (Dehon et Snauwaert, 2015a). Il est dès lors essentiel que l'enseignant prenne conscience de la nécessité de nommer explicitement le niveau auquel se situe la version de l'analogie qu'il a choisi de formuler.

6.6.1.1. Lien avec la boucle symbolique

En outre, pour éviter ce problème, certains professeurs pourraient opter pour une solution de facilité : vider la lettre de l'alphabet de sa dimension phonologique et évacuer le contenu sémantique des symboles chimiques. Il serait alors possible de réaliser une analogie basée uniquement sur la mise en correspondance des symboles chimiques et des lettres de l'alphabet. Cette version de l'analogie de l'alphabet (analogie structurelle graphique) est la plus susceptible de fonctionner dans l'esprit des élèves grâce aux similitudes syntaxiques et pragmatiques mises en évidence. Or, vider le symbole chimique de son contenu chimique (tant macroscopique que microscopique) le transforme en un signe indépendant au sein d'un système tournant en vase clos. Nombreux sont alors les jeunes apprenants pris dans la « boucle symbolique » que nous avons décrite précédemment, dans laquelle un symbole chimique (« C ») est l'écriture simplifiée du terme qui lui est associé (« carbone »). Pour ceux-là, la connexion avec les concepts d'élément ou d'atome est rompue (Dehon et Snauwaert, 2015a). L'écriture symbolique devient alors une écriture pour elle-même, sans autre signification que le respect des règles syntaxiques ou morphologiques qui la gouvernent. Pire, il arrive que certains élèves n'associent même plus le symbole au terme[19]. Dans ce cas, le symbole chimique redevient la lettre de l'alphabet latin qu'il était à l'origine ; cette lettre vide de sens ne sert alors qu'à un éventuel dénombrement, utile dans un exercice de pondération d'équation de réaction, mais incapable d'éclairer sur les concepts chimiques qui la sous-tendent. Réduire le rôle d'un symbole chimique à celui d'une lettre de l'alphabet conduit donc à rompre la circulation entre les niveaux de savoir (ou les niveaux de conceptualisation) et, ainsi, à couper les élèves des véritables objectifs poursuivis dans le cadre du cours de chimie.

[19] Dans le chapitre 7, nous montrons qu'un certain nombre d'élèves assurent que, dans l'expression « 4Na », le coefficient stœchiométrique représente le « nombre de Na ». Une telle représentation rend compte de l'utilisation du symbole pour lui-même, déconnecté du terme « sodium » (Dehon et Snauwaert, 2015a). Ce phénomène est d'autant plus fréquent quand le symbole ne renvoie pas directement au terme en langue française (W, K, Sn, etc.) (Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012).

6.6.1.2. Lien avec l'interprétation additive

Le rapprochement des deux systèmes de signes comporte d'autres implications didactiques, telle que la projection des propriétés de l'un sur celles de l'autre. La plus importante de ces projections potentielles concerne la juxtaposition des lettres formant les mots. En effet, la visualisation d'une simple juxtaposition graphique des symboles atomiques vient concurrencer les modèles décrivant ce qu'il se passe durant une réaction chimique. L'équation de combustion du carbone en dioxyde de carbone ($C + O_2 \longrightarrow CO_2$) est un bon exemple d'application de la juxtaposition des symboles (et donc, pour un jeune apprenant, des atomes). Le carbone et le dioxygène semblent s'assembler en gaz carbonique sans modification de leur structure initiale. Il s'ensuit un phénomène déjà rencontré auprès d'élèves de 14-15 ans : l'apparente juxtaposition des symboles dans une équation de réaction cache complètement la rupture et la formation de liaisons chimiques, jusqu'à modifier le concept de réaction chimique lui-même (Dehon et Snauwaert, 2014). Dans ce cas, le corps pur composé se voit constitué de corps purs simples qui ont conservé leur intégrité, et qui sont donc potentiellement libérables par décomposition.

À ce problème s'ajoute l'impression de conservation des réactifs induite par l'usage d'un même symbole de part et d'autre de la flèche. Dans l'équation de combustion du carbone ($C + O_2 \longrightarrow CO_2$), le symbole « C » est identique chez les réactifs et chez les produits. Or, cette apparente conservation de la lettre, sans aucune modification, en cache pourtant d'importantes. D'une part, la substance représentée par le symbole « C » chez les réactifs (par exemple, du charbon) a été entièrement transformée en autre chose (ici, du dioxyde de carbone). Le « C » dans « CO_2 » ne représente donc plus la substance initiale, mais bien ce qui a été conservé durant la transformation, en l'occurrence l'élément carbone. D'autre part, au niveau microscopique, l'atome de carbone présent dans la substance initiale est, dans le gaz carbonique, lié à deux atomes d'oxygène qui modifient considérablement son nuage électronique. Cette modification de l'environnement chimique du carbone est inhérente à la réaction chimique qui a eu lieu. Si l'apprenant, à cause de la persistance de la lettre, ne se rend pas compte du changement opéré, il est probable que l'interprétation additive se verra renforcée.

6.6.1.3. Lien avec les règles d'écriture symbolique

En 2012, Mzoughi-Kadraoui et Dumon ont montré que de nombreux élèves (28 sur 130) éprouvaient des difficultés à utiliser des majuscules et les minuscules dans l'écriture de formules chimiques. Les chercheurs montraient ainsi que le chlorure de zinc pouvait être symbolisé (incorrectement) par « ZNCL », « zncl », « Zncl », etc. Il s'agit probablement de la projection d'une caractéristique de la langue française sur la langue symbolique chimique. Ces élèves appliquent la règle d'une majuscule en début de mot si le mot est au début de la phrase (« Zncl ») ou la règle d'usage de minuscules pour un

mot à l'intérieur d'une phrase (« zncl »). Les conventions spécifiques à la chimie sont ainsi oubliées au profit de celles en usage dans la langue française. Le transfert de propriétés du système alphabétique au système chimique peut donc constituer un distracteur supplémentaire pour les élèves, susceptible d'engendrer chez eux des conceptions chimiques erronées.

De telles implications potentielles ne nous permettent cependant pas de condamner complètement cette version de l'analogie de l'alphabet. En effet, réaliser une analogie entre l'écriture de la langue française et l'écriture symbolique en chimie permet de faire rentrer pleinement le code symbolique des chimistes dans la catégorie des langues. Cette catégorisation modifie la perception que peuvent avoir les élèves de l'apprentissage de la chimie : en plus d'assimiler des concepts, il est nécessaire de maîtriser une langue à part entière. L'analogie structurelle graphique permet de montrer, de manière explicite et implicite (via des analogies naïves), les relations de composition et de combinaison dans l'écriture des formules moléculaires et des mots. Asseoir la compréhension de la chimie sur base de cette analogie peut alléger le travail d'abstraction et de traitement que les élèves doivent fournir quand ils abordent le code symbolique et les concepts chimiques.

6.6.2. Proposition d'une analogie par comparaison de situations

Vue sous ces angles nouveaux, l'analogie de l'alphabet semble poser plus de problèmes potentiels qu'elle ne fournit de retombées positives dans un cadre didactique. Cependant, il est possible de se servir de la version structurelle graphique de l'analogie de l'alphabet pour aborder les caractéristiques originales qui rendent la langue symbolique des chimistes différente d'une langue ordinaire. Nous proposons en effet d'exploiter cette analogie en tant que mise en situation d'apprentissage propre à générer des questions à visée diagnostique, dont nous citerons quatre exemples. L'analogie structurelle graphique sert alors de point de départ dans une démarche d'analogie par comparaison de situations, qui permet de limiter les effets induits négatifs d'une généralisation abusive de relations ou d'attributs du domaine source au domaine cible (Gentner *et al.*, 2003).

Question numéro 1 : « Qu'est-ce qui différencie la lettre "C" du symbole chimique "C" ? » Cette question peut être introduite après l'étude des symboles et des modèles atomiques. Elle servira alors d'outil diagnostique susceptible de réguler l'apprentissage des élèves avant d'aborder d'autres notions comme les formules moléculaires. En effet, le professeur pourra identifier les conceptions, correctes ou erronées, que les élèves ont associées aux symboles chimiques. Le fait de comparer le symbole chimique à une lettre alphabétique permet de révéler la représentation que se font les apprenants de ce que signifie une lettre de l'alphabet, et donc de sonder la distinction qu'ils opèrent, parfois inconsciemment, entre les deux symboles identiques en apparence. Une fois les

représentations des élèves collectées, le professeur pourra réactiver et, surtout, structurer le contenu sémantique d'un symbole chimique : celui-ci est lié à un terme, mais aussi à un type d'atome, à un type de substance et à un type d'élément. Les relations entre symbole, terme, atome et élément peuvent alors être définies en insistant sur les niveaux microscopique et macroscopique.

Question numéro 2 : « Le nombre de symboles atomiques est-il fixé définitivement comme semble l'être le nombre de lettres de l'alphabet ? » Cette question peut également s'intercaler entre l'évolution des modèles atomiques et l'établissement des formules moléculaires. Elle permet de s'interroger sur les limites d'un modèle scientifique. Le professeur pourra se baser sur la représentation d'un alphabet fixe (ou très peu modifiable à l'heure d'aujourd'hui[20]) pour bâtir la représentation d'une chimie utilisant des modèles (et donc des écritures) par nature temporaires et modifiables. L'exemple récent d'atomes artificiels dont les symboles ont été introduits dans le tableau périodique permet de soutenir durablement dans l'esprit des élèves un des fondements de la chimie : la constante recherche de composés nouveaux aux propriétés originales.

Question numéro 3 : « Pourquoi certaines combinaisons de lettres (comme <pfmb> en français) ou de symboles chimiques (« NaNe » par exemple) n'existent-elles pas ? » Cette question constitue une mise en situation intéressante avant d'aborder la notion de valence. Dans un premier temps, le professeur peut s'appuyer sur l'analogie avec la langue pour distinguer les deux systèmes de signes : une combinaison comme <pfmb> n'a pas été sélectionnée par l'usage en langue française, car elle ne s'énonce pas aisément en tenant compte des principaux phonèmes disponibles. Cette raison de nature phonologique ne s'applique pas à la chimie. Il faut donc, dans un deuxième temps, se pencher sur ce qui fait la spécificité des combinaisons d'atomes en molécules. La comparaison de plusieurs assemblages stables permet de faire émerger un nombre de liaisons possibles, propre aux atomes les plus fréquents.

Question numéro 4 : « Pourquoi certains ordres de lettres ou de symboles sont-ils sélectionnés graphiquement tant en langue française (on écrit <château> plutôt que <chato>) qu'en chimie (on écrit « HCl » plutôt que « ClH ») ? » De nouveau, si, dans la langue française, ce sont principalement des impératifs phonologiques[21] qui définissent les principes théoriques, la situation est tout autre en chimie. Le professeur peut insister sur les objectifs qui sous-tendent les conventions en chimie : ordre d'électronégativité, mise en évidence de groupements réactionnels et de fonctions

[20] Il n'est bien sûr pas question d'opposer l'idée d'un langage chimique en mouvement à celle d'une langue ordinaire figée : il est possible que l'alphabet latin évolue en fonction de nouveaux besoins phonologiques. Mais, on l'a dit, les modifications du système symbolique des chimistes sont plus fréquentes.

[21] De nombreuses contraintes orthographiques ou morphosyntaxiques jouent bien entendu un rôle important dans l'histoire de l'évolution de la langue.

systématiques, etc. Les élèves doivent comprendre que derrière chaque choix se cachent des intentions : quel message veut-on faire passer en priorité avec cette formule symbolique ? C'est la réponse à cette question qui guide l'ordre des symboles chimiques. Il est enfin essentiel que l'enseignant insiste sur le caractère universel des conventions chimiques : une formule symbolique doit être comprise partout et par tous.

Ces propositions didactiques ne sont que quelques exemples concrets qui n'épuisent pas les possibilités d'exploitation de l'analogie de l'alphabet, vue sous un angle différent : celui d'une « opposition constructive » permettant d'affiner ce qui distingue les deux systèmes de signes.

6.7. CONCLUSIONS

Faut-il brûler l'analogie de l'alphabet sur l'autel de la didactique ? Présentée comme une illustration aux limites évidentes (« obvious », Markow, 1988), l'analogie de l'alphabet ne semble être, pour certains auteurs, qu'un détail didactique, un moyen d'introduire à bon compte la langue symbolique chimique. Si tant est qu'il existe des détails en didactiques des sciences, notre étude tend toutefois à montrer que ceux-ci peuvent potentiellement porter à conséquence auprès des élèves. À l'aide des cadres théoriques de Gentner et de Holyoak, nous avons d'abord démontré la coexistence de quatre versions de l'analogie de l'alphabet, selon les objets mis en correspondance dans les domaines cible et source. L'analogie liant les symboles chimiques et les lettres de l'alphabet, que nous avons appelée « structurelle graphique », inclut potentiellement les trois autres de par la richesse du contenu sémantique du symbole chimique. Les nombreuses similitudes syntaxiques et pragmatiques ainsi que la familiarité des élèves avec l'écriture du français conduisent à supposer un fonctionnement efficace et une forte imprégnation de cette version de l'analogie de l'alphabet dans l'esprit des apprenants. L'idée de cette imprégnation soutient un objectif didactique important : faire entrer le code symbolique des chimistes dans la catégorie des langues. Une prise de conscience par les enseignants de l'aspect linguistique du cours de chimie nous semble en effet pertinente pour mieux transmettre et, en ce qui concerne les élèves, mieux assimiler les concepts.

Sur le plan des impacts didactiques négatifs potentiels, nous avons identifié deux obstacles majeurs à cette version de l'analogie : le renforcement de la boucle symbolique entre désignation et symbole, ainsi que la conceptualisation de la réaction chimique en tant que juxtaposition d'atomes. En effet, vidés de leur contenu sémantique pour ressembler aux lettres de l'alphabet, les symboles chimiques ne jouent plus le rôle qui leur est assigné : représenter des atomes au niveau microscopique et des substances au niveau macroscopique. On voit que cette « boucle symbolique », déjà modélisée à l'aide des concepts de terminologie et caractérisée par notre analyse épistémologique,

se retrouve maintenant comme produit potentiel d'une analogie entre langue symbolique et langue française.

Inscrits dans une formule moléculaire comparée à un « mot », les symboles chimiques peuvent également engendrer l'idée que la réaction chimique ne constitue qu'un collage de deux ensembles prédéfinis, formant un ensemble complexe qu'il suffirait de décoller pour récupérer les ensembles initiaux. Cette « interprétation additive » a déjà été décrite comme étant le résultat d'une primitive phénoménologique fréquemment rencontrée dans l'histoire de la chimie. Cette difficulté est donc susceptible d'être renforcée par l'usage inconséquent de l'analogie de l'alphabet. Les impacts didactiques négatifs émis ci-dessus ont cependant fait émerger une série de possibilités basées sur un retournement de l'analogie structurelle graphique de l'alphabet : il s'agit de se servir de ses failles plutôt que de ses forces. Intégrer plus régulièrement l'analogie de l'alphabet au cours de chimie via une démarche d'analogie par comparaison de situations permettrait, d'une part, d'en réduire les défauts, d'autre part d'en exploiter les qualités. Car nous ne pouvons échapper à cet enjeu linguistique et didactique qu'est l'apprentissage des langages propres à la chimie. Les acteurs de terrain se doivent de saisir toutes les chances de construire progressivement et explicitement le code symbolique chimique, qui constitue l'outil de communication de tous les chimistes. L'analogie de l'alphabet, présentée en tenant compte des précautions d'usage que nous avons développées, constitue l'une de ces opportunités.

Enfin, nous avons mis en évidence dans ce chapitre le lien fort entre langue ordinaire (LO - ici, la langue française, d'un point de vue phonologique et graphique), langue ordinaire modifiée (LOm - molécules, atomes, élément, corps purs composés) et langue symbolique chimique (LS). Ce lien linguistique est si évident qu'il peut faire l'objet d'analogies plus ou moins puissantes entre deux domaines choisis. Notre taxonomie des systèmes sémiotiques à l'œuvre dans l'enseignement de la chimie trouve ici une application concrète, qui démontre sa capacité à rendre compte et à supporter l'analyse de contenus de nature didactique.

Les six premiers chapitres de cet ouvrage nous ont permis de clarifier les origines de certaines difficultés rencontrées par les élèves et étudiants lors de l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique. Il est nécessaire maintenant de vérifier si les éléments apportés dans ces chapitres sont applicables à la situation rencontrée en Fédération Wallonie-Bruxelles. Les élèves de FWB rencontrent-ils les mêmes types de difficultés face à la symbolique chimique ? Dans quelle mesure ces difficultés sont-elles explicables d'un point de vue épistémologique, linguistique et – surtout – institutionnel ? Est-il possible de construire une séquence de leçons qui permette un renforcement de significations pertinentes dans l'esprit des élèves, tout en levant certaines difficultés d'apprentissage et/ou d'utilisation de la langue symbolique des chimistes ?

Dans le chapitre suivant, nous allons sonder les significations qu'un échantillon d'élèves de la FWB attribue aux signes utilisés dans la symbolique chimique. Cette étude nous permettra de déterminer les relations entre les signes et leurs significations dans l'esprit de certains apprenants dans le cadre de l'enseignement belge francophone, et de les comparer aux significations recensées dans la littérature.

Chapitre 7

Significations des symboles de l'équation de réaction pour des élèves de 16-17 ans (grade 11) en Belgique francophone

On peut exprimer le résultat de l'effet chimique […] par une formule simple qui n'est au fond qu'un raisonnement mis en forme serrée, comme toutes les formules algébriques ; et c'est une méthode qui, en offrant les phénomènes chimiques dans un langage concis, aura l'avantage, lorsqu'on voudra l'employer plus généralement, de représenter avec clarté et précision tout ce qui se passe dans les opérations les plus compliquées.

(Fourcroy et Vauquelin, 1797, p. 194-195).

7.1. INTRODUCTION

Cet extrait des *Annales de chimie*, écrit conjointement par Fourcroy et Vauquelin en 1797, offre un portrait de l'équation de réaction telle qu'elle a été conçue à l'époque des commencements de la chimie moderne. Après avoir précisé les raisons d'être et les perspectives enthousiasmantes que cette « formule simple[1] » laissait présager, les auteurs formulent un vœu pieux : l'usage plus général de ce « raisonnement mis en forme serrée » est susceptible de faciliter la communication d'informations liées aux phénomènes observables, et ce même pour « les opérations les plus compliquées ». Au vu du succès croissant qu'a rencontré l'équation de réaction depuis sa création, tout porte à croire que les scientifiques qui ont succédé à Fourcroy et Vauquelin, et de surcroît à Lavoisier, ont eu à cœur de répondre à cette audacieuse proposition.

Cependant, nous avons montré dans nos premiers chapitres que, du point de vue des apprenants, la communication n'était guère assurée par l'emploi de l'équation chimique. En effet, de par son caractère éminemment implicite, son contenu sémantique foisonnant ou encore sa bivalence transformation/conservation, l'équation de réaction engendre chez de nombreux élèves des questionnements quant à sa forme et à son contenu. Devant l'absence d'études en didactique de la chimie entreprises sur le sujet en Belgique francophone, nous avons cherché à déterminer et à évaluer les représentations des élèves de 16-17 ans face aux symboles fondamentaux insérés dans l'équation de réaction, et, ainsi, à interroger leur maîtrise sémantique des signes

[1] Fourcroy utilise le terme « formule simple » pour décrire l'équation littérale (ou nominative) proposée précédemment par Lavoisier, et non l'équation symbolique telle que nous la connaissons aujourd'hui. Les formules moléculaires avec symboles atomiques et indices ne seront introduites que durant la deuxième décennie du XIXème siècle par J.J. Berzelius (Berzelius, 1813) ; voir le chapitre 5 pour une discussion sur l'épistémologie de la symbolique chimique.

essentiels de la symbole chimique (symboles chimiques, indice, coefficient, « + », « ⟶ »).

Ce test diagnostique local s'intègre dans une démarche d'ingénierie didactique dont nous allons rappeler les principes. La conception de ce test, réalisé en 2011, n'a pas bénéficié de l'ensemble des analyses linguistiques, didactiques et épistémologiques ayant trait à la symbolique chimique, et développées dans les chapitres précédents. Cependant, il enrichit ces discussions, qui ont d'ailleurs permis la conception, le développement et la mise en œuvre pratique d'une séquence de leçons visant à traiter certaines difficultés rencontrées par les élèves face à la symbolique chimique. En outre, nous voyons deux avantages supplémentaires à avoir réalisé nos analyses en aval du test. D'une part, nous pouvons cerner les atouts et les limites de celui-ci au vu des développements théoriques déjà avancés. D'autre part, nous pouvons analyser les propositions des élèves avec des grilles de lecture dont nous ne disposions pas à l'époque de la conception et de la soumission du test. Nous montrons ainsi comment un corpus de productions d'élèves collecté en 2011 peut, quelques années plus tard, mener à des résultats s'intégrant dans les avancées théoriques et conceptuelles de notre domaine de recherche.

Ce chapitre s'articule en cinq points : primo, une présentation des principes de l'ingénierie didactique et un rappel de notre méthodologie générale ; secundo, un rappel de nos principaux modèles théoriques (modèle des niveaux de signification, triangle étendu de terminologie, taxonomie des systèmes sémiotiques), qui serviront de grilles d'analyse des productions d'élèves ; tertio, l'énoncé des questions de recherche et la description de la méthodologie entourant la conception et la soumission du test ; quarto, l'expression des résultats du test diagnostique ; quinto, une discussion des points essentiels émergeant de l'analyse des résultats, suivie d'une conclusion.

7.2. INGÉNIERIE DIDACTIQUE

7.2.1. Définitions

Il existe de nombreuses définitions de l'ingénierie didactique (ou ID). Ainsi, selon Chevallard (2009), on dénombre trois types principaux d'ingénierie didactique.

1) Une ID de développement : dite « d'usage » ou « pratique », cette ID est mise en œuvre par les professeurs lors du processus de production de situations d'apprentissage. Elle répond alors aux étapes habituelles d'une démarche de préparation de cours : définition des contenus à enseigner, planification et définition des ressources sur base des contraintes ou commandes institutionnelles.

2) Une ID de recherche : dite « pour la connaissance » ou « à visée phénoméno-technique », cette ID est caractéristique des recherches en didactique. Elle sous-entend généralement deux objectifs : répondre aux obligations normales de tout enseignement (apprentissage des élèves) et permettre la reproduction et l'étude de phénomènes didactiques bien déterminés. Certaines ID de recherche ne poursuivent pas forcément les objectifs d'apprentissage : elles se limitent à créer un contexte d'observation propice à l'étude et à l'observation du fonctionnement didactique, sans intervenir dans la conception et la validation de contenus d'enseignement ni proposer de solutions à un problème déterminé.
3) Une ID professionnelle : elle consiste en une production de ressources éducatives, utilisant ou non de nouvelles technologies, qui prennent pour point de départ des situations de travail propices à la formation et au développement des compétences professionnelles.

La différence entre l'ingénierie de développement et l'ingénierie de recherche est essentielle : la première est centrée sur l'apprentissage des élèves, elle est conçue et mise en œuvre par l'enseignant praticien ; la seconde est centrée, elle, sur l'apport d'informations scientifiques destinées à un chercheur. Dans une ID de recherche, la réalisation didactique en classe est une mise à l'épreuve des constructions théoriques élaborées dans les recherches, par l'engagement de ces constructions dans un mécanisme de production. Par conséquent, le positionnement de l'ID de recherche et celui l'ID de développement par rapport à l'émergence de savoirs nouveaux sont résolument différents : dans un cas, l'ingénierie didactique se met au service de la recherche en didactique, alors que dans l'autre, c'est la recherche en didactique qui se met au service de l'ingénierie didactique.

Plus généralement, la définition suivante selon Brousseau (2009, p. 2) regroupe les deux types d'ingénierie :

> L'ingénierie pédagogique […] consiste à déterminer des dispositifs d'enseignement communicables et reproductibles. Elle évoque l'existence d'une description, d'une étude et de justifications aussi précises et consistantes que possibles des conditions d'utilisation de ce dispositif. Les dispositifs sont accompagnés d'études et d'analyses en référence avec les connaissances scientifiques théoriques et expérimentales du moment.

7.2.2. Théorie des situations didactiques et ID

La théorie des situations didactiques de Brousseau constitue le cadre structurant sur lequel se développe l'ingénierie didactique dans le champ de la didactique des mathématiques. Une situation didactique est un objet particulier qui modélise l'ensemble des interactions en jeu dans une situation d'enseignement entre les trois acteurs du triangle didactique : maître, élève(s) et savoir (Brousseau, 1998).

Brousseau distingue deux niveaux de modélisation. Premièrement, il nomme « niveau a-didactique » celui où les interactions entre l'élève et le savoir, par le truchement du « milieu », se trouvent au centre de l'analyse. La notion de « milieu » recouvre l'ensemble des objets matériels ou symboliques, y compris les autres élèves, qui permettent l'interaction entre le sujet et le savoir. Dans le deuxième niveau dit « didactique », l'élève passe du statut de sujet « épistémique » à celui de sujet « institutionnel ». Les aspects affectifs et institutionnels sont ajoutés à la dimension épistémique, grâce, notamment, au concept de « contrat didactique » qui régule les interactions entre maître et élèves. Si l'enseignant est relativement absent du niveau a-didactique, il occupe une place essentielle au niveau didactique. C'est lui qui décide du moment où l'élève est laissé responsable de son activité d'apprentissage (la « dévolution ») ainsi que de celui où la classe est récupérée pour une structuration et une uniformisation des connaissances (l'« institutionnalisation »).

Les liens entre ingénierie didactique et théorie des situations didactique sont évidents quand on se penche sur les méthodes de mise en œuvre qui en dérivent, notamment la méthodologie d'Artigue (1988). En effet, l'ingénierie didactique, en tant que méthode de recherche, se distingue par un mode de validation dit « interne ». Dans celle-ci, une analyse a priori – qui a fondé la conception de l'ingénierie – est confrontée à une analyse a posteriori – qui est le produit de la réalisation de l'ingénierie. La confrontation aboutit alors à la confirmation ou à l'infirmation des hypothèses régissant l'analyse a priori.

L'ingénieur didactique (ou le didacticien ingénieur) postule une situation supposée a-didactique qui servira de base à la construction de sa séquence de leçons. Il contrôle alors certaines variables didactiques qui influent sur le milieu, et donc sur les interactions probables entre celui-ci et le sujet. L'intervention du professeur est modélisée dans le cadre des moments de dévolution et d'institutionnalisation.

7.2.3. Description de la méthodologie de recherche

Dans la figure 1, nous résumons la méthodologie que nous avons adoptée pour la présente étude. Elle emprunte la forme d'une ingénierie didactique de recherche telle que définie par Artigue (1988), en fonction des travaux de Brousseau (1998).

Notre méthodologie comporte donc quatre étapes :

1) Des analyses préalables qui empruntent à de nombreux champs différents : l'analyse des curricula et de leurs conséquences potentielles (chapitre 1), les difficultés éprouvées par les apprenants (chapitre 2), les modèles interprétatifs comprenant des niveaux de savoir (chapitre 3), l'exploitation des concepts de linguistique pour décrire les relations internes aux savoirs (chapitre 4), l'épistémologie des savoirs en jeu dans l'ingénierie (chapitre 5), les conséquences de l'usage d'une analogie de l'alphabet sur les difficultés des

élèves (chapitre 6). Cette analyse du champ de contraintes dans lequel va se situer notre mise en œuvre doit être complétée par le test diagnostique des difficultés et des représentations dans le cadre restreint de notre étude (les établissements de la Fédération Wallonie-Bruxelles). Il est à noter que ces travaux de base sont toujours temporaires : ils sont revus au fur et à mesure de l'ingénierie, dont ils peuvent dès lors constituer à la fois une source et un produit.

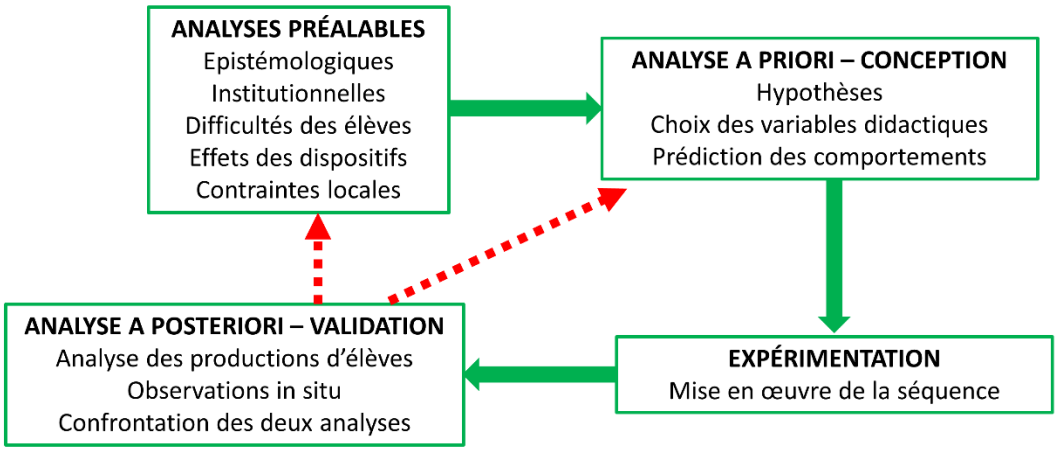


Figure 1. Schéma de notre méthodologie de recherche : ingénierie didactique selon Artigue (1988). Les flèches vertes représentent la méthodologie dans sa chronologie ; les flèches rouges indiquent que l'analyse a posteriori peut nourrir les analyses préalables et/ou modifier les hypothèses de conception d'une deuxième itération du test.

2) Après avoir fixé les contraintes et les variables, le didacticien-ingénieur choisit les variables à modifier et anticipe les effets sur le sens et le comportement des élèves. Cette analyse a priori comprend donc nécessairement des hypothèses de travail. Elle débouche sur la conception de la séquence d'enseignement.

3) et 4) Une fois l'expérimentation de la séquence de leçons opérée, il s'agit d'analyser les observations in situ et les productions des élèves pour bâtir l'analyse a posteriori. Celle-ci est confrontée aux hypothèses et attendus de l'analyse a priori. Cette confrontation donne lieu à l'enrichissement des données de départ, à une modification de la séquence d'enseignement, voire même à une remise en question des hypothèses de travail.

L'une de nos hypothèses de travail consiste à considérer que les relations entre niveaux de conceptualisation et symboles, d'une part, et entre systèmes sémiotiques, d'autre part, sont essentielles pour assurer une compréhension effective des concepts et une utilisation maîtrisée de la symbolique chimique. Trois modèles théoriques présentés ci-après nous permettront de déterminer la nature et l'intensité des relations ainsi décrites.

7.3. CADRES STRUCTURANTS

7.3.1. Modèle des niveaux de signification

Nous avons reconstruit un cadre théorique permettant de traiter la question des significations que les élèves prêtent à un symbole, un signe ou une désignation présents dans l'équation de réaction. Nous considérons qu'un élève peut construire des significations émergeant à trois niveaux distincts, que nous appelons « niveaux de signification », à partir d'une visualisation donnée, c'est-à-dire un ou des signes statiques ou dynamiques (figure 2). On distingue :

1) Un niveau de signification macroscopique dans lequel l'élève fait référence à l'observable en citant des observations empiriques ou en utilisant des concepts macroscopiques.
2) Un niveau de signification microscopique dans lequel l'élève fait référence aux entités constitutives de la matière, à la géométrie moléculaire, aux propriétés microscopiques, etc.
3) Un niveau de signification « symbolique » dans lequel l'élève ne perçoit pas les informations que les symboles véhiculent. Ce niveau regroupe trois types de significations qui, s'ils sont mobilisés, éloignent l'élève des concepts visés.

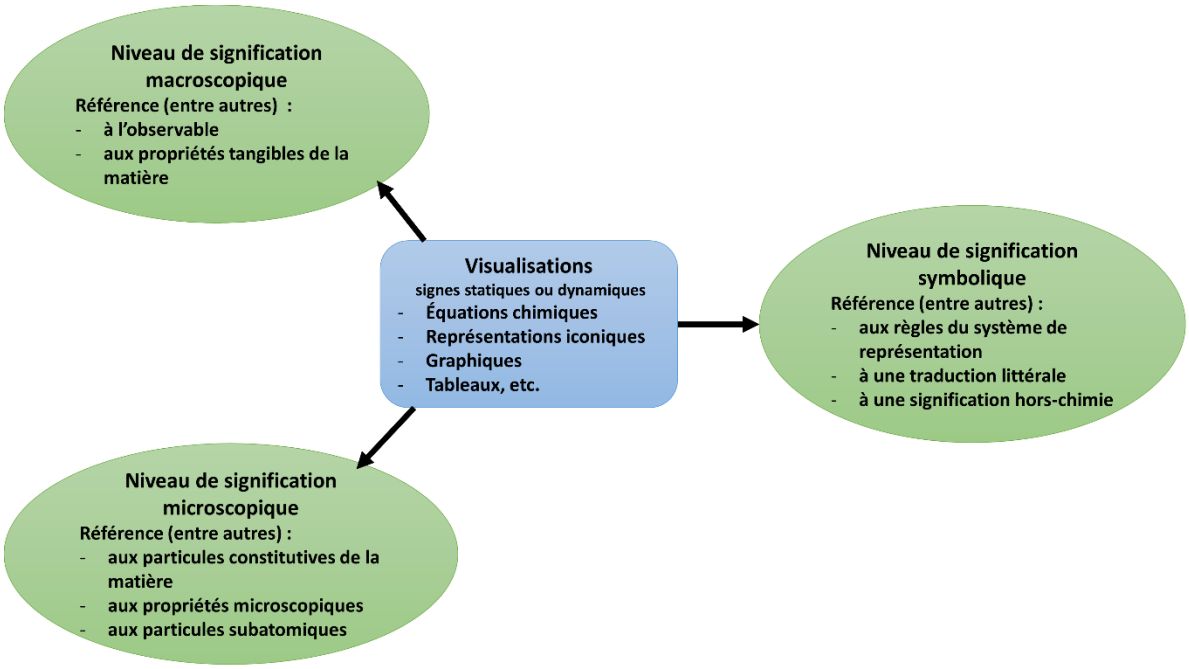


Figure 2. Schéma des niveaux de signification associés à une visualisation par un jeune apprenant.

Dans ce niveau de signification symbolique, l'élève peut être piégé :

- dans un système de représentation : il sait par exemple indiquer que, dans « HNO_3 », on trouve un « H », un « N » et 3 « O ». Par contre, il est incapable de préciser ce que représentent chimiquement les symboles ainsi dénombrés.
- dans une boucle entre systèmes de représentation. Par exemple, l'élève sait que « HNO_3 » est la formule chimique de l'acide nitrique. Mais il est incapable de se représenter la molécule d'acide nitrique ou de prévoir les propriétés de la substance chimique associée.
- dans une connexion vers un champ différent de la chimie. L'élève pense, par exemple, que le signe « + », dans l'équation chimique, signifie que l'on additionne les termes à gauche de l'équation chimique. Il y a là projection d'une signification issue du champ des mathématiques vers le champ de la chimie.

7.3.2. Taxonomie des systèmes sémiotiques en chimie

Nous renvoyons au chapitre 3 pour une description détaillée de la genèse et des caractéristiques de notre taxonomie (figure 3).

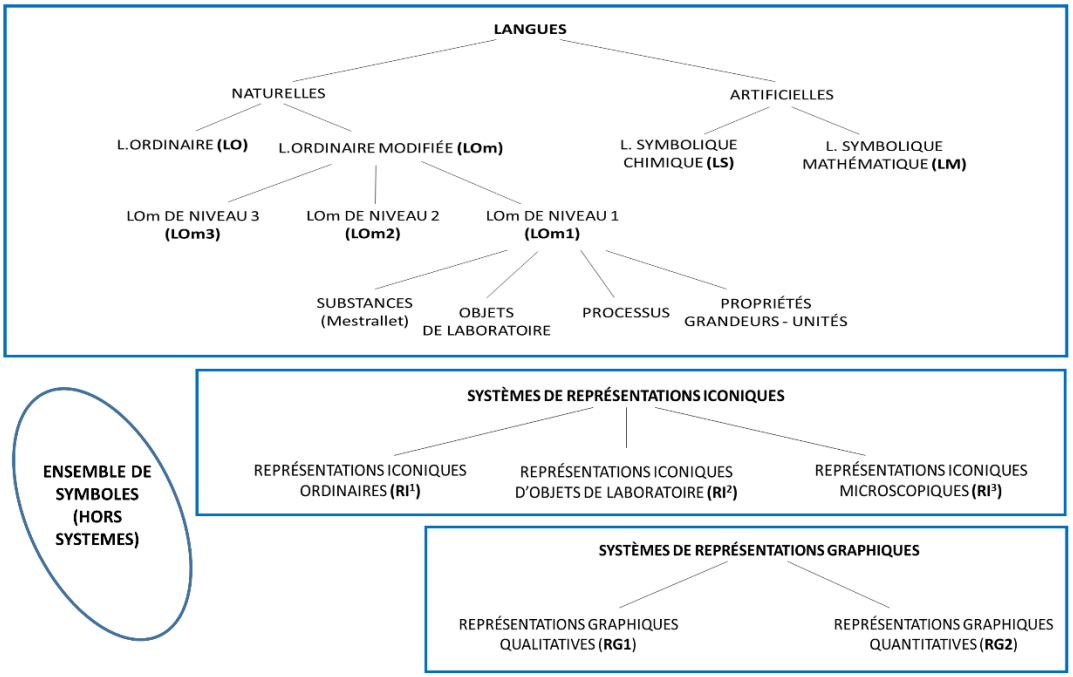


Figure 3. Taxonomie des systèmes sémiotiques de l'écrit et de l'oral à l'œuvre dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.

Son exploitation nous permettra de préciser à quel système sémiotique est relié le signe chimique dont nous souhaitons sonder les significations dans l'esprit des élèves. La catégorisation en systèmes permet aussi de mettre en évidence les boucles symboliques, langagières et iconiques.

7.3.3. Triangle étendu de terminologie

Dans le chapitre 4, nous avons développé le triangle classique des terminologues en y ajoutant le lien entre symbole et désignation, ainsi qu'en y intégrant les concepts macroscopiques et microscopiques (figure 4).

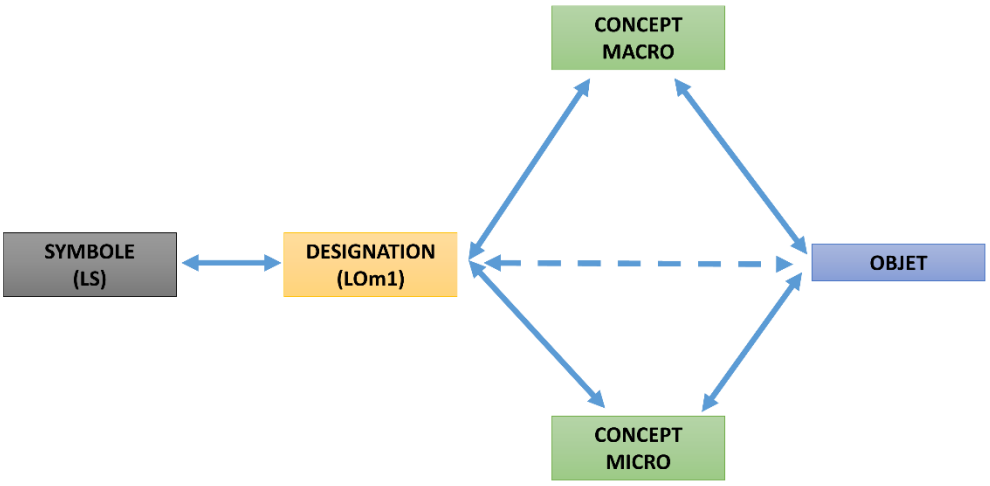


Figure 4. Représentation générale des relations entre désignation, symbole, concepts macroscopiques et microscopiques, et objet.

Ce schéma simplifié[2] avait permis de modéliser la boucle symbolique (entre symbole et désignation) et de montrer que les significations véhiculées par la désignation étaient projetées sur le symbole.

Pour les corps moléculaires ou les corps ioniques, les relations se complexifient, avec l'ajout des représentations microscopiques iconiques et le déploiement des concepts et des objets sur les niveaux microscopique et macroscopique (figure 5).

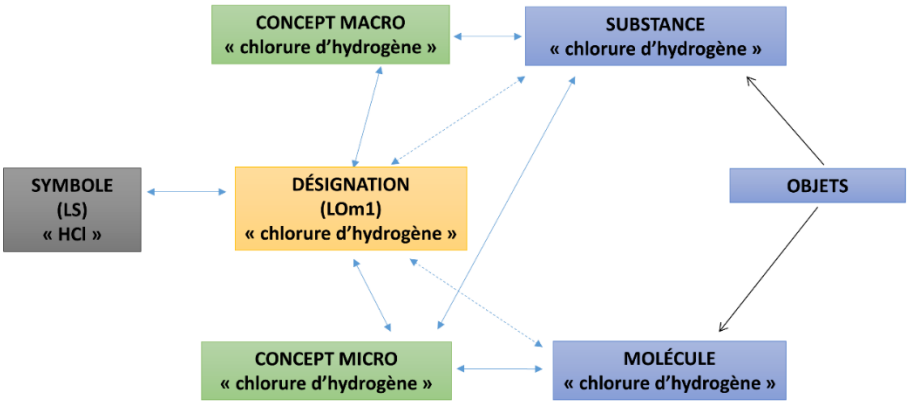


Figure 5. Représentation des relations entre désignation, formule symbolique, représentations moléculaires, concepts macroscopiques et microscopiques et objets pour une désignation de corps composé moléculaire.

[2] Pour des développements sur ce sujet, voir le chapitre 4.

Nous utiliserons parfois cette représentation dans l'analyse du test diagnostique, dans le but de modéliser les réponses des élèves et situer plus précisément la ou les relation(s) que chaque élève a activé pour générer sa réponse.

7.4. QUESTIONS DE RECHERCHE ET MÉTHODOLOGIE

La distinction entre les niveaux de savoir (dans le cadre général de l'enseignement de chimie) ou de signification (dans le cadre de l'interprétation de symboles et signes du point de vue de l'élève) constitue un véritable outil en didactique de la chimie. À la suite de certains auteurs (Larcher *et al.*, 1994 ; Hinton et Nakhleh, 1999 ; Cokelez et Dumon, 2005 ; Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006 ; Davidowitz et Chittleborough, 2009 ; Chittleborough et Treagust, 2007 ; Houart, 2009 ; Dumon et Mzoughi-Khadhraoui, 2014), nous avons émis les hypothèses suivantes :

- les concepts chimiques prennent d'autant plus de sens pour les élèves s'ils sont inclus dans une circulation entre les niveaux de conceptualisation microscopique et macroscopique ;
- les concepts sont d'autant plus opérationnels s'ils sont mis en œuvre par les apprenants dans les niveaux macroscopique et microscopique, à partir de visualisations variées.

Par conséquent, l'établissement de liens forts entre les significations aux niveaux macroscopique et microscopique et les signes décrits précédemment constituerait une démarche favorable à une compréhension en profondeur des concepts de base de la chimie. Nous avons procédé à l'évaluation des significations associées à la symbolique de l'équation de réaction auprès d'élèves à un certain stade de leur apprentissage, et ainsi tenté de répondre aux questions de recherche suivantes :

- Q1 : Quelles sont, chez les élèves testés (grade 11), les significations associées aux principaux symboles contenus dans l'équation de réaction ?
- Q2 : Dans notre modèle des niveaux de significations, à quel(s) niveau(x) ces significations peuvent-elles être reliées ?

Sur base de cette première analyse, nous allons creuser les implications du test diagnostique. Nous énonçons dès lors deux questions de recherche supplémentaires :

- Q3 : Quelles sont les difficultés d'apprentissage potentielles susceptibles d'être provoquées ou renforcées par certaines de ces significations ?
- Q4 : Quels sont les mécanismes (en termes de niveaux de signification, de systèmes sémiotiques) responsables de l'émergence de certaines significations observées ?

Un test, joint en annexe[3], a été soumis entre janvier et février 2011 à 130 élèves de 16-17 ans (grade 11) de trois écoles en Belgique francophone[4], choisies en fonction des professeurs collaborateurs. L'échantillon regroupe 91 élèves de sciences générales et 39 élèves de sciences de base[5]. Les enseignants présentent une ancienneté de métier importante (entre 20 et 30 ans) et les élèves sont, à quelques exceptions près, issus de familles à indice socio-économique comparable[6]. Le test a été distribué aux élèves par des professeurs collaborateurs dans leur propre classe, en précisant qu'il servait à estimer leur niveau de compréhension de l'équation de réaction à des fins diagnostiques (et non certificatives) pour le professeur, et, in fine, pour les besoins d'une recherche scientifique. Les élèves disposaient de trente minutes pour compléter le questionnaire de façon anonyme (seul l'intitulé de la classe était à stipuler). Ce test comporte huit questions ouvertes sur la compréhension de la symbolique utilisée dans une équation de réaction donnée (en l'occurrence, l'équation de combustion du sodium) :

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

Nous avons choisi cette équation pour plusieurs raisons. D'abord, parce qu'elle comporte deux types d'atomes (sodium et oxygène), un corps pur composé comportant un indice supérieur à l'unité (l'oxyde de sodium), des coefficients stœchiométriques supérieurs à l'unité, un atome non-impliqué dans une molécule (Na), des états de la matière différents (solide, gazeux). De plus, la réaction de combustion des métaux fait partie du programme de chimie dans l'enseignement secondaire en Belgique francophone[7]. Nous avons ajouté à l'équation de réaction les symboles associés aux états de la matière afin de pouvoir sonder les significations que les élèves leur prêtent, même si la présence de ces symboles est susceptible d'influer sur le niveau de signification exprimé en polarisant l'attention sur le niveau macroscopique. Si l'on excepte la lecture critique effectuée en amont par les professeurs collaborateurs, le questionnaire n'a pas fait l'objet d'une expérimentation préalable auprès d'un groupe-test.

Chaque question possède un objectif propre :

---

[3] Le document est disponible à l'annexe B.

[4] Nous nommerons ces écoles selon les termes « école A », « école « B » et « école C ».

[5] En cinquième année de l'enseignement secondaire général de transition en Belgique francophone (élèves de 16-17 ans), on distingue deux orientations spécifiques qui se caractérisent par le nombre de périodes par semaine allouées aux sciences (biologie, chimie, physique) : les élèves en orientation « sciences de base » suivent trois périodes de sciences par semaine, contre six pour les élèves en orientation « sciences générales ».

[6] Nous basons cette affirmation sur les indices socio-économiques des établissements scolaires (ISE) déterminés selon les critères de la Fédération Wallonie-Bruxelles en 2011.

[7] Pour un rappel du contenu des programmes de troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone (humanités générales), voir le chapitre 1. Nous considérons ici les programmes d'application avant 2014.

- Q1 et Q2 : Identifier les significations données aux termes « réactif » et « produit ».
- Q3 : Identifier les significations données au signe « + » dans l'équation de réaction.
- Q4 : Identifier les significations données à la flèche (→) dans l'équation de réaction[8].
- Q5 : Identifier les significations données au coefficient dans l'équation de réaction.
- Q6 : Identifier les significations données à l'indice dans l'équation de réaction.
- Q7 : Identifier les significations données aux symboles (s) et (g) dans l'équation de réaction.
- Q8 : Identifier ce que les élèves conçoivent par « réaction chimique ».

L'analyse de ces tests permet de déterminer les significations les plus fréquentes attribuées par les élèves et de cerner les problèmes potentiels que cela engendre dans la compréhension de la symbolique de l'équation de réaction. La somme des fréquences relatives compilées dans les tableaux de résultats peut excéder 100 %. En effet, bon nombre de productions d'apprenants contenaient plusieurs éléments de réponses imbriqués. Par souci de cohérence, nous avons donc comptabilisé l'occurrence de chacun de ces éléments de réponse sous la forme de fréquence relative. La plupart de ces catégories de significations ont été le produit de l'analyse a priori décrite dans les chapitres précédents. Cependant, d'autres catégories ont été créées a posteriori par regroupement de propositions sémantiquement ou syntaxiquement proches (par exemple, le « + » en tant qu'ensemble) ou, à l'inverse, par distinction de significations initialement regroupées en une seule catégorie (par exemple, la distinction entre mélange et ajout, pour le signe « + »). Enfin, certaines réponses comportant des confusions évidentes entre différents termes ou dont le sens a été jugé trop flou ont été considérées comme incorrectes et classées dans une catégorie spécifique.

7.5. RÉSULTATS

7.5.1. Identification des réactifs (Q1)

Pour rappel, le test porte sur l'équation de réaction de combustion du sodium :

[8] Contrairement à ce que l'on observe en France, les concepteurs des programmes belges n'ont jamais privilégié la réintroduction du signe égal dans l'équation de réaction. C'est donc la flèche de réaction qui reste enseignée pendant tout le cursus dans l'ensemble des établissements scolaires en Belgique francophone.

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

La question posée est : « quels sont les réactifs ? ». Dans notre échantillon, 84 % des élèves les identifient correctement, en retranscrivant tous les signes ou une partie des signes situés à gauche de la flèche de réaction. Cette fréquence élevée constitue une assise importante dans le cadre de l'élaboration de notre séquence de leçons : la distinction entre réactifs et produits ne constitue pas un problème majeur.

Cependant, une étude plus approfondie des résultats permet de mettre en évidence une série de constats. Pour ce faire, nous avons choisi deux voies de catégorisation des réponses des élèves. Premièrement, nous avons simplement mesuré la fréquence de combinaisons strictes, c'est-à-dire de réponses uniquement constituées des signes reproduits[9]. Ces fréquences apparaissent dans le tableau 1.

La réponse la plus fréquemment donnée est donc « $4Na_{(s)} + O_{2(g)}$ » (21 % des élèves), ce qui constitue un copier-coller de l'ensemble des signes situés à gauche de la flèche. Pour ces élèves, il peut s'agir d'un simple découpage de l'équation chimique, comparable à ceux qui répondent que les réactifs sont les « éléments à gauche de la flèche ». Il est important de noter qu'une telle réponse ne rend pas impossible une connexion avec d'autres systèmes sémiotiques ou avec des concepts chimiques. En effet, les symboles renvoient potentiellement à des concepts chimiques, mais on ne peut déterminer si cette association a bien lieu avec les seules données recueillies.

En outre, on remarque, parmi les très nombreuses combinaisons possibles, une sélection progressive des signes à gauche de la flèche de réaction, en fonction de ce que les élèves entendent par l'« identité » des réactifs. Nous avons modélisé cette progression en quatre temps :

1) 17 % des élèves ont traduit le signe « + » par le terme « et », et ce en conservant tous les autres signes à gauche de la flèche (coefficient, symboles chimiques, symboles des états). Cette traduction montre un passage partiel de la langue symbolique (LS) à la langue ordinaire modifiée (LOm1). Une production d'élève, reproduite à la figure 6, porte les traces de la conversion sémiotique : le terme « et » est écrit à côté du signe « + » (sans doute dans un élan de correction de son auteur).

[9] Ce que nous appelons « fréquence de combinaisons strictes » correspond donc à la fréquence d'apparition d'un type de réponse donnée. Par exemple, « Na et O_2 » figure dans la catégorie « symboles ». De ce fait, une réponse comme « le sodium Na et le dioxygène O_2 » ne sera pas comptabilisée dans la fréquence de combinaisons strictes de « symboles », mais bien dans la catégorie « symboles + nomenclature ». Par contre, les deux réponses seront comptabilisées dans la fréquence d'occurrence, seuls ou en combinaison des symboles chimiques.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Symboles + coefficient + état	49	38 %
dont $4Na_{(s)} + O_{2(g)}$	27	21 %
dont $4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	22	17 %
Symboles + coefficient	18	14 %
dont 4Na et O_2	12	9 %
dont 4Na + O_2	6	5 %
Symboles	18	14 %
dont Na et O_2	16	12 %
dont Na + O_2	2	2 %
Symboles + nomenclature	7	5 %
Nomenclature seule	5	4 %
Symboles + coefficient + état + nomenclature	3	2 %
Symboles + état	2	1,5 %
À gauche de la flèche	2	1,5 %
Symboles + nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + coefficient + gauche de la flèche	1	0,8 %
Symboles + coefficient + état + gauche de la flèche	1	0,8 %
Nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + nomenclature + coefficient	1	0,8 %
Réponses incorrectes	21	16 %

Tableau 1. Nombre d'élèves et fréquences relatives par combinaison strictes, issues des réponses à la première question du test : « Quels sont les réactifs ? »

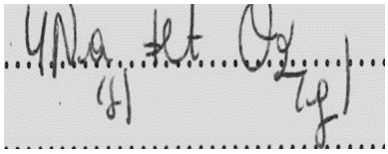


Figure 6. Production d'élève de 17 ans (mai 2011). Le terme « et » est écrit à côté du signe « + ».

2) 14 % des élèves ont décidé de ne pas indiquer les symboles des états de la matière. Pour ces élèves, ceux-ci ne sont donc pas pertinents quand il faut décrire l'identité des réactifs. Cette sélection d'information s'accompagne plus souvent de la traduction du signe « + » par le terme « et » (12 cas sur 18).

3) 14 % des élèves se limitent à retenir dans leur réponse les symboles atomiques, en décidant donc de n'écrire ni le coefficient stœchiométrique, ni les symboles

des états de la matière[10]. Pour ces élèves, l'identité des réactifs est connue grâce aux symboles chimiques. Cela signifie aussi que le coefficient stœchiométrique et les symboles des états de la matière véhiculent d'autres significations, différentes de l'identité des réactifs. Notons que ces élèves présentent une tendance à traduire le signe « + » par le terme « et » (12 cas sur 18).

4) Enfin, 5 élèves (4 % de l'échantillon) ont proposé une réponse de type « du sodium et du dioxygène », ce qui constitue l'étape ultime dans le processus de sélection et de traduction. De la combinaison de signes « $4Na_{(s)} + O_{2(g)}$ », ces élèves n'ont conservé que les symboles atomiques et le signe « + », qu'ils ont traduit en langue ordinaire modifiée. Cette conversion totale d'une forme appartenant à un système sémiotique (LS) à une forme dans un autre système sémiotique (LOm1) est le signe d'une capacité à extraire des significations pertinentes d'un groupe de symboles, doublée d'une capacité à traduire ces informations dans d'autres systèmes de représentation. Par ailleurs, sept autres élèves ont combiné noms et symboles chimiques dans leur réponse, mettant ainsi en exergue le lien entre langue symbolique et nomenclature des substances.

Les réponses collectées dans le tableau 1 peuvent être lues en fonction du système sémiotique convoqué. Ainsi, une production comme « $4Na_{(s)} + O_{2(g)}$ » relève uniquement de la langue symbolique des chimistes (LS), alors qu'une écriture comme « le sodium et le dioxygène » est exprimée uniquement en langue ordinaire modifiée de niveau 1 (LOm1). Entre ces deux extrêmes, on trouve des réponses hybrides, empruntant aux deux systèmes de signes ; c'est le cas, par exemple, de la production « Na et O_2 ». Dans la figure 7, nous avons représenté, sous la forme d'un histogramme, les fréquences relatives de réponses exprimées, soit en LS, soit en LOm1, soit en empruntant aux deux systèmes (réponses hybrides). Les réponses incorrectes ne sont pas considérées.

[10] D'ailleurs, certaines équations chimiques dites « qualitatives » se limitent à donner les formules chimiques des réactifs et produits en présence, sans coefficient stœchiométrique. Dans notre cas, l'équation qualitative de la combustion de l'aluminium s'écrirait : « $Na + O_2 \longrightarrow Na_2O$ ». Mais de telles équations sont rares dans les livres de référence (Atkins et Jones, 1998). L'équation qualitative symbolique se situe entre l'équation nominative (sans symboles chimiques) et l'équation quantitative symbolique (avec symboles chimiques et coefficients stœchiométriques). On retrouve essentiellement de telles équations comme point de départ d'exercices de pondération d'équations dans certains manuels scolaires (Buschen *et al.*, 2015 ; Pirson *et al.*, 2015).

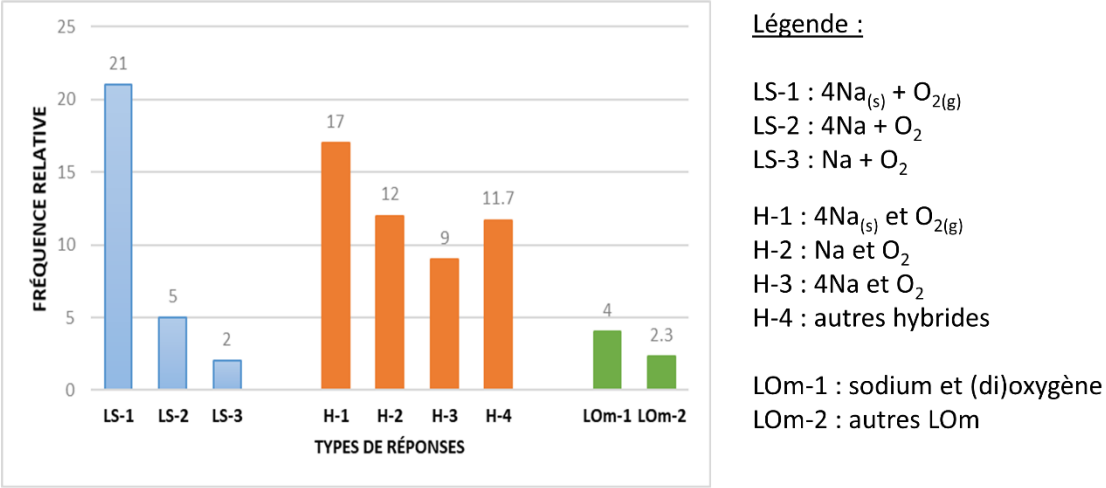


Figure 7. Fréquence relative en fonction du type de réponses données à la question : « Quels sont les réactifs ? », regroupées selon le(s) système(s) sémiotique(s) convoqué(s).

La figure 7 montre que, dans le cas des réactifs, les propositions exprimées uniquement en langue symbolique ne sont pas majoritaires (28 % des élèves). Les réponses hybrides sont plus nombreuses (49,7 % des élèves), de par la conversion fréquente du signe « + » en « et ». Par contre, les réponses exprimées uniquement en langue ordinaire modifiée sont marginales (6,3 % de la cohorte).

En outre, dans la figure 8, nous avons représenté qualitativement un processus-type de sélection-conversion croissante, allant d'une représentation construite uniquement via la langue symbolique (LS) à une représentation élaborée uniquement à l'aide de la langue ordinaire modifiée de type 1 (LOm1).

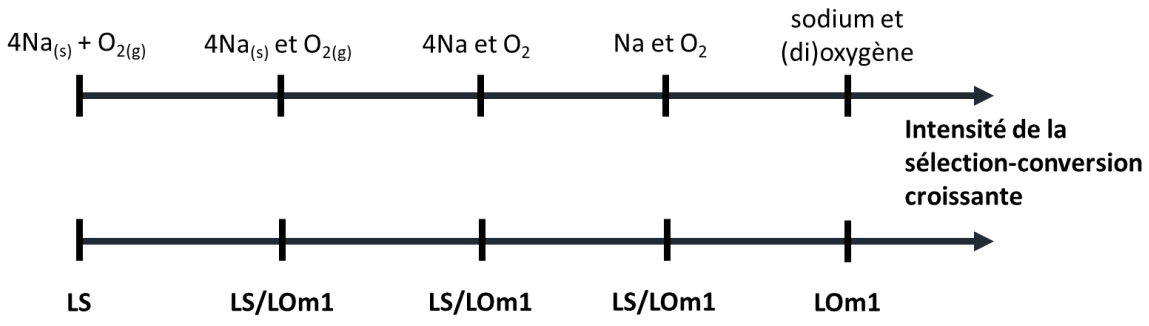


Figure 8. Processus de sélection et de conversion progressives des informations symboliques présentées dans une équation de réaction (réactifs).

Après l'étude des combinaisons strictes, nous avons mesuré la fréquence d'occurrence de certains termes ou symboles dans les réponses des élèves, et ce quelle que soit la combinaison (tableau 2).

La présence des symboles chimiques est bien entendu très fréquente dans les réponses des élèves testés : plus de 80 % des élèves les utilisent pour identifier des réactifs. Il est intéressant d'observer la faible utilisation du signe « + », dont la fréquence est deux fois moindre que celle du terme « et ». Le recours à la nomenclature reste peu fréquent : un élève sur cinq tente de traduire les symboles atomiques en des termes de la nomenclature chimique.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Présence des symboles Na et O_2	107	82 %
Présence du terme « et »	85	65 %
Présence du coefficient « 4 »	83	64 %
Présence des états de la matière (symbole et/ou nom)	65	50 %
Présence du signe « + »	41	31 %
Présence de la nomenclature (sodium et (di)oxygène)	25	19 %

Tableau 2. Nombre d'élèves et fréquences relatives par signes observés seuls ou en combinaison, issues des réponses à la première question du test : « Quels sont les réactifs ? »

La question du rôle du coefficient stœchiométrique dans la caractérisation des réactifs reste pendante pour de nombreux élèves : le ratio réactionnel est-il constitutif des réactifs ? les proportions relatives au processus réactionnel a priori (caractérisées par les coefficients stœchiométriques) sont-elles confondues avec les réactifs concrets et leur quantité initiale ?

Les réponses considérées comme incorrectes apportent également leur lot d'éclairages sur les conceptions et raisonnements des élèves. Premièrement, 4 élèves confondent les réactifs et les produits, en répondant « $2Na_2O_{(s)}$ » à la question posée. Cette confusion est très peu fréquente : la distinction entre réactifs et produits est donc effective pour la plupart des élèves testés.

Deuxièmement, 6 élèves expriment le réactif « oxygène » en utilisant le symbole « O ». Il s'agit ici de la confusion – bien connue dans la littérature scientifique (Taskin et Bernholt, 2014) – entre oxygène et dioxygène, ou encore entre l'élément oxygène et la molécule de dioxygène. Cette proposition met en lumière la question des limites du concept de « réactif » : est-il incorrect de dire que l'élément oxygène est un des réactifs ? Le concept de « réactifs » se limite-t-il aux corps macroscopiques (gaz « dioxygène ») et aux corps microscopiques (molécule « dioxygène »), représentés par le même symbole (ici, « O_2 ») ? Dans le *Goldbook* (IUPAC, 2014), le réactif[11] est défini comme une substance consommée en cours de réaction. Cette définition tend à exclure l'élément du concept de réactif.

[11] « Reactant », en anglais, a donné « réactant » en langue française. Les termes « réactif » et « réactant » coexistent en langue française pour décrire le même concept.

Troisièmement, 2 élèves ont utilisé un terme de nomenclature incorrect : azote pour « Na » et dioxyde pour « O_2 ».

Enfin, nous pouvons clore l'analyse du premier item du test diagnostique en relevant quelques productions d'intérêt qui mettent en jeu les niveaux de signification tels que définis dans notre modèle.

1) 4 élèves ont répondu que les réactifs étaient « à gauche de la flèche ». Cette réponse appartient au niveau de signification symbolique. En effet, ces élèves mettent en avant leur maîtrise des règles internes du système sémiotique qu'est la langue symbolique des chimistes. Il s'agit bien d'une règle d'écriture : les réactifs doivent être écrits à gauche de la flèche de réaction dans une équation chimique. Aucune connexion avec d'autres niveaux de signification n'est identifiable dans cette réponse.

2) 2 élèves ont combiné deux éléments de réponse de nature macroscopique dans leur proposition, en inscrivant « 4 moles de sodium solide et 1 mole de dioxygène gazeux ». Une telle réponse montre, d'une part, un détachement du niveau symbolique pour, d'autre part, connecter les informations au niveau macroscopique. Le fait de citer les états de la matière et les quantités de matière indique en effet que ces élèves convertissent les informations symboliques, tout en s'inscrivant dans le niveau de signification macroscopique. Cependant, le coefficient est ici considéré comme un indicateur des quantités de matière initiales, et non comme une proportion.

3) 2 élèves ont traduit les informations symboliques en convoquant des concepts microscopiques. Ils répondent en termes de molécules de sodium et de dioxygène. Ces élèves présentent une certaine logique dans leur raisonnement en ne citant pas les états de la matière. Par-là, ils situent leur réponse dans un niveau de signification microscopique.

7.5.2. Identification des produits (Q2)

Pour le traitement des réponses à la deuxième question, nous avons également opéré en traitant les combinaisons strictes (tableau 3).

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Symboles + coefficient + état (« $2Na_2O_{(s)}$ »)	45	35 %
Symboles (« Na_2O »)	22	17 %
Symboles + coefficient (« $2Na_2O$ »)	21	16 %
Symboles + nomenclature	5	4 %
Nomenclature seule	4	3 %
Symboles + état	2	1,5 %
Symboles + coefficient + état + droite de la flèche	1	0,8 %
Symboles + droite de la flèche	1	0,8 %
Nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + droite de la flèche	1	0,8 %
Réponses incorrectes	27	21 %

Tableau 3. Nombre d'élèves et fréquences relatives par combinaison strictes, issues des réponses à la deuxième question du test : « Quels sont les produits ? »

La question posée est : « Quels sont les produits ? ». Très logiquement, on obtient des fréquences de combinaisons strictes comparables aux fréquences mesurées dans la question 1, pour ce qui est de la sélection des informations symboliques pertinentes (coefficient, état de la matière). Ce résultat souligne la cohérence des élèves face à ces deux questions auxquelles peut s'appliquer un raisonnement similaire. Par contre, la fréquence de propositions hybrides (LS/LOm1) chute, au profit des réponses uniquement en langue symbolique (figure 9).

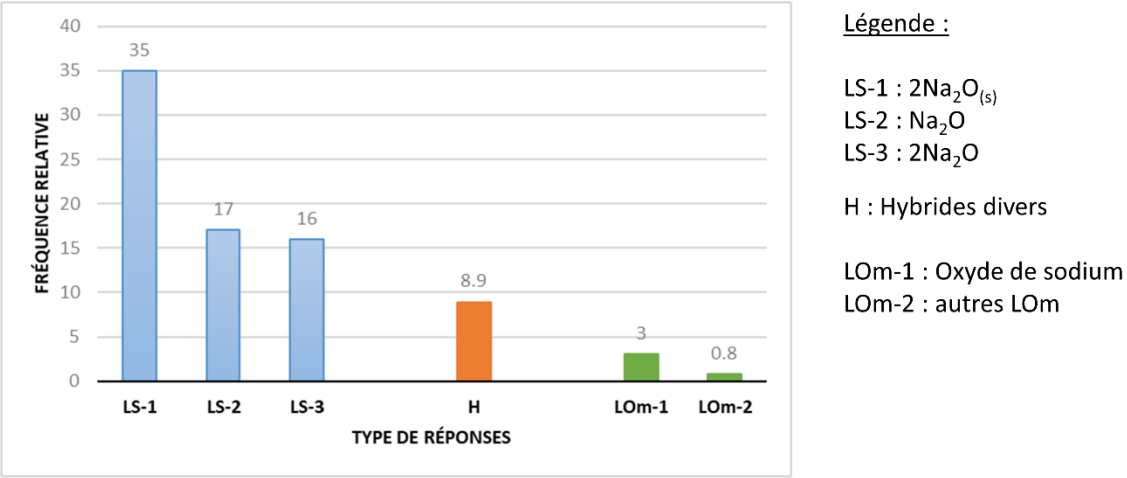


Figure 9. Fréquences relatives en fonction du type de réponses données à la question : « Quels sont les produits ? », regroupées selon le(s) système(s) sémiotique(s) convoqué(s).

Donc, si la sélection des symboles pour décrire l'identité des produits est opérante, la conversion de la langue symbolique vers la langue ordinaire modifiée s'avère par contre limitée. Les deux facteurs dominants identifiés sont l'absence de signe « + » convertible à droite de la flèche et la présence d'un produit manifestement plus ardu à nommer pour

les élèves (l'oxyde de sodium). En effet, le fait de nommer l'oxyde de sodium semble constituer un problème et entraîne une modification de comportement chez certains élèves : le manque de certitude autour de la nomenclature des oxydes fait chuter d'un facteur deux le nombre d'élèves utilisant la nomenclature (12 élèves pour les produits contre 25 élèves pour les réactifs).

Cependant, les résultats montrent aussi une sélection et une conversion progressives des informations symboliques, semblables à celles observée pour la question 1 (figure 10).

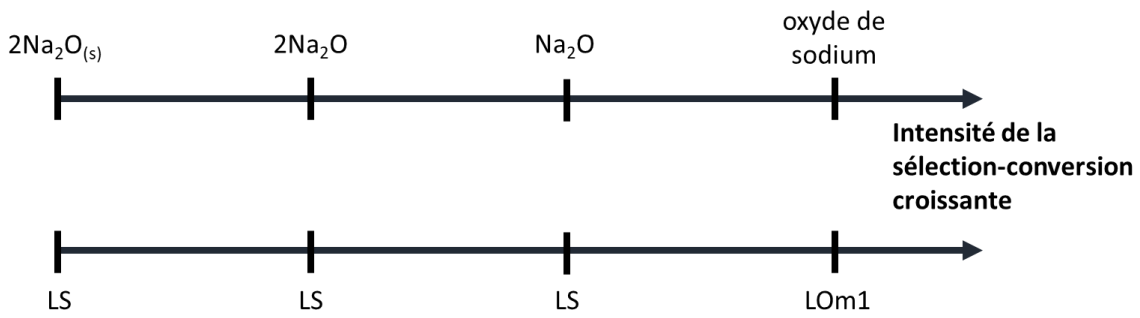


Figure 10. Processus de sélection et de conversion progressives des informations symboliques présentées dans une équation de réaction (produits).

On relève une légère hausse du taux de réponses incorrectes, passant de 16 à 21 % d'erreur.

Revenons quelque peu sur les types de réponses incorrectes rencontrées dans le test concernant la deuxième question. Nous les avons classées en trois catégories.

D'abord, on trouve les élèves qui confondent réactifs et produits (7 élèves), en nombre plus élevé que pour la première question. En effet, aux élèves qui inversent réactifs et produits, s'ajoutent ceux qui répondent de manière identique aux deux questions : pour ces élèves, « 4Na et O_2 » sont les réactifs *et* les produits. Nous posons l'hypothèse que la présence d'un même nombre d'éléments à gauche et à droite de la flèche de réaction laisse entendre, pour une poignée d'élèves, que ces éléments font à la fois partie des réactifs et des produits. De nouveau, on retrouve ici la confusion entre ce qui *compose* les réactifs/produits (les éléments représentés par les symboles pris isolément) et ce que *sont* les réactifs/produits (les substances représentées par les formules chimiques).

Ensuite, 10 élèves (sur 26) proposent une écriture symbolique qui ne correspond ni aux réactifs, ni aux produits. Certains omettent un indice (« NaO ») ou en ajoutent un nouveau (« Na_2O_2 »). D'autres (5 élèves) séparent la formule de l'oxyde de sodium en deux parties distinctes de type « Na_2 et O » ou « $2Na_2$ et O ». Ces écritures sont des produits de ce que nous avons appelé, au chapitre 2, l'interprétation additive des corps composés. Pour rappel, celle-ci se fonde sur l'idée que les corps composés sont des juxtapositions de corps purs simples qui ont conservé leur intégrité, et qu'il est possible de réobtenir par séparation. Une écriture comme « Na_2 et O » est représentative d'une

telle interprétation ; elle rend compte de la volonté d'extraire les corps simples constituant le corps composé Na_2O[12].

Enfin, le manque de maîtrise de la nomenclature et de la signification des indices peut constituer un écueil : 3 élèves proposent ainsi des termes incorrects (dioxyde de sodium, sodium dioxygène, monoxyde de sodium). Ce phénomène est à rapprocher de l'incertitude montrée par certains des apprenants testés quand il s'agit de nommer un oxyde (pour rappel, 9 % de tentative de désignation pour les produits, contre 19 % pour les réactifs).

Parmi les productions d'élèves, on relève l'expression « mélange des réactifs »[13] employée par un élève pour définir les produits. Cette représentation est renforcée par le fait qu'il n'y a pas d'autre produit que l'oxyde de sodium. Tout se passe donc, pour cet élève, comme si les réactifs se combinaient après contact en une substance unique, « produit » du mélange, ce qui correspond au processus de mélange en chimie. L'apprenant risque donc de projeter les propriétés d'un mélange sur la réaction de combustion. Il adviendrait alors que, pour cet élève, il soit possible de séparer le sodium et l'oxygène, comme l'on sépare le sel et l'eau : les techniques physiques de séparation seraient confondues avec les techniques chimiques de décomposition.

Avant de passer à la suite de l'analyse, soulignons, par deux exemples, l'influence des professeurs et de la culture d'établissement sur les propositions des élèves. Premièrement, le recours à la nomenclature varie en fonction des groupes testés, et donc des écoles. Ainsi, le groupe issu de l'école A présente un taux de réponses associant la nomenclature trois fois plus important que les autres groupes[14]. Dans cette école, les professeurs de chimie ont pour habitude de tester régulièrement les élèves sur leur maîtrise de la nomenclature, érigeant cette compétence en une priorité du cours, tandis que les deux autres établissements testés ne déclarent pas une telle politique. Deuxièmement, les écritures symboliques du produit de type « $Na_2 + O$ » proviennent toutes du même groupe, en l'occurrence une cohorte de 18 élèves de sciences générales fréquentant l'école B. Ce phénomène pose question : dans quelle mesure les dispositifs didactiques mis en œuvre par les professeurs de cette école ont-ils renforcé ou favorisé le maintien de l'interprétation additive dans l'esprit de certains apprenants ? Une recherche complémentaire future permettrait d'éclairer cette problématique.

[12] Nous verrons, dans le dernier chapitre, que l'interprétation additive trouve un prolongement dans les représentations microscopiques iconiques des corps purs composés.
[13] Voir le point 7.5.7 de ce chapitre pour le lien entre mélange et réaction chimique.
[14] Voir l'annexe H.

7.5.3. Le signe « + » entre chimie et mathématiques (Q3)

Le tableau 4 regroupe les réponses des élèves à la question : « Que signifie le "+" à gauche de la flèche ? ».

Comme attendu, vu la polysémie annoncée du signe « + », nous avons relevé un nombre très important de réponses différentes, que nous avons regroupées en catégories tantôt plus générales, tantôt plus précises. La catégorisation que nous proposons s'appuie sur des articles de recherches dans lesquelles ont été relevées les principales conceptions des élèves à propos du signe « + » (Taskin et Bernholt, 2014 ; Liu et Taber, 2016).

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Réaction / réagit avec	38	29 %
Ensemble des réactifs / avec / et / mis en contact	34	26 %
Addition / somme	23	18 %
Mélange	16	12 %
Ajout	15	11 %
Pas de réponse	2	2 %
Réponses incorrectes	2	2 %

Tableau 4. Nombre d'élèves et fréquences relatives des réponses regroupées par catégories à la troisième question du test : « Que signifie le "+" à gauche de la flèche ? ».

Ce tableau souligne le fait que le signe « + » véhicule de nombreuses significations, regroupées dans cinq catégories (de fréquence relative supérieure à 10 %), chacune d'entre elles regroupant les réponses sémantiquement proches :

1) Le « + » en tant que **symbole de la réaction chimique** (« réaction / réagit avec » : 29 % de la cohorte). C'est une signification très intéressante en ce qu'elle est habituellement prêtée à la flèche de réaction. Elle semble provenir de la lecture d'une équation de réaction (A + B ⟶ C + D) en une phrase-type comme « le réactif A *réagit avec* le réactif B pour former le produit C et le produit D » (Gibson, 1975 ; McQuarrie *et al.*, 1992). Cette hypothèse est renforcée par la fréquence relative importante de la combinaison stricte « réagit avec » (7 % des élèves). Cependant, cette signification peut engendrer des difficultés de compréhension dans le cas d'équations de réaction où le signe « + » est présent de part et d'autre de la flèche. Les élèves se trouveraient alors face à deux significations différentes du signe « + » : en tant que symbole de la réaction du côté des réactifs (« réagit avec ») et en tant que symbole d'ensemble du côté des produits (« et »). Une telle situation peut générer un conflit dans les représentations des apprenants, dont l'issue heureuse serait le remplacement de la vision du « + » en tant que symbole de réaction par une autre interprétation plus pertinente.

Bien entendu, la représentation du signe « + » comme symbole de la réaction peut être classée dans les trois niveaux de signification chimique : simple traduction automatique d'un système sémiotique à un autre (langue symbolique vers langue ordinaire modifiée), réaction chimique entre substances[15] (macroscopique) ou réaction chimique entre entités moléculaires ou atomiques (microscopique). Ces relations sont schématisées à la figure 11.

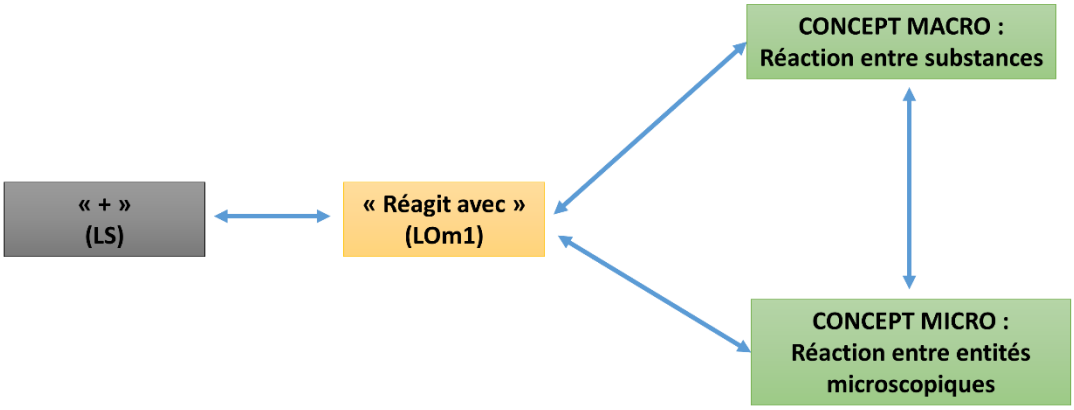


Figure 11. Représentation des relations entre le signe « + », la désignation « réagit avec » et les concepts chimiques macroscopiques et microscopiques qui lui sont associées.

2) Le « + » en tant que **symbole d'« ensemble »** (« ensemble des réactifs / avec / et / mis en contact » : 26 % de la cohorte). C'est une catégorie qui se trouve également intégrée dans plusieurs niveaux de signification. Au niveau symbolique, l'élève peut avoir simplement traduit le « + » dans la langue ordinaire sous la forme de « avec » ou « et » (qui constitue la combinaison stricte la plus fréquente – 11 % des élèves), ou regroupé les signes à gauche de la flèche dans un ensemble constitué autour du signe « + ». Une formulation telle que « mis en contact » peut potentiellement être reliée au niveau microscopique (mise en contact de particules) ou macroscopique (mise en contact de substances).

3) Le « + » en tant que **symbole d'addition** (« addition / somme » : 18 % de la cohorte). C'est une signification essentiellement ancrée dans le niveau symbolique. Elle s'inscrit dans la conceptualisation de l'équation de réaction en tant qu'équation mathématique, répondant (potentiellement) à la loi de conservation de la masse. Si cette réponse reste pertinente dans le cadre de la loi de Lavoisier, il serait par contre erroné de limiter l'équation de réaction à une simple formule vérifiant des égalités. Cette signification doit donc être complétée par des applications plus qualitatives du signe « + ». Par ailleurs, une réponse

[15] Le concept de transformation chimique en tant qu'observation empirique du phénomène chimique n'est pas apparu dans le programme de chimie avant 2014.

stricte comme « addition des deux réactifs » (8 % des élèves) indique une utilisation plus prosaïque du signe « + » : ce n'est pas tant la conservation de la masse (ou des atomes) qui est en jeu qu'une simple traduction symbolique du signe « + » dans la langue ordinaire modifiée des mathématiques. Cette interprétation du signe « + » est plus fréquente dans le groupe d'élèves de science de base que dans les groupes de sciences générales[16].

4) Le « + » en tant que **symbole de mélange** (12 % de la cohorte) ou **d'ajout** (11 % de la cohorte). Ce sont des significations essentiellement situées au niveau macroscopique, sans pour autant exclure complètement la possibilité de mélanges imaginés au niveau microscopique. À ce stade de l'apprentissage de la chimie, l'usage des termes « mélange » ou « ajout » s'applique en effet plus fréquemment aux substances et aux gestes techniques de travaux pratiques qu'aux entités microscopiques.

Les significations que les élèves donnent au signe « + » s'étendent donc sur les trois niveaux de signification. Le signe « + » peut incarner, aux yeux des élèves, l'ensemble des réactifs (mis en contact, par mélange ou par ajout), la réaction chimique en elle-même ou un symbole dans l'expression des égalités qui sous-tendent l'équation de réaction (figure 12).

Cette polysémie constitue une force et une faiblesse. Riche de significations, le signe « + » renvoie à différents niveaux de signification relevant du qualitatif et du quantitatif ; mais cette charge sémantique oblige les élèves à une fine prise en compte du contexte pour pouvoir sélectionner la signification ad hoc dans une situation donnée.

Remarquons la très faible occurrence de réponses jugées incorrectes (1 %), conséquence d'un choix de notre part : considérer l'ensemble des significations proposées par les élèves et tenter d'y trouver du sens chimique, et ce même si certains concepts sont incorrectement exprimés dans la réponse (par exemple, une confusion entre atome et molécule). Il s'avère que la quasi-totalité des réponses des élèves présentent une signification pouvant être reliée à l'un des niveaux de signification, et donc mener à divers degrés de compréhension du phénomène chimique.

[16] Voir l'annexe H.

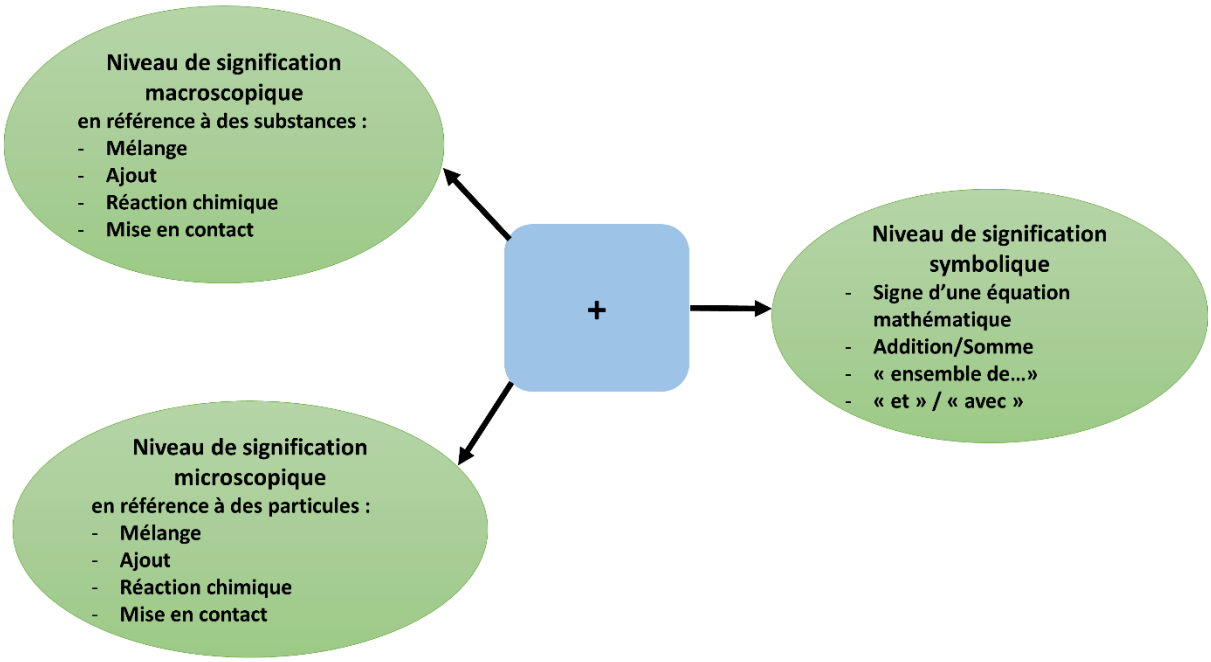


Figure 12. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés au signe « + » dans une équation de réaction.

Pour finir, passons en revue quelques réponses particulièrement éloquentes issues des productions d'élèves.

- Certains apprenants considèrent l'équation chimique d'un point de vue mathématique et précisent que le signe « + » signifie « l'ajout de ce qui est à gauche du "+" à ce qui se trouve à droite du "+" », ou encore qu'il représente « l'addition de deux réactifs sous forme de calcul » (figure 13). Le signe « + » peut même être ajouté pour « compléter la réaction », ce qui, pour ces élèves, souligne le lien entre le signe « + » et la démarche de pondération des équations chimiques.

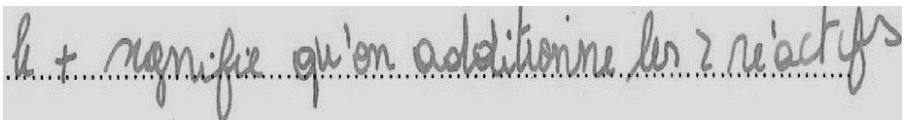


Figure 13. Exemple de réponse d'élève à la troisième question du test : « Que signifie le "+" à gauche de la flèche ? » ; exemple-type associé à une interprétation mathématique du signe « + ».

- Pour d'autres élèves, le signe « + » indique un lien entre les réactifs. On l'a vu, ce lien est diversement nommé dans les productions issues de notre échantillon : « mélange », « mise en contact », « mise en présence », « addition », « combinaison », etc. On trouve également des termes comme « fusion des deux réactifs » ou « liaison entre les deux réactifs », qui, aux yeux de ces élèves,

paraissent plus proches de la réaction chimique qu'une simple mise en contact (figure 14).

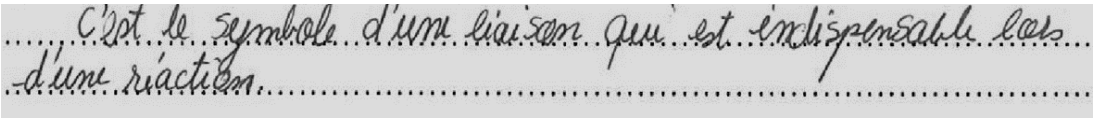

C'est le symbole d'une liaison qui est indispensable lors d'une réaction.

Figure 14. Exemple de réponse d'élève à la troisième question du test : « Que signifie le "+" à gauche de la flèche ? » ; exemple-type associé à la mise en évidence d'un lien entre réactifs.

- Enfin, une production montre une circulation volontaire entre la langue symbolique et les concepts chimiques macroscopiques : « ajout d'un réactif dans l'équation et dans l'expérience chimique » (figure 15). Cet élève semble avoir construit un lien entre ce que l'on ajoute dans l'équation chimique et ce que l'on ajoute dans l'expérience concrète, quittant ainsi le niveau de signification symbolique pour accéder à d'autres niveaux de signification.

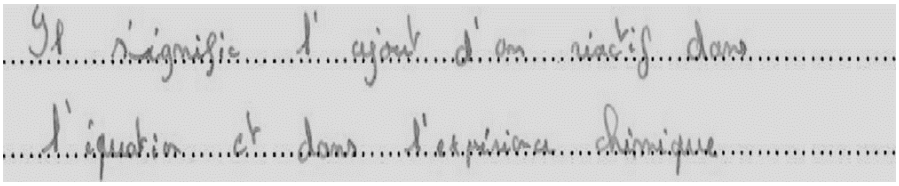

Il signifie l'ajout d'un réactif dans l'équation et dans l'expérience chimique

Figure 15. Exemple de réponse d'élève à la troisième question du test : « Que signifie le "+" à gauche de la flèche ? » ; exemple-type associé à une circulation explicite entre la langue symbolique et les concepts chimiques.

7.5.4. La flèche de réaction : suivez le guide (Q4)

Le tableau 5 présente les grandes catégories de réponses et quelques combinaisons strictes les plus fréquentes, issues des réponses à la question : « Que signifie la flèche ? »

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former/donner/autre »	49	38 %
dont « réagissent pour former »	21	16 %
« réagissent pour donner »	15	12 %
autre réponse	13	10 %
« Devient / forme / donne /… »	22	17 %
dont « forment »	6	5 %
« donnent »	6	5 %
autre réponse	10	7 %
Réaction / transformation	20	15 %
Indique les produits / le résultat de la réaction	19	15 %
« pour former / pour donner »	11	8 %
Indique le sens de la réaction	4	3 %
Égal / « équivaut »	4	3 %
Pas de réponse	1	0,8 %

Tableau 5. Nombre d'élèves et fréquences relatives par catégories de réponses à la quatrième question du test : « Que signifie la flèche ? »

En effet, devant la relative similarité de certaines réponses, il nous a paru intéressant de les regrouper dans des catégories plus larges. Nous avons ainsi créé cinq grandes catégories de significations liées à la flèche de réaction, de fréquence relative supérieure à 7 %.

1) Une catégorie regroupe les expressions de type **« réagissent pour donner/former/ autre verbe »** (38 %). Celles-ci, qui sont aussi les combinaisons strictes les plus fréquentes, trouvent leur place dans une des lectures possibles de l'équation chimique. Une équation de réaction de type « A + B ⟶ C + D » peut en effet se lire en une phrase standardisée telle que « le réactif A et le réactif B réagissent pour former le produit C et le produit D ». Dans ce cas, la flèche de réaction convoie à elle seule le fait réactionnel et l'idée de transformation en une autre substance, alors que le signe « + » est traduit par le terme « et ». Cette expression est particulièrement fréquente dans deux des trois établissements testés (tableau 6) avec un pic de fréquence à 73 % dans le cas de l'école C. En effet, d'après le témoignage de professeurs de chimie de l'école C, des lectures moléculaires et molaires de l'équation chimique, comprenant l'expression « réagissent pour former » sont régulièrement demandées aux élèves.

Réponses	École A	École B	École C
« Réagissent pour donner/former »	47 %	5 %	73 %
« Devient / forme / donne /… »	32 %	18 %	23 %
Réaction / transformation	9 %	26 %	0 %
Indique les produits / le résultat de la réaction	6 %	33 %	0 %
Idem que le signe égal, « équivaut »	2 %	5 %	0 %

Tableau 6. Nombre d'élèves et fréquences relatives par principales catégories de réponses à la quatrième question du test : « Que signifie la flèche ? », par cohortes scindées en fonction de l'établissement.

2) Une autre catégorie reprend les réponses d'élèves qui contiennent les expressions **« pour former » ou « pour donner »** (8 %). Ces expressions s'insèrent dans une autre lecture de l'équation chimique : « le réactif A réagit avec le réactif B pour former le produit C et le produit D » (McQuarrie *et al.*, 1992). La signification donnée au signe « + » influence celle que l'élève donne à la flèche : le fait réactionnel ayant été déplacé sur le signe « + », la flèche de réaction indique plutôt le but de la réaction, son issue, en l'occurrence la formation de produits.

3) La troisième catégorie collecte les réponses qui font appel à un **verbe de transformation** (former, donner, devenir, etc.), tout en n'empruntant pas les structures syntaxiques constituant les deux premières catégories (17 %). Ces significations proviennent d'un troisième type de lecture de l'équation chimique « A + B ⟶ C + D » : « la réaction entre le réactif A et le réactif B donne/forme les produits C et D » ou « après réaction, le réactif A et le réactif B deviennent les produits C et D ». L'aspect réactionnel est ici lié à l'ensemble de l'équation chimique, et non à l'un ou l'autre des signes qui la composent.

4) La quatrième catégorie rend compte des réponses qui font référence à une **signification particulière du symbole « flèche » hors du cadre strict de la chimie** : la flèche indique un objet ou l'endroit où se trouve un objet (15 %). Comme dans le cas d'une flèche indiquant la position d'une personne sur une carte, la flèche de réaction aurait pour objectif principal d'indiquer les produits (en tant que résultat de la réaction), c'est-à-dire montrer leur localisation dans l'expression symbolique (figure 16).

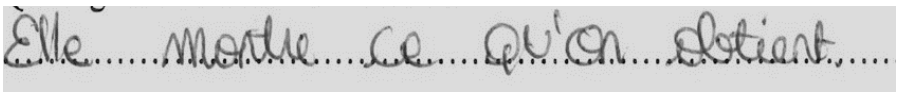


Figure 16. Exemple de réponse d'élève à la quatrième question du test : « Que signifie la flèche de réaction ? » ; exemple-type associé à une interprétation de la flèche comme un indicateur d'objets.

On s'aperçoit ici de l'importance de la polysémie d'un symbole, surtout quand ces significations sont d'usage en-dehors de la discipline ciblée.

5) Enfin, une cinquième catégorie se dessine en regroupant les réponses d'élèves qui font explicitement référence au fait qu'il y a (ou qu'il y a eu) **réaction ou transformation** (15 % des élèves). Nous considérons, dans cette catégorie, les réponses d'élèves qui ne présentent pas d'expressions verbales balisées comme « réagissent pour former » ou des verbes de transformation répondant à des trames de lecture de l'équation chimique (former, devenir, etc.) ; ces élèves vont (souvent brièvement) spécifier que la flèche de réaction symbolise le fait qu'une réaction s'opère ou s'est opérée. Cette signification est bien entendu pertinente en ce qu'elle associe la flèche de réaction au concept chimique qu'elle représente effectivement. Elle est particulièrement fréquente dans l'école B par rapport aux deux autres établissements (tableau 6). Nous posons l'hypothèse que, dans l'école B, les lectures de l'équation chimiques sont beaucoup moins utilisées par les professeurs de chimie en troisième et quatrième année de l'enseignement secondaire. La flèche est alors moins souvent traduite par un verbe de transformation ou par une expression comme « réagissent pour former ».

Ajoutons enfin deux catégories beaucoup moins fréquentes mais qui complètent le panorama des significations entourant la flèche de réaction : la flèche comme indicateur du sens (en tant que direction privilégiée ; 3 % de la cohorte) et la flèche comme équivalent du signe « = » (3 %). Dans le premier cas, la flèche représentée (ici, simple flèche à double pointe) est vue comme un symbole parmi les autres flèches de réaction possibles. En effet, si la flèche indique le sens de la réaction chimique, c'est que celui-ci fait l'objet d'un doute. Nous pouvons imaginer que les élèves ayant répondu de cette manière ont en tête la possibilité qu'il existe des réactions incomplètes, ainsi qu'un symbole qui leur serait propre (deux flèches à simple pointe). Dans le deuxième cas, la flèche est traduite par un signe égal qui rend compte de la loi de conservation de la masse de Lavoisier, et/ou de la reconstruction d'une équation algébrique quantitative. Une telle traduction constituerait un retour possible à une interprétation plus mathématique de l'équation de réaction, au détriment de ses aspects chimiques.

En conclusion, plus de 80 % des élèves répondent soit en conférant à la flèche le sens de « (les réactifs) réagissent pour donner, pour former (les produits) », soit en faisant référence explicitement à la réaction chimique sous-jacente, ou encore en remplaçant la flèche par des verbes associés à l'idée de changement comme « devenir » ou « former ». La signification de la flèche en tant que symbole de la réaction chimique (ou, plus probablement, d'un « changement » à définir plus précisément) est donc a priori largement intégrée par les élèves, même si un doute subsiste : la flèche fait davantage l'objet d'une traduction en une expression verbale dans la langue ordinaire que d'une explicitation réelle de la signification que les élèves lui donneraient au niveau chimique.

La flèche de réaction peut potentiellement être associée aux trois niveaux de signification de notre modèle théorique (figure 17). Les traductions littérales

automatiques, les références à un sens de lecture ainsi que l'analogie entre la flèche et le signe égal sont à placer au niveau de signification symbolique. Ensuite, le fait de faire référence à la réaction chimique en précisant les entités microscopiques ou en citant la rupture et la formation de liaisons chimiques renvoie à un niveau de signification microscopique. Enfin, une production rendant compte de substances qui entrent en réaction ou d'un sens associé à la transformation chimique se situe au niveau de signification macroscopique.

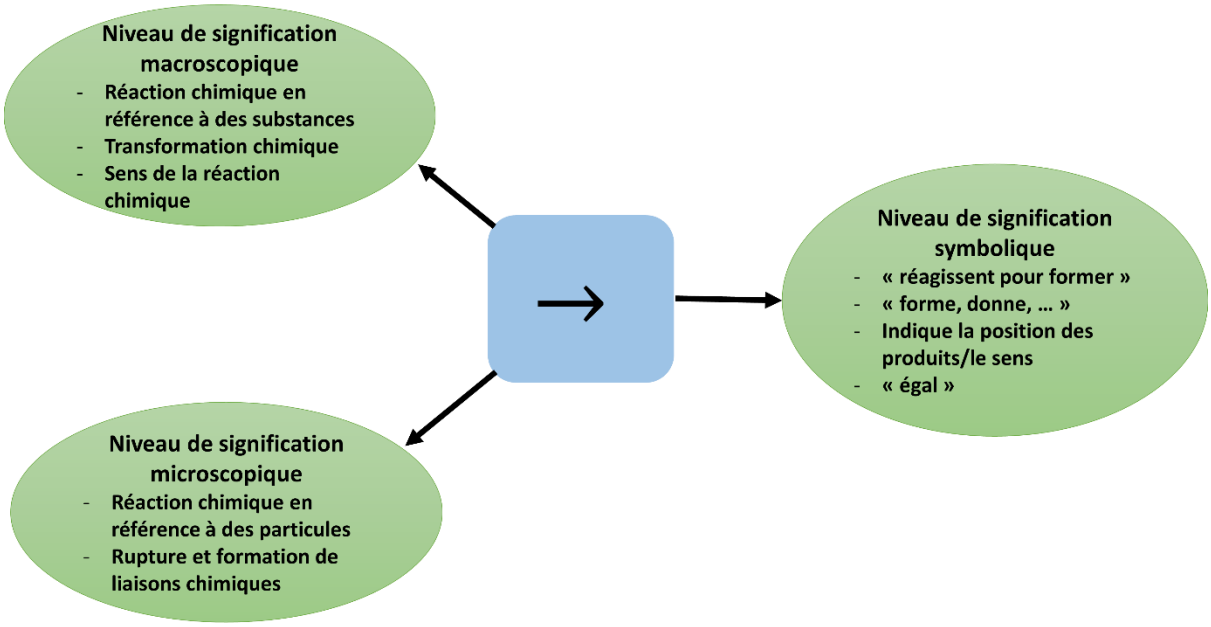


Figure 17. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés à la flèche dans une équation de réaction.

7.5.5. Le coefficient stœchiométrique : un carrefour sémantique (Q5)

Nous avons demandé aux élèves sondés de préciser la signification du coefficient stœchiométrique « 4 » dans l'équation de combustion du sodium. L'analyse de leurs réponses montre que le coefficient stœchiométrique véhicule un grand nombre de significations diverses chez les élèves de grade 11 de notre échantillon (tableau 7).

Devant la variété des réponses collectées, nous avons constitué des catégories de réponses rendant compte de significations communes. Par exemple, dans la catégorie « Nombre de molécules », nous intégrons toute réponse faisant explicitement référence au concept de molécule, que l'élève précise ou non le corps concerné (« molécules de sodium » ou « molécules de Na ») ou qu'il fasse référence à d'autres significations dans la même réponse (par exemple, « coefficient et nombre de molécules de sodium »).

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Nombre de molécules	43	33 %
Nombre d'atomes	33	24 %
Nombre de moles	27	21 %
Pondération	17	13 %
Nombre (de Na, de sodium)	11	8 %
Nécessaire à la réaction	11	8 %
Proportion	8	6 %
Coefficient	5	4 %

Tableau 7. Nombre d'élèves et fréquences relatives par catégories de réponses à la cinquième question du test : « Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ? »

Chaque signification se définit par des caractéristiques et des implications spécifiques.

1) Pour 33 % des élèves testés, le coefficient « 4 » dans l'expression « 4Na » représente un **nombre de molécules**. Cette interprétation a deux origines potentielles. Premièrement, il est possible que ces élèves aient mémorisé une définition du coefficient stœchiométrique de type : « chiffre indiquant un nombre de molécules ». Ils projettent dès lors cette définition sur toute formule ou symbole chimique situé derrière le coefficient. Deuxièmement, une telle réponse peut être provoquée par une confusion entre molécule et atome. Dans l'enseignement secondaire en Belgique francophone, le caractère moléculaire de certains corps est élargi à toute la matière[17], ce qui englobe également les corps purs élémentaires comme le sodium.

   Il est intéressant de noter que, dans cette catégorie, le symbole « Na » est cité à 35 reprises, alors que le terme « sodium » ne l'est qu'à six reprises. Ce résultat complémentaire nuance quelque peu l'appartenance à l'un ou l'autre niveau de signification. En effet, si la référence à la molécule semble relier ce type de réponse au niveau de signification microscopique, il apparaît que l'usage du symbole « Na » confère à la réponse une dimension symbolique. Une question se pose alors : n'est-on pas ici devant un usage automatique du coefficient stœchiométrique en tant que « nombre de molécules », sans connexion réelle avec le concept chimique de molécule ? Le cas échéant, l'utilisation du terme « molécule » dans les productions d'élèves ne peut plus garantir que ceux-ci font référence à des entités microscopiques chimiques dont ils reconnaissent la spécificité et les caractéristiques. Enfin, il est à noter que cette signification est souvent citée sans faire référence à d'autres significations complémentaires, ce qui renforce l'hypothèse d'une automaticité de la production de l'élève.

[17] Voir le chapitre 1.

2) Le coefficient indique le **nombre d'atomes** de sodium (ou de « Na ») pour environ un quart des élèves de l'échantillon. Ce résultat est significatif, car il est soutenu par trois comportements pertinents chez l'apprenant. D'abord, ces élèves reconnaissent l'atome de sodium dans le symbole « Na », ce qui montre un dépassement du modèle moléculaire vu dans les premières années de l'enseignement secondaire. Ensuite, ils adaptent la définition du coefficient stœchiométrique en tenant compte de la variété des corps : certains sont atomiques quand d'autres sont moléculaires. Enfin, on trouve le terme « sodium » dans environ la moitié des réponses émergeant de cette catégorie, ce qui souligne la capacité de ce type d'élèves à convertir explicitement les éléments de la langue symbolique des chimistes en des éléments de langage appartenant à d'autres systèmes sémiotiques. Ajoutons, pour terminer le tableau, que cette signification « atomique » du coefficient est parfois combinée avec une autre signification (10 élèves sur 33), ce qui renforce l'idée d'une circulation entre systèmes sémiotiques et entre significations.

3) Pour 21 % des élèves testés, le coefficient stœchiométrique permet d'avoir accès à une **quantité de matière** initiale (ou nombre de moles). La question de la quantité de matière est abordée en quatrième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone, c'est-à-dire après l'établissement des premières équations (et donc des premières significations) en troisième année. La traduction du coefficient en un nombre de moles donné est un passage important qui peut a priori amener à la prise en compte du coefficient en tant que proportion ou ratio réactionnel. La fréquence mesurée est plus faible qu'attendu, compte tenu de la relative proximité entre le temps d'enseignement-apprentissage et le temps de soumission du test ; manifestement, la signification « nombre de moles » n'a pas détrôné les premières significations installées en troisième année. Ce constat émerge si l'on considère l'ensemble de l'échantillon. Mais si l'on se focalise sur l'un des groupes testés (en l'occurrence, le groupe d'élèves de l'école A), on observe une nette prévalence de la signification « nombre de moles » (47 % des élèves – voir tableau 8).

Réponses	École A	École B	École C
Nombre de moles	47 %	4 %	12 %
Nombre de molécules	23 %	39 %	38 %
Nombre d'atomes	15 %	26 %	42 %
Pondération	13 %	11 %	19 %
Proportion	13 %	0 %	8 %
Coefficient	11 %	0 %	0 %
Nombre (de Na, de sodium)	0 %	19 %	0 %

Tableau 8. Nombre d'élèves et fréquences relatives par catégories de réponses à la cinquième question du test : « Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ? », par cohortes scindées en fonction de l'établissement.

Ce résultat montre l'importance du professeur et des dispositifs didactiques qu'il met en place vis-à-vis de l'élargissement du contenu sémantique des symboles utilisés dans l'équation de réaction. La conversion du coefficient en un nombre de moles, cependant, reste associée, pour 2/3 des élèves, au symbole « Na » (dans une réponse de type « c'est le nombre de moles de Na »). De la même manière que le coefficient peut être automatiquement traduit en un nombre de molécules sans compréhension aucune du concept véhiculé, le coefficient peut être converti en un nombre de moles sans que le concept macroscopique de mole ne soit effectivement assimilé. Notons que ce type de signification est proposé dans des livres de référence universitaires (par exemple, Atkins et Jones, 1998).

4) Pour 13 % des élèves, le coefficient stœchiométrique est un **chiffre pour pondérer** l'équation de réaction. La dimension symbolique d'une telle réponse est évidente : le coefficient stœchiométrique est ici le fruit de la démarche algorithmique consistant à répartir également le nombre de symboles chimiques de chaque type de part et d'autre de la flèche de réaction.

5) Suivent alors deux catégories qui regroupent des réponses présentant un faible degré de précision.

D'abord, le coefficient serait **« nécessaire à la réaction chimique »** (8 % des élèves). On voit que ces élèves ont perçu le rôle important des coefficients, sans pour autant être capables de préciser s'il s'agit d'un rôle dans la démarche de pondération des équations ou dans la réalisation effective d'une réaction chimique via une proportion à vérifier dans les quantités initiales.

Ensuite, le coefficient indiquerait **un nombre de « Na »** (8 % des élèves). Ce petit groupe d'élèves ne se prononce pas sur le contenu sémantique du symbole « Na » (molécule, atome, mole), mais se limite à une interprétation symbolique : le coefficient donne le nombre de symboles (ou de formules chimiques) dans l'équation chimique. Ces productions, volontairement ou involontairement imprécises, constituent des signaux utiles pour les professeurs afin de cerner les

élèves éprouvant des difficultés à prêter des significations pertinentes aux symboles de l'équation chimique.

6) Terminons par la signification la moins fréquente (si l'on exclut la traduction en la désignation « coefficient ») : le coefficient « 4 » indique une **proportion** qui permet à la réaction chimique de s'effectuer (6 % - 8 élèves). La signification « proportion » semble subir la concurrence de significations apprises plus tôt dans le cursus : nombre de molécules, nombre d'atomes, chiffre pour pondérer, et finalement, nombre de moles. La signification « proportion » existe toujours en complément ou en support d'une autre signification du coefficient. Il semble en effet nécessaire pour l'élève de préciser s'il s'agit d'une proportion moléculaire, atomique ou molaire. Plus encore, on retrouve dans les productions des élèves un lien entre les réactifs et les produits, comme dans la réponse : « La proportion est de 4 Na pour 1 O_2 afin de former 2 Na_2O ». Cette représentation du ratio réactionnel sera très utile au moment de prédire des quantités produites à partir de quantités initiales de réactifs. Notons que la distribution de cette catégorie de réponse dans les sous-groupes testés est loin d'être uniforme. Le groupe issu de l'école A fournit 75 % de l'ensemble des élèves ayant envisagé le coefficient comme une proportion, alors qu'aucun élève de l'école B n'a produit ce type de réponse (tableau 8).

À la lecture de ces résultats, nous pouvons représenter les différentes significations du coefficient stœchiométrique en fonction du moment théorique de leur enseignement-apprentissage dans les curricula officiels (figure 18) au regard de leurs fréquences relatives dans notre échantillon. On observe que les premières significations sont plus fréquemment évoquées que les dernières. Il faut cependant nuancer ce phénomène en analysant les résultats en fonction des groupes testés (et donc, de l'établissement). La figure 19 montre une distribution des fréquences pour le groupe d'élèves issus de l'école A : pour celui-ci, les significations de quatrième année sont plus fréquentes que celles associées à la troisième année (si l'on considère les programmes du réseau libre catholique avant et après 2014).

PLACE DANS LE PROGRAMME	SIGNIFICATIONS DU COEFFICIENT	FRÉQUENCE RELATIVE
Début de troisième année	« Nombre de molécules »	33 %
Fin de troisième année	« Nombre d'atomes » - « chiffre pour pondérer »	24 % - 13 %
Début de quatrième année	« Nombre de moles »	21 %
Milieu de quatrième année	« Proportion – ratio réactionnel »	6 %

Figure 18. Schéma des relations entre les moments programmés d'enseignement-apprentissage des diverses significations du coefficient stœchiométrique et leur fréquence relative dans l'échantillon d'élèves testés.

SIGNIFICATIONS DU COEFFICIENT	FRÉQUENCE RELATIVE (école A)	FRÉQUENCE RELATIVE (école B)	FRÉQUENCE RELATIVE (école C)
« Nombre de molécules »	23 %	39 %	38 %
« Nombre d'atomes » - « chiffre pour pondérer »	15 % - 13 %	26 % - 11 %	42 % - 8 %
« Nombre de moles »	47 %	4 %	12 %
« Proportion – ratio réactionnel »	13 %	0 %	8 %

Figure 19. Schéma des relations entre les moments programmés d'enseignement-apprentissage des diverses significations du coefficient stœchiométrique et leur fréquence relative dans les groupes testés (établissements différents).

Cette grande variabilité peut s'expliquer par l'hétérogénéité des groupes-classes et par les dispositifs didactiques mis en œuvre par les professeurs concernés. Il ressort toutefois que des parcours scolaires différents et des pratiques enseignantes différentes engendrent malgré tout un même phénomène pour les trois établissements : les premières significations du coefficient, issues de la troisième année, sont encore massivement présentes à la moitié de la cinquième année de l'enseignement secondaire.

En conclusion, le coefficient stœchiométrique constitue un carrefour entre niveaux de signification (figure 20) : il renvoie au niveau de signification symbolique (nombre de « Na », chiffre pour pondérer, traduction automatique en un nombre de molécules ou de moles), au niveau de signification microscopique (molécules de sodium, atomes de sodium, proportion moléculaire ou atomique) et au niveau de signification macroscopique (nombre de moles, proportion molaire).

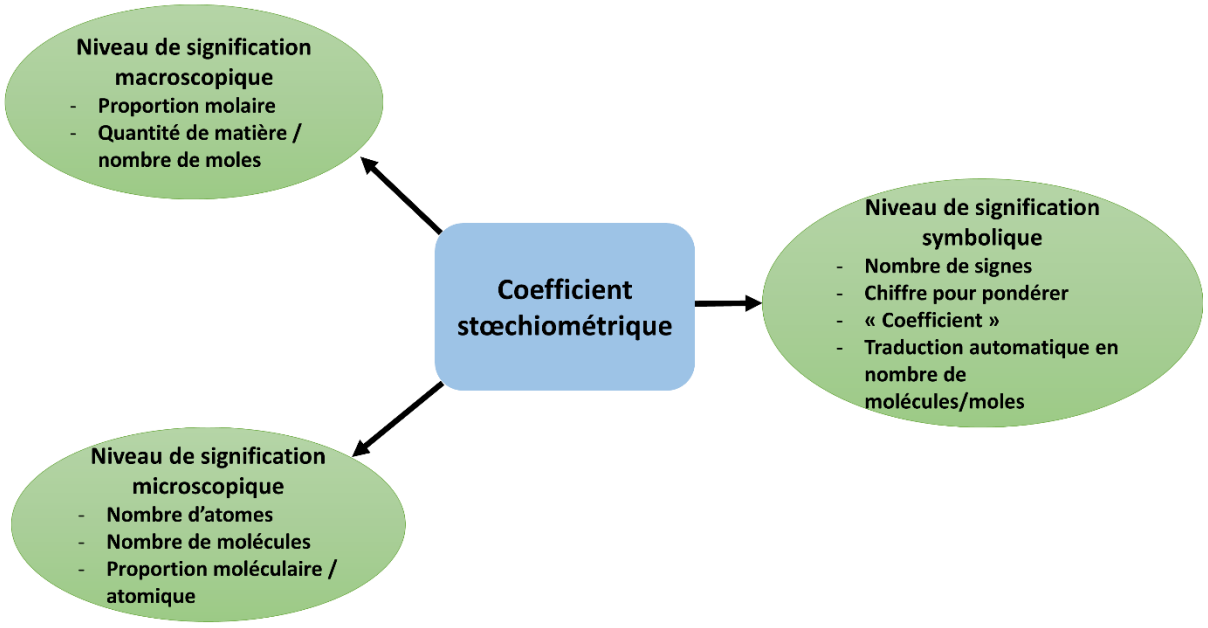


Figure 20. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au coefficient stœchiométrique dans une équation de réaction.

7.5.6. L'indice entre nombre d'atomes, proportion et valence (Q6)

Moins associé à l'équation de réaction qu'à la nomenclature et aux formules moléculaires, l'indice génère lui aussi des significations diverses dans l'esprit des élèves. En réponse à la question : « Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ? », on dénombre trois types d'éclairages donnés par les élèves, repérés soit seuls, soit (mais bien plus rarement) en combinaison (tableau 9) :

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Nombre de sodium (molécules ou atomes) dans la « molécule » d'oxyde de sodium	50	38 %
Nombre de sodium (molécules ou atomes) en rapport avec l'oxygène (2 pour 1)	34	26 %
Lié à la valence de l'oxygène	25	19 %
Utilisation du terme « indice »	19	15 %
Réponses incorrectes	19	15 %

Tableau 9. Nombre d'élèves et fréquences relatives par catégories de réponses à la sixième question du test : « Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ? »

1) Pour un groupe important d'élèves (50 élèves, 38 % de la cohorte), l'indice donne le **nombre d'entités « sodium » dans la « molécule »** d'oxyde de sodium. Sur les 50 élèves de cette catégorie, 42 se sont prononcés sans précision supplémentaire, alors que 8 élèves développent quelque peu leurs réponses en faisant référence aux valences ou à la pondération. L'indication d'un simple nombre semble donc généralement suffisante pour décrire la signification d'un indice, sans référer à l'atome partenaire : nous parlons alors de définition « absolue » de l'indice.

   On observe par ailleurs une grande variété de compléments au nombre, semblables à ceux observés pour le coefficient stœchiométrique : nombre d'atomes, nombre de molécules[18], nombre de Na, voire nombre de sodium. Le choix de l'entité semble dépendre de la tâche impliquant l'utilisation de l'indice. En effet, l'indice en tant que nombre d'entités est une signification ancrée dans la démarche de construction des formules chimiques. Quelques élèves précisent ainsi que l'indice est lié au fait d'« équilibrer » la molécule (figure 21), c'est-à-dire au fait qu'il faut égaler les valences ou le nombre de bras de valence en multipliant le nombre de sodium par deux (voir chapitre 1).

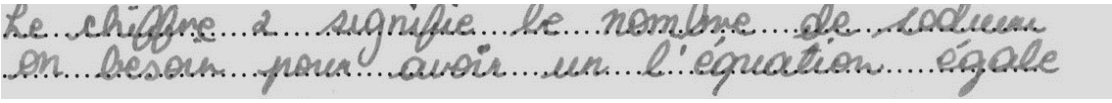


Figure 21. Exemple de réponse d'élève à la sixième question du test : « « Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ? » » ; exemple-type associé à une démarche visant à « équilibrer » la molécule.

   Mais cette interprétation est également issue du processus de déconstruction de la formule moléculaire, dans le but d'« équilibrer » une équation chimique. Dans ce cas, le nombre de sodium dans la molécule d'oxyde de sodium est mis en

[18] Comme dans le cas du coefficient stœchiométrique, nous n'avons pas classé les réponses de type « nombre de molécules de sodium » dans les réponses incorrectes, afin, d'une part, de ne pas cacher une utilisation correcte de l'indice (nombre de « quelque chose » dans une combinaison), et, d'autre part, de souligner la fréquence de cette signification dans l'esprit des élèves.

relation avec le nombre de sodium chez les réactifs. On remarque donc que la démarche de pondération (ou, plus précisément, une recherche d'équilibre) s'applique, chez certains élèves, tant à la molécule en équilibrant le nombre de bras de valence, qu'à l'équation de réaction en équilibrant le nombre d'atomes.

2) 34 élèves (26 % de la cohorte) ne se contentent pas de citer le nombre de sodium, mais ajoutent que ce nombre est **lié à la quantité d'oxygène** présent dans la molécule. Cette fois, c'est le rapport de proportionnalité entre les atomes formant la molécule qui est au centre de la production de l'élève : nous parlerons alors de définition « relative » de l'indice. Ce rapport « deux pour un » est décrit en fonction de trois angles distincts. D'abord, certains élèves présentent un fait mathématique, produit de leur démarche de dénombrement : la molécule est composée de deux atomes de Na et d'un atome de O. D'autres précisent ensuite que les deux atomes de sodium et l'atome d'oxygène sont liés, en usant d'une variété de verbes d'association (accrocher, attacher, lier, coller, etc.). Enfin, quelques élèves soulignent la nécessité impérieuse d'avoir un tel ratio atomique, dans des réponses de type : « Il faut 2 Na pour 1 O », ou encore : « La molécule ne peut exister que s'il y a deux atomes de sodium pour se coller à l'oxygène ».

3) Un peu moins d'un élève sur cinq (19 %) déclare que l'indice du sodium est **lié à la valence de l'oxygène.** Cette connexion entre les deux concepts est évidemment due à la méthode du chiasme[19], permettant de construire les formules moléculaires à partir des valences. Plus encore, sur les 25 élèves faisant référence à la valence de l'oxygène, plus de la moitié (13) assimilent explicitement l'indice du sodium à la valence de l'oxygène. Pour ces élèves, il s'agit davantage d'une traduction automatique de la valence en indice (soutenue par la méthode du chiasme) que du résultat d'un processus fin mettant en jeu les valences des deux atomes.

Le nombre de réponses incorrectes est relativement élevé (15 %) : assimilation de l'indice 2 à la valence du sodium et confusion entre les termes « indice » et « coefficient » constituent les erreurs les plus fréquentes. Remarquons enfin que si une dizaine d'élèves utilisent le terme « coefficient » à la place du terme « indice », aucun n'exprime la confusion inverse (voir tableau 7) ; le terme « indice » est aussi beaucoup plus souvent cité nommément que le terme « coefficient » dans la question portant sur sa signification (respectivement 15 % et 4 %). Pour le dire autrement, les élèves testés semblent avoir besoin du terme « indice » pour décrire la signification d'un indice plus que du terme « coefficient » pour décrire la signification du coefficient.

Terminons par une brève analyse du type d'entités convoquées par les élèves : s'agit-il de deux molécules, de deux atomes, de deux Na, de deux sodium ou encore de deux

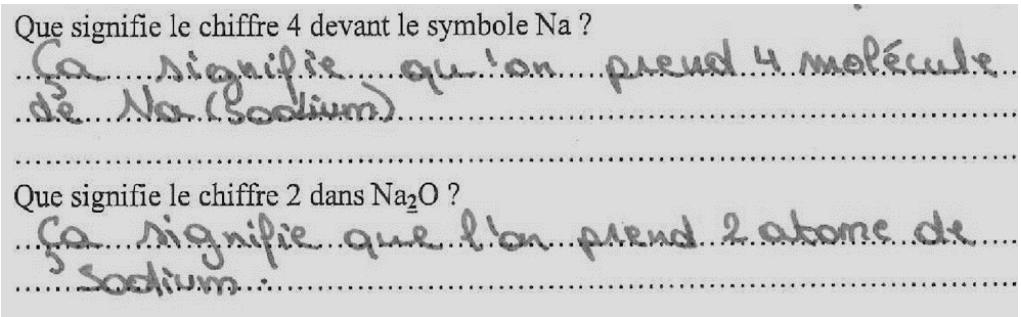
[19] Voir le chapitre 1.

moles de la catégorie « sodium » dans Na_2O ? Le tableau 10 reprend les fréquences relatives dénombrées dans notre test, quelle que soit la catégorie de réponse définie supra.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
deux atomes de Na	31	24 %
deux Na	20	15 %
deux molécules de Na	13	10 %
deux atomes de sodium	12	9 %
deux sodium	3	2 %
deux moles de sodium	1	1 %

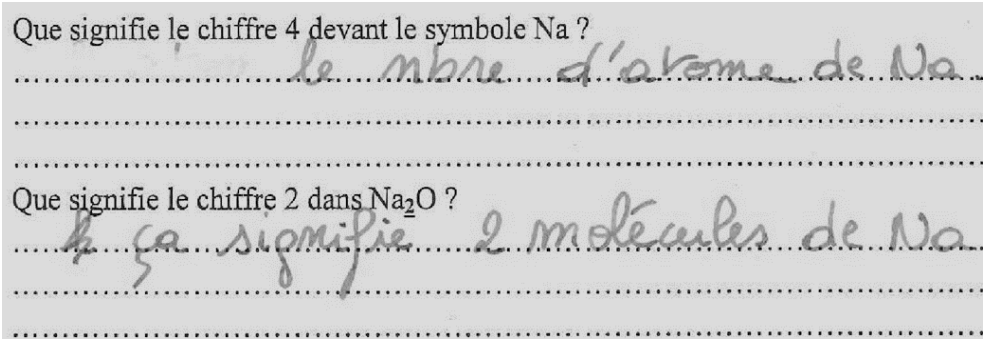
Tableau 10. Nombre d'élèves et fréquences relatives en relevant le type d'entités convoquées, issues des réponses à la sixième question du test : « Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ? »

Nous avons distingué les réponses « deux atomes de Na » et « deux atomes de sodium » afin de montrer la préséance de l'usage du symbole sur le terme. Mais cette distinction, quand elle est appliquée au nombre de molécules, fait émerger un autre résultat intéressant : les élèves n'ont jamais répondu en utilisant l'expression « molécules de sodium », préférant unanimement la formulation « molécules de Na ». Déjà entrevue dans la question sur le coefficient stœchiométrique, cette sélection terminologique résulte d'un interdit inconscient liée à question de l'indice : dans ce cas, pour les élèves, associer « molécule » et « sodium » s'accompagne d'une résistance d'ordre linguistique (et/ou conceptuelle), ce qui nécessite un ajustement symbolique. Pour pouvoir associer un nombre de molécules à l'indice, les élèves contournent l'interdit en utilisant le symbole « Na », jugé moins contraignant. Il est essentiel de noter que la situation a changé par rapport aux réponses portant sur la signification du coefficient. Si 33 % des élèves, à la question 5, associaient le symbole « Na » à une molécule, 10 % seulement l'identifient comme telle à la question 6. Bien entendu, il faut y voir l'effet des associations entre coefficient et nombre de molécules et entre indice et nombre d'atomes, issues des premières définitions en troisième année de l'enseignement secondaire. Si cet effet est indéniable (voir, par exemple, figure 22), il n'est pas suffisant pour annihiler chez tous les élèves l'application automatique et inconsciente du modèle moléculaire à toute substance (figure 23).


Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ?
Ça signifie qu'on prend 4 molécule de Na (Sodium)

Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ?
Ça signifie que l'on prend 2 atome de Sodium

Figure 22. Exemple de production d'élève (février 2011). L'élève indique un nombre de molécules pour le coefficient stœchiométrique, mais il se corrige dans le cas de l'indice, en écrivant que celui-ci détermine un nombre d'atomes.


Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ?
le nbre d'atome de Na

Que signifie le chiffre 2 dans Na_2O ?
ça signifie 2 molécules de Na

Figure 23. Exemple de production d'élève (février 2011). L'élève indique un nombre d'atomes pour le coefficient stœchiométrique, mais il se corrige (malheureusement) dans le cas de l'indice, en écrivant que celui-ci détermine un nombre de molécules.

Comme le coefficient stœchiométrique, l'indice renvoie potentiellement aux trois niveaux de signification en chimie (figure 24). En effet, l'indice peut référer à un chiffre dans une formule symbolique, à un nombre d'atomes dans une molécule ou à un ratio d'un élément par rapport à un autre dans un cristal ionique. Cependant, dans le cas des élèves de grade 11 testés, on relève seulement deux niveaux de signification : microscopique et symbolique. Dans les programmes de chimie en FWB, l'indice n'est jamais abordé explicitement en tant que proportion molaire d'un élément ou d'un ion dans un cristal. Il n'est donc guère surprenant que cette signification n'apparaisse pas dans notre test diagnostique.

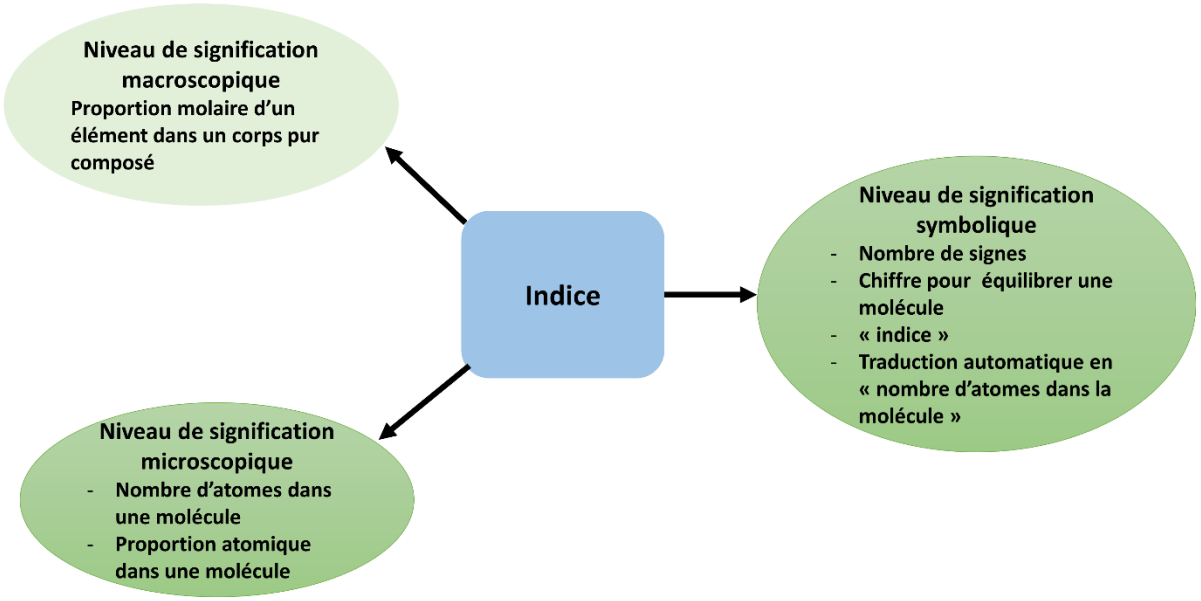


Figure 24. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées à l'indice dans une équation de réaction. Les significations macroscopiques sont représentées sur fond blanc car elles n'ont pas été relevées dans les productions d'élèves.

7.5.7. État, forme ou nature ? (Q7)

La septième question porte sur le sens donné aux signes (s) et (g), placés derrière les formules chimiques des réactifs et produits. 88 % des élèves répondent correctement en citant les termes « solide » et « gazeux » ; un peu moins de la moitié (46 %) décrivent explicitement le lien entre le symbole et les désignations linguistiques (comme dans une réponse du type « (s) pour solide »). Cependant, à peine 35 % des élèves parlent explicitement d'« état de la matière ». Les termes « forme », « milieu », ou « nature » sont parfois cités à la place du terme « état », interrogeant du même coup le concept même de substance.

Il est aussi à noter que l'introduction de ces signes, associés au niveau de signification macroscopique, dans une équation de réaction lue au niveau microscopique est susceptible d'induire des conceptions erronées telles que « l'atome (ou la molécule) de sodium est solide » (par exemple, voir figure 25). Nous avons relevé 16 cas explicites dans notre test, ce qui représente tout de même 12 % de l'échantillon. Ce phénomène est d'autant plus important qu'il est repérable dans les trois établissements testés. Mais il arrive que certains élèves prennent conscience que ces lettres ne peuvent pas être associées aux entités microscopiques. Ils adaptent alors leur production, comme à la figure 26.

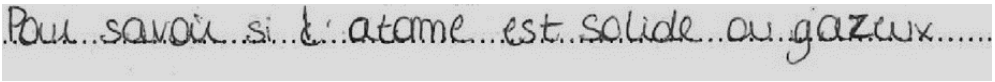


Figure 25. Exemple de production d'élève (février 2011). L'élève associe incorrectement un état de la matière au concept d'atome.

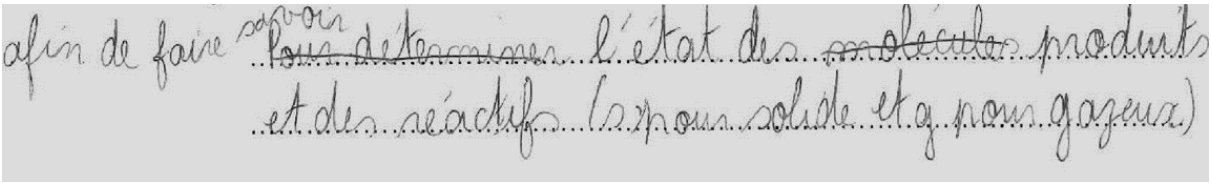


Figure 26. Exemple de production d'élève (février 2011). L'élève biffe le terme « molécules » pour le remplacer par le terme « produits ».

Les symboles des états de la matière ont donc la particularité de ne pas véhiculer de significations directes au niveau microscopique (figure 27).

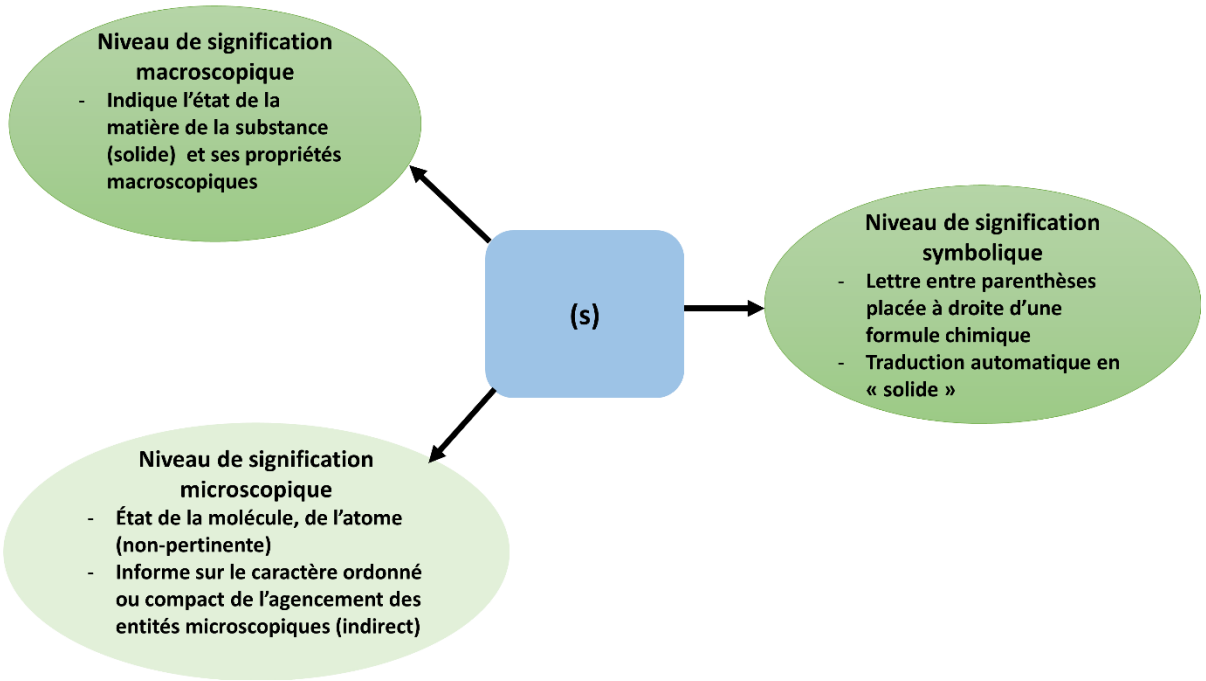


Figure 27. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au symbole (s) dans une équation de réaction. Les significations microscopiques sont représentées sur un fond plus pâle car elles sont soit indirectes, soit non-pertinentes dans le cadre de la discipline « chimie ». La couleur verte est néanmoins conservée vu que ces significations sont repérables dans les productions d'élèves.

En chimie, ils renvoient soit à une signification macroscopique (l'état de la matière et ses propriétés macroscopiques), soit à une signification symbolique (lettre minuscule indiquée entre parenthèses à la suite d'une formule chimique, traduction directe en le terme « solide », « liquide » ou « gazeux » sans lien avec l'état de la matière). La prédiction de l'agencement ou du déplacement des entités microscopiques constitue une interprétation subséquente à la signification macroscopique : l'identification d'une

substance comme étant à l'état solide implique un arrangement microscopique particulier des entités constitutives de cette substance. Le fait de projeter une propriété macroscopique (l'état) sur une entité microscopique, dans une expression comme « L'atome de sodium est solide », est incorrect dans le cadre de la discipline « chimie ». Bien que non-pertinente, cette signification, associée au niveau de signification microscopique chimique, s'ajoute au panel des interprétations possibles des symboles des états de la matière.

7.5.8. La réaction chimique : une inconnue (Q8)

La huitième et dernière question porte sur le processus réactionnel lui-même : « Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs pendant la réaction chimique ? » Nous souhaitons déterminer, grâce à cette question, si les élèves testés sont capables de dépasser l'écriture symbolique de l'équation pour accéder à des représentations plus sophistiquées de la réaction chimique. Il a été rapporté dans la littérature que l'élève se sent souvent incapable de décrire la réaction chimique (Laugier et Dumon, 2003, p. 85):

> On nous demande de raconter ce qui se passe, mais on ne voit pas ce qui se passe. On voit des couleurs, on sent, mais on ne voit rien… Moi, je vois le début, je vois la fin mais je ne vois pas le milieu.

En effet, les multiples forces et interactions régissant le processus d'une réaction chimique dépassent la compréhension globale de l'élève à ce stade de son apprentissage ; il est donc normal de rencontrer une grande diversité de réponses, à la mesure de la complexité et de la qualité du réseau de connaissances construit par chaque élève. Nous avons dessiné des catégories de réponses qui regroupent au mieux des éléments que nous avons jugé communs, même si la variété des réponses collectées rend notre proposition délicate et discutable (tableau 11).

Développons les implications de ces réponses, en tentant de montrer une progression dans la tendance des élèves à décrire le processus réactionnel en lui-même.

1) Analysons d'abord **l'absence de réponses**. De toutes les questions du test, c'est cette dernière qui présente le taux d'abstention le plus élevé : 16 % des élèves ne répondent tout simplement pas à la question. Il semble peu concevable que la longueur du test ou la position terminale de cet item soient en cause, notamment de par le faible taux d'abstention à la question précédente (4 %). Ces élèves se sentent peut-être incapables de fournir quelques informations mobilisables et/ou pertinentes sur un tel sujet. Les cours de chimie suivis pendant les deux années précédentes ne leur auraient donc pas permis de construire une représentation satisfaisante et communicable de la réaction chimique.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme « s'assembler », « se réarranger », « se lier », etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	34	26 %
« Se mélanger » (idée principale)	29	22 %
Pas de réponse	21	16 %
« Réagissent entre eux » (sans indication du processus réactionnel)	16	12 %
« Se transforment » (sans indication d'une référence au mécanisme du processus réactionnel)	11	8,5 %
Référence explicite à la rupture et/ou formation de liaisons chimiques (au niveau microscopique)	11	8,5 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (combustion, formation d'un solide)	9	7 %

Tableau 11. Nombre d'élèves et fréquences relatives par catégories de réponses à la huitième question du test : « Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs pendant la réaction chimique ? »

2) Un cinquième des élèves stipule essentiellement que dans une réaction chimique, les réactifs **réagissent** (12 %) ou se t**ransforment** (8,5 %). Nous incluons dans cette catégorie uniquement les productions des élèves qui renseignent explicitement les termes « transformation » et « réaction », sans qu'il n'y ait de description plus avancée du processus réactionnel. En effet, de nombreux élèves vont se limiter à des réponses lapidaires de type : « Les réactifs se transforment en produits » (qui constitue par ailleurs la combinaison stricte la plus fréquente), ou : « Ils réagissent ensemble ». Cette catégorie de réponse souligne la difficulté des élèves à exprimer leur représentation avec précision, en dehors des « mots-refuges » que sont « réaction » et/ou « transformation ».

3) 22 % des élèves trouvent dans le mot **« mélange »** une réponse à l'énigme entourant la réaction chimique. On voit ici la conséquence de la polysémie de ce terme, comme discuté pour les significations entourant le signe « + ». Le mélange peut être un acte expérimental situé au niveau macroscopique : par exemple, mélanger deux solutions dans le cas d'une transformation chimique ou mélanger un soluté avec un solvant dans le cas d'une dissolution. Mais c'est également un processus microscopique : dans le cas de la formation d'une solution d'eau salée, les molécules d'eau et les ions issus du chlorure de sodium « se mélangent » et forment un réseau basé sur des liaisons entre soluté et solvant. Enfin, le mélange constitue aussi un objet macroscopique (par exemple, un mélange homogène comme une solution aqueuse de chlorure de sodium), résultat de divers processus microscopiques. Ces significations coexistent dans

l'esprit des élèves et font du terme « mélange » un « mot-refuge » capable de décrire un grand nombre de phénomènes. Que le verbe « mélanger » soit le verbe le plus associé à la réaction chimique (29 élèves y font référence en priorité) pose une question importante : n'existe-t-il pas un risque que tout mélange soit associé à une réaction chimique, même si celle-ci n'a pas lieu ? Plus encore, l'idée d'un mélange « atomique » donnant les produits finaux par un réarrangement ne risque-t-il pas de produire, dans l'esprit des élèves, une association entre corps pur composé (par exemple, « Na_2O ») et mélange hétérogène (deux types d'atomes) ?

4) Un quart des élèves tente de préciser les ressorts de la réaction chimique en optant pour **des termes empruntés au vocabulaire quotidien ou au vocabulaire relatif à divers domaines scientifiques** (mécanique, mathématiques) tels qu'« assembler », « se lier », « s'additionner », « s'associer », etc. L'usage de ces verbes laisse également entendre une représentation de la réaction chimique en tant que juxtaposition de substances simples, idée renforcée par ce dont se compose l'équation de réaction proposée lors du test (deux réactifs, un produit). Ces verbes d'association amènent, en creux, à la notion de liaison chimique, mais cachent également le fait qu'il y a une rupture préalable dans la structure des réactifs. Il est intéressant de noter que les élèves utilisent parfois le terme « fusionner » dans le but de rendre compte de cette association de deux réactifs en un produit.

5) Seuls 8,5 % des élèves font référence à la **rupture de liaisons chez les réactifs et à la formation de nouvelles liaisons** chez les produits. Alors que la question des liaisons chimiques est abordée durant la quatrième année du cursus, les élèves n'ont pas, en grande majorité, effectué de lien avec le concept de réaction chimique vu en troisième année.

6) Enfin, quelques élèves (7 %) décrivent les **caractéristiques macroscopiques** de la réaction particulière qu'est la réaction de combustion du sodium. Ils vont ainsi rendre compte du fait que les réactifs brûlent, de la formation d'un solide, ou de la « dissolution » de l'oxygène dans le sodium.

Il ressort de cette analyse que la description du contenu des niveaux de signification associés à la réaction chimique est un exercice délicat (figure 28), la plupart des termes employés par les élèves renvoyant potentiellement à tous les niveaux. Sur base des productions analysées, la détermination fine du positionnement macroscopique, microscopique ou symbolique des élèves par rapport à la réaction chimique relève de la gageure.

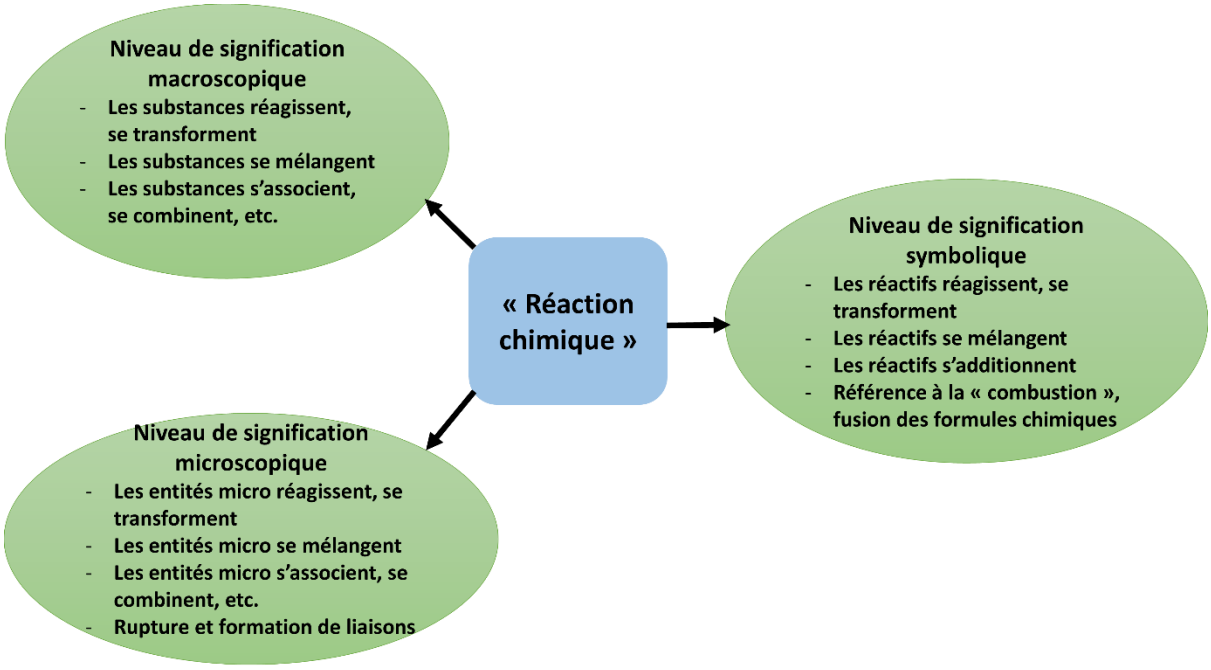


Figure 28. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au terme « réaction chimique » exprimées à partir d'une équation de réaction.

Pour conclure, la réaction chimique reste une grande inconnue pour de très nombreux élèves testés, au milieu de la cinquième année de l'enseignement secondaire. L'utilisation massive de « mots-refuges » issus du début de l'apprentissage de la chimie (mélange, réaction, transformation) s'explique sans doute par une difficulté cognitive à faire la synthèse des concepts enseignés dans le cadre de la description de la réaction chimique. En effet, les angles d'éclairage de la réaction chimique abordés dans le cursus à partir de la quatrième année ne manquent pas (stabilité énergétique, liaisons chimiques, exothermicité, transfert de protons ou d'électrons, etc.) ; ils sont pourtant peu mobilisés par les élèves, dans notre échantillon, quand il s'agit de décrire le processus réactionnel.

7.6. Discussions

L'analyse du test diagnostique permet de mettre en lumière plusieurs constats qui confirment des résultats déjà émis dans la littérature scientifique, ou qui amènent à la mise en exergue de nouveaux phénomènes. Ceux-ci peuvent jouer un rôle important dans la compréhension du processus d'émergence de difficultés dans l'apprentissage de la symbolique chimique.

7.6.1. De nombreuses significations pour chaque symbole

Chaque signe de l'équation de réaction est associé à de nombreuses significations chez les élèves sondés. On observe ainsi (au moins) cinq grandes catégories de réponses pour le coefficient stœchiométrique, le signe « + » et la flèche de réaction. Ce résultat

souligne la diversité des conceptions construites par les élèves autour de l'équation de réaction malgré un enseignement sous-tendu par un programme commun. Nous nous rapprochons de l'étude générale de Taskin et Bernholt (2014) qui ont mis en évidence l'étendue de la charge sémantique pour le coefficient stœchiométrique et les formules chimiques dans les recherches en didactique de la chimie. Cependant, la découverte de significations aussi variées pour l'indice, le signe « + » et la flèche de réaction est, à notre connaissance, originale.

Cette variété trouve son origine dans plusieurs sources, dont l'une est l'utilisation de ces signes dans des domaines étrangers à la chimie. La polysémie intrinsèque de certains symboles tels que la flèche de réaction ou le signe « + » en constitue un bel exemple. En effet, l'usage qui en est fait dans des domaines scientifiques (par exemple : les mathématiques) ou plus triviaux (par exemple : le code de la route) est susceptible de parasiter le sens dans lequel les chimistes les utilisent habituellement. Ainsi, le signe « + » est souvent associé à une addition mathématique (18 % des élèves testés), c'est-à-dire à une addition de valeurs, alors que le contenu chimique d'une équation de réaction nécessite souvent de dépasser le caractère quantitatif du signe « + » pour y voir une mise en contact entre réactifs, ou un ensemble de produits formés (Al-Kunifed *et al.*, 1993). Une telle concurrence semble inévitable et ne peut faire a priori l'objet d'aucune remédiation menant à une inhibition totale. Un tableau comparatif indiquant les significations de ces signes en mathématique et en chimie pourrait cependant aider à structurer la pensée des apprenants.

Les significations prêtées aux symboles dans une équation chimique sont intimement associées à des tâches particulières. Ce constat est particulièrement frappant dans le cas du coefficient dans une équation chimique. Pour certains élèves, le coefficient stœchiométrique est lié à la démarche de pondération, dont il constitue le résultat « mathématique ». Dans ce cas, le coefficient est alors un chiffre pour pondérer l'équation (13 % de notre échantillon). Pour d'autres élèves, le coefficient stœchiométrique indique un nombre de molécules (33 %), d'atomes (24 %), de moles (21 %). Les prescrits des programmes de la FWB sont, au moins en partie, à l'origine de cette diversité sémantique. En effet, l'équation de réaction subit souvent, dans un premier temps, une « lecture moléculaire ». Ainsi, l'équation de combustion du magnésium[20] est lue comme suit :

> Deux atomes de magnésium et une molécule de dioxygène réagissent pour former deux molécules d'oxyde de magnésium.

Au-delà de l'emploi incorrect du terme « molécule » pour l'oxyde de magnésium, cette lecture impose un rôle au coefficient stœchiométrique : il donne le nombre d'atomes

[20] $2Mg + O_2 \longrightarrow 2MgO$

(pour « Mg ») et de molécules (pour « O_2 » et « MgO ») impliqués a minima dans la réaction.

Dans un deuxième temps, une lecture « molaire » est proposée aux élèves :

> Deux moles de magnésium et une mole de dioxygène réagissent pour former deux moles d'oxyde de magnésium.

Ce type de lecture engendre une autre difficulté : pour les élèves, le coefficient est alors porteur d'une quantité de matière alors qu'il n'est pas censé rendre compte des quantités initiales. Enfin, dans les manuels scolaires consultés, rares sont les lectures de l'équation sous l'angle d'un ratio réactionnel. Or, on observe que seulement 6 % des élèves testés ont considéré le coefficient stœchiométrique comme un indicateur de proportion. Par conséquent, on peut logiquement supposer une corrélation entre un nombre élevé de tâches différentes impliquant un symbole et le nombre élevé de significations qui lui sont associées.

L'inverse se vérifie également. L'indice est ainsi associé à un nombre de significations plus restreint, imputables, entre autres facteurs, à un nombre plus faible de tâches nécessitant son usage. Ceci découle d'ailleurs directement des prescrits programmatiques décrits dans le chapitre 1. Premièrement, la tâche consistant à construire des formules chimiques provoque une assimilation de l'indice à la valence de l'atome partenaire (19 % des élèves). En Fédération Wallonie-Bruxelles, la construction des formules chimiques est, en effet, essentiellement réalisée à l'aide de la méthode du chiasme. Pour rappel, dans celle-ci, l'étape initiale (et souvent suffisante) de croisement des valences est, le cas échéant, suivie d'une simplification dont les élèves ne comprennent pas toujours le sens. Pourquoi simplifier des valences quand on construit une formule moléculaire ? Sans réponse convaincante, les élèves négligent parfois l'étape de simplification (Keig et Rubba, 1993). Cette pratique ne peut que renforcer l'assimilation de l'indice à la valence, difficulté souvent relevée dans de précédentes publications (Friedel et Maloney, 1992 ; Arasasingham *et al.*, 2004). Deuxièmement, la démarche de pondération des équations de réaction amène à considérer l'indice comme un nombre d'atomes dans une molécule (38 % de notre échantillon). Or, dans le cadre de l'enseignement de la chimie en Fédération Wallonie Bruxelles, ni la définition de la molécule en troisième année, ni le traitement des cristaux ioniques (renvoyés en cinquième année de l'enseignement général) ne permettent aux élèves de construire une signification alternative de l'indice. Cette restriction sémantique est, en fait, un attendu programmatique : l'indice ne doit jamais être vu par les élèves comme un indicateur du ratio de composition atomique dans un cristal ionique. Il est donc logique, en Belgique francophone, que les élèves de l'enseignement secondaire considèrent préférentiellement l'indice comme une indication de la composition atomique réelle d'une molécule, quelle que soit la formule

chimique. Ces deux principales significations de l'indice doivent donc être reliées à des tâches particulières, qui renforcent plus ou moins la prégnance de ces significations dans l'esprit des élèves. Par conséquent, il apparaît que la mise en œuvre de symboles dans des tâches données influence grandement leur charge sémantique (en l'étendant ou en la rigidifiant), ce qui complique l'utilisation des mêmes symboles dans d'autres contextes.

La plupart des signes testés renvoient à nos trois niveaux de signification (symbolique, microscopique et macroscopique). Par exemple, un signe tel que le coefficient stœchiométrique se trouve au carrefour des trois niveaux et peut, de ce fait, générer des significations très différentes : simple chiffre (nombre de Na), nombre de particules (molécules, atomes, ions), proportion, etc. Un tel constat avait déjà été posé à propos du coefficient (Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012). Cependant, nous apportons un éclairage nouveau sur certains signes de la symbolique chimique : le signe « + » et la flèche de réaction sont également connectés aux trois niveaux de signification (figures 13 et 14). Pour ces deux symboles, la situation est en effet plus subtile que pour le coefficient stœchiométrique. Des termes comme « mélange », « réaction » ou « mise en contact » peuvent référer à deux niveaux de signification différents selon qu'ils sont explicitement ou implicitement associés à des particules ou à des substances. Si un seul terme renvoie à plusieurs niveaux, il devient plus complexe pour le chercheur en didactique et le professeur de chimie de juger dans quelle mesure un élève circule ou non entre les niveaux de signification. C'est particulièrement le cas du concept de réaction chimique, dont la description par les élèves se caractérise par l'usage massif de termes renvoyant potentiellement à plusieurs niveaux.

Selon notre analyse, l'indice est le seul symbole de l'équation chimique à ne pas être relié aux trois niveaux de significations dans les productions des élèves. Si les significations microscopiques et symboliques de l'indice sont abordées lors de tâches dans les cours de chimie en FWB, il n'en est rien des significations macroscopiques (proportion dans un cristal, par exemple).

7.6.2. Des niveaux de signification préférentiels

Si les trois niveaux de signification sont souvent représentés dans les propositions des élèves, on observe néanmoins que l'un ou l'autre niveau se trouve plus fréquemment évoqué selon le symbole considéré. Les réactifs et les produits sont ainsi très majoritairement reliés au niveau symbolique, spécialement dans le cas de notre test, où ils sont décrits à partir d'une équation de réaction. Les élèves utilisent massivement les symboles atomiques et les coefficients stœchiométriques pour préciser l'identité des réactifs et produits sans jamais faire référence aux substances ou aux entités microscopiques. Cette difficulté de relier les formules moléculaires et les substances (et

plus largement d'identifier ce qu'est une substance) avait déjà été mise en évidence dans de précédents travaux (Johnson, 1996, 2000).

Par ailleurs, les apprenants semblent préférer traduire certains signes particuliers dans le langage ordinaire modifiée (LOm). C'est ce que l'on observe pour la flèche de réaction, qui fait souvent l'objet d'une expression verbale. Le recours à la lecture littérale (moléculaire ou molaire) des équations de réaction dans les pratiques enseignantes renforce ce comportement.

Par contre, certains signes initialement à forte teneur symbolique, comme le coefficient stœchiométrique, semblent véhiculer de multiples interprétations issues des niveaux microscopique et macroscopique. L'enjeu didactique porte alors surtout sur la pertinence de l'utilisation d'une acception plutôt que d'une autre, et donc sur la capacité des élèves à reconnaître le niveau de signification associé au contexte. On voit par exemple que, chez les élèves sondés, le coefficient est le plus souvent associé à un nombre de molécules ou d'atomes. Si cette interprétation peut être pertinente (sans être nécessaire) pour un exercice de pondération d'une équation chimique, elle sera peu utile dans le cadre de problèmes stœchiométriques. De nouveau, la question de l'adéquation entre les tâches et les significations vient influencer l'équilibre entre les composantes de la charge sémantique des symboles. Cependant, il est tout à fait possible que le caractère microscopique ou macroscopique de certaines significations ne soit qu'une illusion : un élève peut avoir traduit le coefficient en un nombre de molécules sans même se représenter le concept de molécule. Or, dans notre modèle des niveaux de signification, une signification isolée des concepts chimiques est de nature « symbolique », en ce qu'elle ne prend pas sens dans le champ des particules ou des substances, mais uniquement à l'intérieur des systèmes de représentation.

7.6.3. Des boucles langagières

Pour rappel, au chapitre 4, nous avions proposé l'existence de deux boucles particulières. D'une part, nous définissions une « boucle symbolique » comme la relation exclusive entre un symbole et une désignation. D'autre part, nous réservions l'expression « boucle iconique » à la relation exclusive entre formule chimique et représentation microscopique (voir figure 29).

Nous ajoutons ici une troisième boucle, qui se rapproche de la boucle symbolique par les systèmes sémiotiques convoqués : la boucle « langagière ». Une boucle langagière décrit une relation exclusive entre la langue symbolique des chimistes et une expression langagière faisant référence à la langue ordinaire modifiée. Si, dans une boucle symbolique, nous nous limitons à la traduction automatique du symbole en sa désignation classique (« Na » en « sodium » par exemple), une boucle langagière

implique la traduction automatique d'un symbole en une expression plus complexe qui va au-delà de la simple désignation.

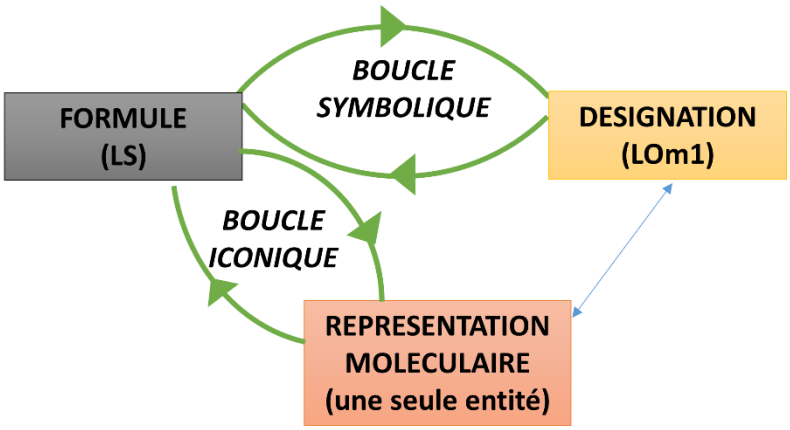


Figure 29. Représentation de la boucle symbolique (entre formule chimique et désignation linguistique) et de la boucle iconique (entre formule chimique et représentation mono-particulaire).

Prenons un exemple concret. À la question : « Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ? », une boucle symbolique aurait mené un élève à donner automatiquement la désignation, en l'occurrence « coefficient ». Or, le terme « coefficient » n'a été relevé que dans 4 % des productions. Dans notre test, les élèves ont massivement remplacé la désignation « coefficient » par des réponses incluant des termes qui donnent de prime abord l'impression que l'élève se réfère aux niveaux de signification microscopique et macroscopique. C'est le cas de « nombre de molécules », « nombre d'atomes » ou « nombre de moles ». Mais une investigation plus précise fait surgir une autre hypothèse. Une réponse comme « C'est le nombre de molécules » peut n'être qu'une traduction automatique du coefficient en l'expression littérale de l'une de ses significations chimiques. En d'autres termes, la désignation « coefficient » est écrasée – dans le sens informatique du terme – par une expression que l'on pourrait qualifier de « prototypique »[21]. Une signification comme « nombre de molécules » est en effet représentative d'un grand nombre de cas où le professeur de chimie utilise le coefficient stœchiométrique en classe à ce niveau d'enseignement-apprentissage. Cette expression prototypique peut alors être reliée aux niveaux de signification macroscopiques ou microscopiques. Cependant, cette connexion est soumise à de sévères réserves, comme l'indique l'utilisation incorrecte de la signification « nombre de molécules » dans le cas du sodium.

À la figure 30, nous avons modélisé cette boucle langagière.

[21] Dans le sens de « parfaitement représentatif d'un concept, d'un objet, etc. » Souvent, c'est le premier modèle rencontré qui est qualifié de prototypique.

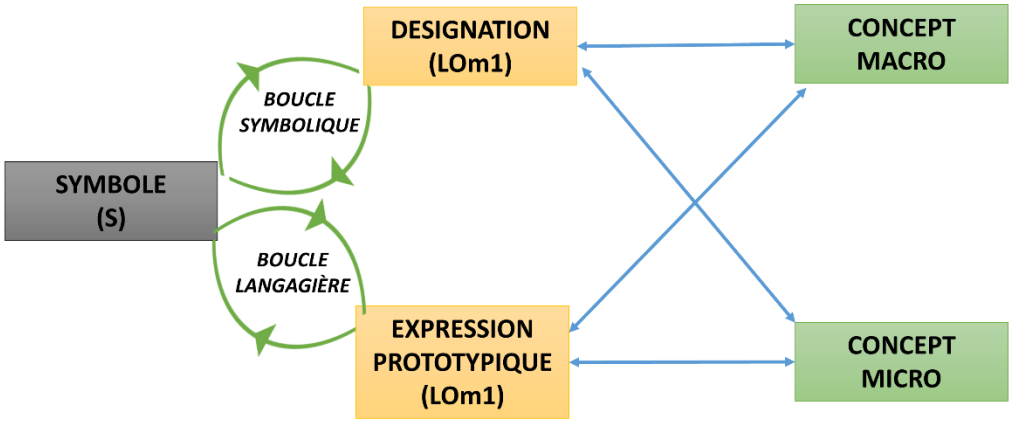


Figure 30. Représentation de la boucle symbolique (entre « symbole » et « désignation ») et de la boucle langagière (entre « symbole » et expression prototypique). Désignation et expression prototypique sont potentiellement connectées à des concepts chimiques microscopiques ou macroscopiques, qui peuvent différer selon l'expression prototypique.

Bien sûr, celle-ci renvoie potentiellement à des concepts macroscopiques ou microscopiques. Plus encore, une expression prototypique est souvent issue de la formulation en langue ordinaire modifiée d'un concept microscopique ou macroscopique. Mais, dans le cas d'une boucle langagière, le lien avec les concepts chimiques est rompu, ce qui laisse la place à une boucle tournant en vase clos entre le symbole et une expression prototypique. Le cas du coefficient est modélisé à la figure 31. On remarque que l'expression prototypique « nombre de molécules » est issue d'une des significations de nature microscopique entourant le coefficient.

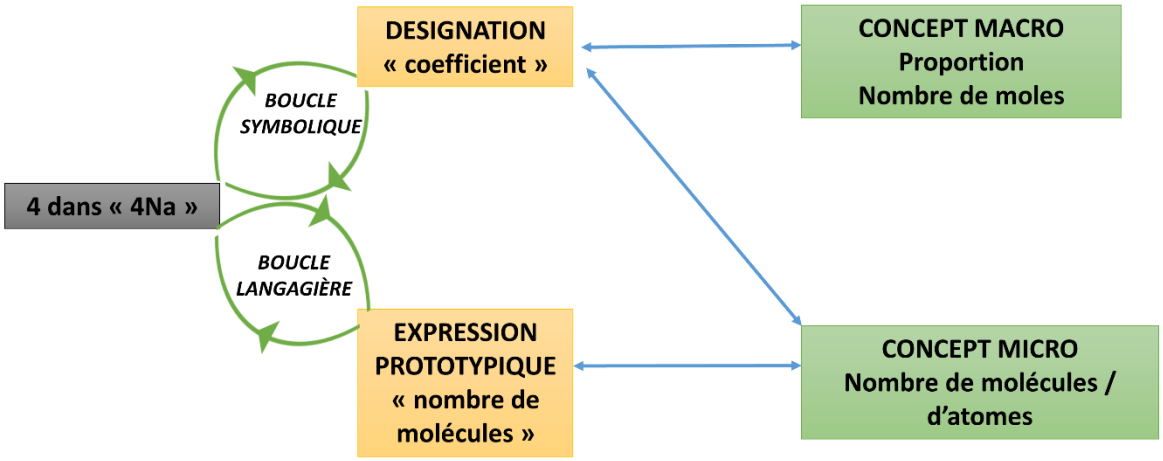


Figure 31. Représentation de la boucle symbolique et d'une boucle langagière particulière (entre « coefficient » et l'expression prototypique « nombre de molécules »). Dans ce cas, l'expression prototypique « nombre de molécules » n'est connectée qu'au concept microscopique de « molécule ».

Notre test diagnostique recèle de nombreux autres cas potentiels de boucles langagières. 24 % des élèves considèrent l'indice comme un nombre d'atomes dans une molécule,

réponse qui pourrait être étendue à tout indice dans toute formule chimique. Il est possible que la relation entre l'indice et un nombre d'atomes dans une molécule constitue une boucle langagière. Mais une boucle symbolique est également à l'œuvre. En effet, 9 élèves ne répondent que le terme « indice » à la question : « Que signifie le chiffre 2 dans "Na_2O" ? », ce qui souligne la robustesse du lien entre symbole et désignation pour ces élèves. La coexistence potentielle de ces deux boucles est modélisée à la figure 32.

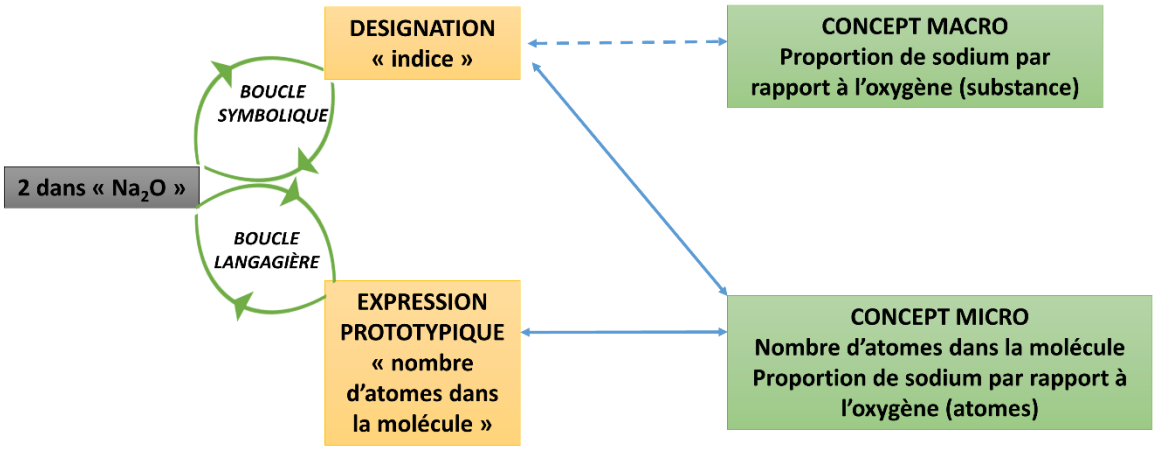


Figure 32. Représentation de la boucle symbolique et d'une boucle langagière particulière (entre « 2 dans Na_2O » et l'expression prototypique « nombre d'atomes dans la molécule »). Dans le cas de l'indice, les deux boucles sont observables dans notre test diagnostique. Le lien entre « désignation » et le concept macroscopique de « proportion dans une substance » n'est pas visé par les programmes en FWB.

Certains élèves traduisent automatiquement le signe « + » par le terme « et » ou par l'expression « réagit avec ». Même si ces réponses présentent une fréquence trop peu importante (en combinaisons strictes) pour ériger ces propositions en des expressions prototypiques majeures, il n'est par contre pas impossible d'envisager que, pour de petits groupes d'élèves, le signe « + » soit exclusivement accolé à ces expressions sans signification complémentaire. Un élève sur dix dans notre échantillon a ainsi répondu uniquement « et » à la question : « Que signifie le signe "+" à gauche de la flèche ? ». Le recours à une boucle langagière est d'autant plus probable que le signe « + » ne présente pas de désignation spécialisée en chimie, contrairement, par exemple, à l'indice ou au coefficient (figure 33).

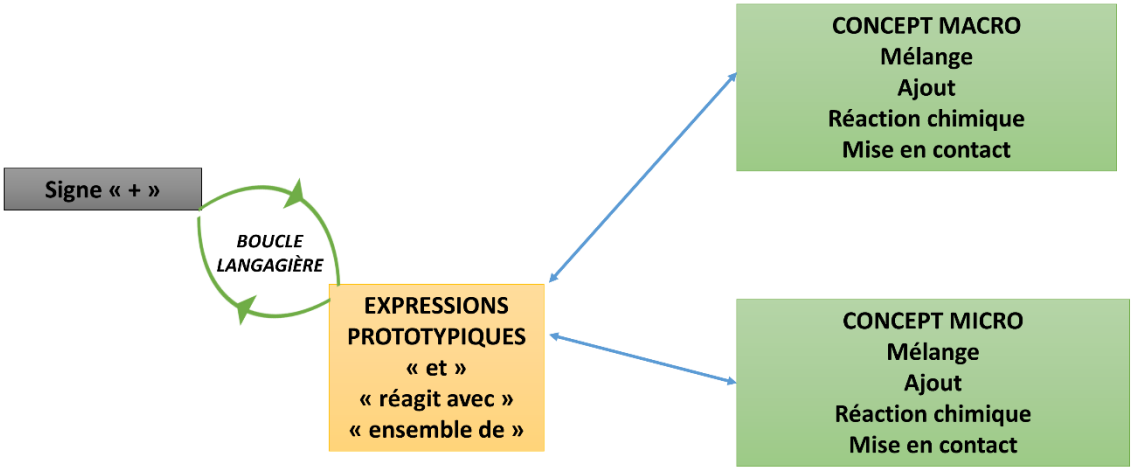


Figure 33. Représentation de la boucle symbolique et de boucles langagières pour le signe « + ». Dans ce cas, les expressions prototypiques associées au signe « + » sont potentiellement connectées aux niveaux de signification macroscopique et microscopique.

D'ailleurs, aucun élève n'a répondu « plus » ou « + » à la question : « Que signifie le signe "+" ? ». Cette absence de désignation (et donc de boucle symbolique potentielle) crée un vide qui nécessite d'être comblé. Or, aucune expression prototypique ne semble suffisamment favorisée en classe. Les élèves peuvent donc choisir l'expression langagière qui leur semble la plus représentative de la signification du signe « + ».

L'exemple de la flèche de réaction est encore plus pertinent car il recèle deux expressions prototypiques majeures : 16 % des élèves ont employé l'expression « réagissent pour former » sans commentaire supplémentaire, quand l'expression « réagissent pour donner » se retrouve dans 12 % des productions. Il est essentiel de préciser que ces réponses sont particulièrement fréquentes dans deux des trois établissements testés (écoles A et C). Nous posons l'hypothèse qu'elles sont le produit d'un dispositif didactique particulier, et donc d'une intention des enseignants. De nouveau, l'absence d'une désignation spécialisée en chimie entraîne un renforcement de l'usage des expressions prototypiques (figure 34).

Dans le cas de la flèche de réaction et du signe « + », la tâche de lecture d'une équation chimique au niveau moléculaire semble constituer l'élément central d'émergence et de renforcement de la relation entre le symbole et les expressions prototypiques visées. Cette critique de la lecture des équations chimiques confirme les limites de l'usage des équations nominatives (« word equation ») déjà décrites dans quelques études en didactique de la chimie (Taber, 2009 ; Song et Carheden, 2014).

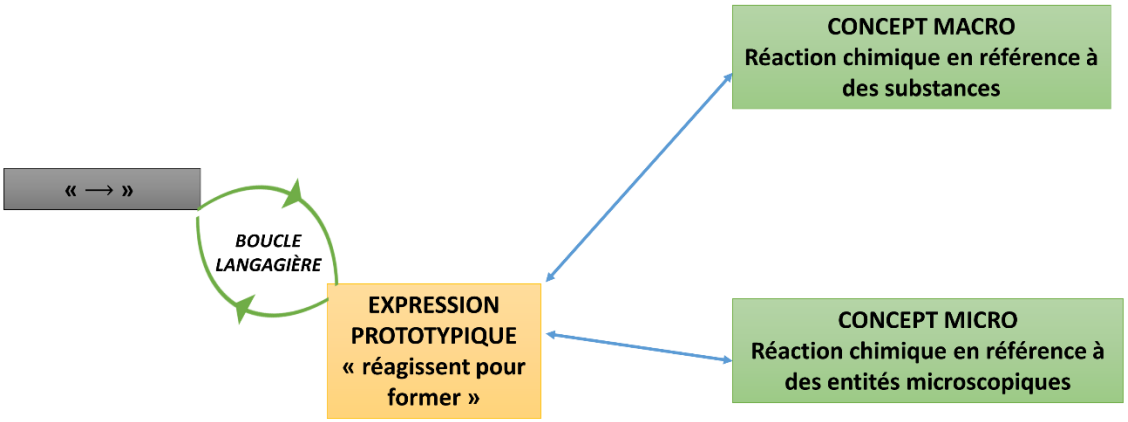


Figure 34. Représentation de la boucle symbolique et d'une boucle langagière particulière (entre « → » et l'expression prototypique « réagissent pour former »).

Comme la boucle symbolique, la boucle langagière implique une circulation entre systèmes sémiotiques plutôt qu'une circulation entre niveaux de signification. Il en ressort que l'argument de Talanquer qui concernait la boucle iconique[22] s'étend aux deux autres boucles : certaines tâches (pondération d'équation chimique, lecture d'équation chimique, construction de formules chimiques) ne permettent pas de juger d'une capacité de circulation entre niveaux de signification, car elles ne nécessitent en réalité qu'une capacité de conversion entre deux systèmes sémiotiques. Or, cette conversion n'implique pas forcément de connexion avec les concepts macroscopiques et microscopiques pour être réalisée efficacement. Dans le domaine des langues aussi, il est possible de traduire dans un autre idiome un texte (juridique, politique, économique, poétique) original en anglais, sans pour autant en comprendre le sens profond.

7.6.4. Des confusions lourdes de conséquences

Alors que l'interprétation de symboles comme la flèche de réaction pose en définitive peu de problèmes pour les élèves, certaines confusions très ancrées dans leur esprit ont de lourdes répercussions sur la compréhension experte de l'équation de réaction.

Ainsi, la confusion entre molécules et atomes semble très fréquente : un élève sur trois traduit l'expression symbolique « 4 Na » par « 4 molécules de sodium ». Nous avons vu qu'une partie de l'occurrence peut être expliquée par l'existence d'une boucle langagière entre symbole et expression prototypique. On observe également ce phénomène quand les élèves doivent exprimer la signification d'un indice : un quart des élèves sondés répondent que l'on trouve deux molécules de sodium dans une « molécule » de Na_2O. Ce résultat interpellant nous informe sur le faible niveau de maîtrise du vocabulaire chimique chez certains élèves, et plus encore sur leur faible

[22] Voir le chapitre 4.

capacité de tirer une information fiable au niveau microscopique à partir d'un symbole. Cette difficulté trouve très probablement sa source dans la transposition didactique du concept de molécule en FWB[23]. Les programmes de sciences et de chimie des humanités générales préconisent de définir et de représenter le concept de molécule avant celui d'atome. La molécule est définie, dans les *Socles de compétences*, comme « une bille symbolisant la limite de la divisibilité de la matière » (FWB, 2013). Toute la matière est présentée comme étant constituée de molécules. La molécule apparaît donc sous la forme d'un cercle ou d'une sphère lors de la représentation des mélanges et des corps purs. Cette première définition est susceptible de parasiter le concept d'atome lorsque celui-ci est abordé dans le courant de la troisième année. L'atome est alors – lui aussi – représenté sous la forme d'une sphère constitutive de la matière. Même si, dans la plupart des manuels récents, la molécule est redéfinie après l'enseignement du modèle atomique[24], notre test diagnostique montre que les concepts de molécule et d'atome semblent être fréquemment confondus par les élèves, tant conceptuellement que dans leur écriture symbolique, confusion potentiellement renforcée, donc, par une contrainte programmatique.

Parallèlement, les élèves présentent une tendance non négligeable à permuter les rôles du coefficient stœchiométrique et de l'indice. Nous rejoignons en cela des constats posés dans d'autres études (Friedel et Maloney, 1992 ; Sanger, 2005 ; Mzoughi-Khadraoui et Dumon, 2012). Il est évident que la non-maîtrise de la distinction entre molécules et atomes ne peut qu'influer sur la signification donnée au coefficient et à l'indice.

Ensuite, il n'est pas rare d'observer une confusion entre niveaux de signification macroscopique et microscopique. Ainsi, les atomes (ou les molécules) sont qualifiés de solides ou gazeux par certains élèves (15 % de l'échantillon). L'imbrication d'une propriété macroscopique au niveau microscopique constitue un classique en chimie : la molécule de bleu de méthylène est bleue, l'atome de fer est dur, la molécule d'eau bout à 100°C, etc. Nous rejoignons sur ce sujet les recherches de Laugier et Dumon (2004) et celles de Barlet et Plouin (1994).

Enfin, les élèves de 16-17 ans testés dans notre étude semblent éprouver des difficultés à expliciter ce qu'ils entendent par « réaction chimique ». Plus particulièrement, les représentations de la réaction chimique au niveau microscopique sont marginales : seul un élève sur dix fait référence aux liaisons ou aux atomes. Par conséquent, les élèves ne peuvent produire qu'une explication pauvre du processus réactionnel, car ils sont limités par une expression pléonastique (« les réactifs réagissent ») et des verbes peu précis (« les réactifs s'assemblent »), voire incorrects (« les réactifs s'additionnent »). Ce

[23] Voir le chapitre 1.
[24] Comme, par exemple, une « association d'atomes » (Pirson et *al.*, 2015).

constat peut être mis en parallèle avec la faible utilisation des schémas particulaires en FWB. Le recours à la seule écriture symbolique est la norme (notamment dans les manuels scolaires), même si, sous l'influence conjointe de formateurs éclairés et de conseillers pédagogiques motivés, les schémas particulaires ont commencé à apparaître plus fréquemment dans les manuels scolaires de chimie et dans les cours de professeurs. Cependant, trop peu d'activités ou de dispositifs didactiques sont actuellement créés pour travailler la construction ou l'interprétation de tels schémas avec les élèves. Leur utilisation se limite souvent à la représentation iconique particulaire d'une équation de réaction ponctuelle, sans multiplier le nombre d'entités représentées. Or, c'est en visualisant les molécules et les atomes que les élèves peuvent se forger une idée du processus réactionnel au niveau microscopique. L'usage trop rare de représentations au niveau microscopique peut donc avoir des conséquences importantes sur la conceptualisation de la réaction chimique, ainsi que l'ont évoqué certains auteurs avant nous (Gabel, 1999 ; De Jong et van Driel, 2004).

7.6.5. Circulation entre niveaux de signification, circulation entre systèmes sémiotiques

Notre test montre une circulation possible entre niveaux de signification ou entre systèmes sémiotiques, si l'on considère l'ensemble des réponses données par les élèves testés. Pour la question relative à l'identité des réactifs et des produits, nous avons dessiné (à la figure 8) le processus de sélection de symboles joint à celui de conversion de ces symboles dans d'autres systèmes sémiotiques (essentiellement la langue ordinaire modifiée). Ce phénomène est lié à la rupture progressive de la boucle symbolique entre les symboles à gauche de la flèche et la désignation « réactifs ». Même si le déploiement des informations contenues dans les symboles des réactifs n'est pas un gage de compréhension profonde des entités qu'ils représentent, on peut considérer que la conversion en un autre système sémiotique est plus favorable à un apprentissage efficace que le copier-coller des symboles à gauche de la flèche. Nous affirmons ainsi qu'une circulation effective entre niveaux de signification ne peut être atteinte que par de multiples conversions entre systèmes sémiotiques différents, intégrées dans des tâches complexes. À l'inverse, un processus d'enseignement-apprentissage impliquant des tâches simples de conversion entre deux systèmes sémiotiques, sans lien entre elles, ne peut que renforcer l'émergence de boucles symboliques, langagières et iconiques.

Nous avons également montré que les différentes significations du coefficient stœchiométrique s'échelonnent dans le cursus, en partant de niveaux de signification microscopiques (nombre d'atomes, nombre de molécules) pour atteindre des niveaux de signification macroscopiques (nombre de moles, proportion). Notre test ne comporte pas de production d'élèves qui montrerait une circulation entre niveaux : les élèves se positionnent soit au niveau microscopique, soit au niveau macroscopique. Une circulation entre les niveaux de signification est pourtant possible, en théorie, dès la

quatrième année de l'enseignement secondaire, par exemple en construisant la figure 18 avec les élèves. Il appartient aux professeurs de mettre au point des dispositifs didactiques incluant explicitement les niveaux de signification.

7.7. CONCLUSIONS

Les conceptions d'élèves de 16-17 ans associées aux symboles contenus dans l'équation de réaction ont été sondées à l'aide d'un test constitué de questions ouvertes, en vue de nourrir les analyses préalables nécessaires à la construction d'une séquence de leçons s'attaquant à une série de difficultés éprouvées par les élèves face à la symbolique chimique.

L'analyse des données dans le cadre théorique des niveaux de signification nous permet de mettre en lumière une série de constats :

- Chaque symbole fait l'objet de nombreuses significations, reliées directement ou indirectement à l'un des trois niveaux préalablement définis.
- Selon le symbole considéré, les propositions des élèves se situent a priori dans un niveau de signification préférentiel.
- Des expressions prototypiques peuvent engendrer des boucles langagières avec certains symboles, ce qui restreint la charge sémantique.
- Les confusions entre molécule et atome, entre indice et coefficient, entre niveau microscopique et niveau macroscopique viennent parasiter les informations que communique l'équation de réaction.
- La variété des réponses laisse penser qu'une circulation serait possible entre systèmes sémiotiques et entre niveaux de signification plus tôt dans l'apprentissage, si les enseignants mettaient en œuvre une activité de structuration de ces significations.

Les résultats de cette étude doivent interpeller les acteurs de l'enseignement actuel de la chimie. En effet, ces phénomènes trouvent leurs sources à la fois dans des manquements imputables aux élèves mais également aux pratiques enseignantes, souvent préconisées dans les programmes (méthode du chiasme, lectures de l'équation, transposition didactique du concept de molécule). Peu d'enseignants sont ainsi conscients de l'importance d'expliciter clairement dans quel niveau se situe leur discours. En plus de générer chez les élèves, pour un même symbole, des interprétations non souhaitées, il est fréquent que les pratiques de professeurs conduisent les apprenants à éprouver des difficultés à utiliser de manière pertinente les différentes significations d'un symbole selon le niveau identifié. En outre, le niveau symbolique est, de loin, le niveau le plus approfondi au début du cursus, au détriment des deux autres niveaux de

signification. Ce constat est particulièrement alarmant puisqu'il suggère des visualisations vidées de leur aspect chimique, uniquement efficientes dans le cadre d'une combinaison de symboles. Aujourd'hui, l'équation de réaction ne peut pas être enseignée dans un simple objectif de mise en œuvre d'une démarche algorithmique de pondération ou pour son statut de « formule simple » remplaçant avantageusement un long paragraphe littéral. Elle doit également, comme le rappellent Fourcroy et Vauquelin, être transmise comme un « raisonnement », certes « mis en forme serrée », mais riche de significations qui nécessitent d'être repérées, discutées et utilisées dans des contextes variés.

Cependant, il faut rester prudent dans l'interprétation des tests : l'utilisation des seules productions écrites ne peut nous permettre de statuer sur les connaissances réelles ou les capacités des élèves. En effet, on ne peut nier la difficulté d'interpréter le sens que les étudiants prêtent à certains termes, leur expression écrite ne rendant peut-être pas compte de la représentation mentale qu'ils ont construite (Laugier et Dumon, 2000 ; Johnson, 2000). Une des solutions proposées pour s'assurer de la cohérence entre leur représentation mentale et l'expression de celle-ci serait de demander aux élèves de réaliser des représentations moléculaires iconiques ou schémas particulaires à partir des informations présentes dans l'équation de réaction (Sanger, 2005 ; Dawidowitz *et al.*, 2010). Il s'agirait de sonder les conceptualisations des élèves par l'entremise d'une autre tâche de conversion entre systèmes sémiotiques. De la même manière, de telles représentations à dominante iconique ne pourraient que nourrir et enrichir le concept de réaction chimique chez les élèves, évitant une dépendance trop importante vis-à-vis du système de représentation symbolique, mise en évidence par une étude de Keig et Rubba (1993).

Par ailleurs, il est regrettable de constater le peu de place donnée, à l'heure actuelle, à l'utilisation de représentations microscopiques iconiques dans les manuels scolaires en Belgique francophone, au profit d'un langage plus formel (nomenclature, équations de réaction). Souvent employées comme simples illustrations après les activités d'apprentissage, ces visualisations « microscopiques » présentent pourtant un intérêt certain en tant qu'outils d'apprentissage, mais aussi en tant qu'outils diagnostiques. Dans le chapitre suivant, nous développerons cette hypothèse en construisant une séquence d'apprentissage contenant des visualisations empruntant au registre iconique. Celles-ci sont à même de renforcer certaines significations pertinentes associées aux symboles contenus dans l'équation de réaction, tout en permettant de discuter la double face conservation/transformation de la réaction chimique. En parallèle, nous utiliserons ces visualisations iconiques afin de révéler, d'une part, et de lever, d'autre part, les confusions entre molécule et atome ainsi qu'entre indice et coefficient stœchiométrique.

Chapitre 8

Développement et effets d'une séquence de leçons favorisant la circulation entre niveaux de signification et entre systèmes sémiotiques

Pour savoir la chimie, ils se procurèrent le cours de Regnault et apprirent d'abord « que les corps simples sont peut-être composés ». On les distingue en métalloïdes et en métaux, différence qui n'a « rien d'absolu », dit l'auteur. De même pour les acides et pour les bases, « un corps pouvant se comporter à la manière des acides ou des bases, suivant les circonstances ». La notation leur parut baroque. Les proportions multiples troublèrent Pécuchet.

— Puisqu'une molécule A, je suppose, se combine avec plusieurs parties de B, il me semble que cette molécule doit se diviser en autant de parties ; mais si elle se divise, elle cesse d'être l'unité, la molécule primordiale. Enfin, je ne comprends pas.

— Moi non plus ! disait Bouvard.

Et ils recoururent à un ouvrage moins difficile.

(Flaubert, 1881, p. 58)

8.1. INTRODUCTION

Les élèves peuvent parfois se comporter comme Bouvard et Pécuchet : devant une écriture « baroque », des concepts troublants ou des conflits cognitifs, ils peuvent simplement « recourir à un ouvrage moins difficile », c'est-à-dire abandonner la tâche qui leur est assignée au profit d'une procédure plus simple mais bien moins pertinente. Selon nous, pourtant, la compréhension (profonde) des concepts devrait primer la réalisation opérationnelle de tâches telles que la pondération des équations de réaction ou la détermination de quantité de matière. Plus encore, pour réaliser ces tâches avec un regard chimique, il faut que les concepts associés à la langue symbolique des chimistes se déploient sur les niveaux de signification macroscopique et microscopique. Il nous paraît enfin important que la charge sémantique des signes chimiques ne soit pas occultée à cause d'une non-maîtrise du traitement inhérent à certains systèmes sémiotiques et/ou par l'incapacité à convertir un élément de langage d'un système à un autre. La question de la relation entre niveaux de signification et entre systèmes sémiotiques se trouve donc au centre du processus d'enseignement-apprentissage des signes composant l'équation de réaction.

Dans ce chapitre, nous allons décrire une séquence de leçons que nous avons développée dans un double but : confronter nos modèles d'analyse et nos hypothèses de travail à une cohorte d'élèves en apprentissage, afin de fournir, in fine, un outil de travail aux professeurs. Nous passerons en revue les différentes contraintes (pédagogiques, techniques, institutionnelles, etc.) prises en compte pour bâtir notre séquence. Les choix des angles d'attaque seront justifiés en fonction des comportements d'élèves que nous

souhaitions voir apparaître à la fin de la séquence de leçons. Une validation interne, via la soumission d'un post-test, nous permettra de juger de l'adoption ou non des comportements attendus par les élèves.

8.2. ÉLABORATION DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS

8.2.1. Une collaboration, des contraintes

La volonté de tester in situ notre séquence de leçons impliquait de tenir compte de nombreuses contraintes qu'il est important de préciser. Celles-ci ont permis de dessiner un cadre général, d'élaborer les parties de la séquence, de limiter les dynamiques possibles, ou encore de déterminer la durée des différentes phases ainsi que celle de la séquence dans sa totalité.

Nous avons travaillé avec un professeur collaborant de l'école B (réseau officiel subventionné) affichant entre 15 et 20 ans d'ancienneté dans la fonction de professeur de sciences au degré inférieur de l'enseignement secondaire (élèves de 12 à 15 ans, grades 7 à 9). Il s'est porté volontaire lors de contacts informels. Cet enseignant présente l'avantage de donner cours à l'ensemble des élèves de troisième année dans l'école B, ce qui garantit une certaine homogénéité dans les prérequis estimés et augmente la cohorte d'élèves soumis à la séquence de leçon. De plus, il a démontré un grand intérêt pour les problématiques qui nous occupent dans notre travail de recherche (importance d'aborder tous les niveaux de signification, construction et distinction des systèmes sémiotiques particuliers à la chimie, régulation du temps consacré à l'écriture symbolique). Avant notre collaboration, ses leçons d'approche de l'équation chimique se situaient très majoritairement au niveau symbolique selon le « chemistry triplet » de Johnstone. Le but essentiel étant d'arriver à la pondération des équations chimiques (son objectif principal pour l'examen de fin d'année), notre professeur collaborant passait une période de cours (50 minutes) à installer les règles d'écriture de l'équation chimique sans passer par une transformation chimique réalisée en direct (au niveau macroscopique) ou par des représentations des entités microscopiques. Les deux heures suivantes étaient consacrées à de multiples exercices de pondération des équations chimiques, en vue de l'examen tout proche. Or, il lui est apparu, lors de la correction d'une tâche complexe ajoutée à son examen de chimie lors de la précédente session, que les élèves éprouvaient des difficultés à convertir les informations symboliques en des concepts fondamentaux du programme de chimie de troisième année (molécules, atomes, corps purs, réaction chimique). Ces mêmes élèves étaient pourtant tout à fait capables de pondérer une équation de réaction, mais la connexion avec les concepts chimiques était rompue. Notre professeur collaborant ressentait ainsi le besoin de faire évoluer ses dispositifs d'une simple opérationnalisation algorithmique vers une compréhension plus profonde des informations symboliques. C'est sur base de cet objectif que nous avons bâti notre collaboration.

L'équation de réaction étant abordée en fin de troisième année de l'enseignement secondaire, à deux semaines de l'examen de fin d'année, notre professeur collaborant nous a demandé de respecter un temps limité à trois périodes de cours (trois fois 50 minutes). Il nous a imposé comme objectif d'installer les règles d'écriture de l'équation chimique et d'amener à la démarche de pondération des équations. Il nous a également demandé de modifier, le cas échéant, la présentation formelle des supports de cours afin de les intégrer au mieux aux supports précédemment distribués.

Le matériel disponible dans le laboratoire de cet établissement était limité : nous avons garanti l'apport de notre propre matériel pour réaliser les transformations chimiques. Cette contrainte technique a également guidé la construction de notre séquence de leçons.

8.2.2. Choix des axes d'approche, hypothèses de travail

Toutes les analyses préalables, issues de nos recherches bibliographiques (difficultés des élèves, modèles des niveaux de savoir, épistémologie de la langue symbolique) et de nos propres développements (transposition didactique en FWB, taxonomie des systèmes sémiotiques, modèle des niveaux de signification, boucles symboliques, iconiques et langagières) ont constitué une mine de choix possibles pour élaborer la séquence de leçons[1].

Cependant, il aurait été insensé de vouloir traiter toutes les difficultés des élèves liées à la symbolique chimique relevées dans la littérature scientifique. Il était également impossible d'aborder toutes les significations véhiculées par les symboles de l'équation, ou de mettre en jeu l'ensemble des relations supposées entre les systèmes sémiotiques décrits dans notre taxonomie. Nous nous sommes donc servi, d'une part, de notre test diagnostique, et d'autre part des contraintes de terrain pour fixer des axes d'approche pertinents, susceptibles de générer des données exploitables dans le temps restreint de la recherche.

- Premier axe : nous avons souhaité mettre en place une **circulation entre niveaux de signification macroscopique, microscopique et symbolique**. Dans la séquence de leçons, cette circulation est mise en œuvre à chaque période de cours via la succession systématique de trois étapes : observation d'une transformation chimique, manipulation des représentations des entités microscopiques, écriture de la réaction chimique à l'aide de la langue symbolique des chimistes. Un retour aux entités microscopiques est prévu à la fin de chaque

[1] D'un point de vue chronologique, certaines analyses n'ont réellement été formalisées qu'après l'élaboration de la séquence de leçons. C'est le cas de la taxonomie des systèmes sémiotiques utilisés au début de l'enseignement-apprentissage de la chimie ou de l'analyse des « analogies de l'alphabet ». Cependant, lors de la construction de notre dispositif, nous étions déjà sensibilisé à la distinction entre la langue symbolique et les autres systèmes sémiotiques.

période. La circulation de l'équation symbolique vers le niveau de signification macroscopique est abordée de deux manières : en relevant les informations macroscopiques manquantes (par exemple, la présence d'une flamme) ou présentes (par exemple, les états de la matière) dans l'équation chimique, et en proposant une lecture de l'équation de réaction dans laquelle le coefficient est utilisé comme une proportion. Toutefois, l'interprétation de l'équation chimique au niveau macroscopique reste un exercice délicat, de par la sélection drastique d'informations qu'implique la construction de l'équation, ainsi que par le caractère polysémique des signes composant celle-ci.

- Deuxième axe : la langue symbolique des chimistes doit être apprise progressivement, en connexion avec les concepts qu'elle représente. Nous avons construit les trois périodes de cours autour **d'objectifs qui dévoilent par étapes la richesse de la symbolique chimique**. La première période est consacrée à l'installation de la trame des équations chimiques (réactifs, produits, formule chimique, indice, signe « + », flèche de réaction). La deuxième période est dévolue à la signification du coefficient stœchiométrique. La troisième période amène à la démarche de pondération des équations chimiques en utilisant les représentations microscopiques iconiques.
- Troisième axe : les différentes significations qui ont émergé de notre test diagnostique ne sont pas toutes de pertinence égale au début de l'enseignement de la symbolique chimique. En effet, il faut tenir compte des prérequis des élèves, ainsi que des objectifs opérationnels du professeur. **Une série de priorités a donc été définie** en collaboration avec le professeur.

1) Les concepts de réactifs et de produits doivent être définis selon quatre facettes durant la séquence de leçon : position dans une équation de réaction (à gauche de la flèche/à droite de la flèche), propriétés macroscopiques (les produits n'ont pas les mêmes propriétés que les réactifs), arrangement atomique (les produits ne présentent pas les mêmes assemblages atomiques que les réactifs) et chronologie dans une réaction chimique (les produits apparaissent quand les réactifs disparaissent).
2) Le signe « + » dans une équation chimique doit être distingué de son homologue dans une équation mathématique (et ce, même si l'équation chimique est, par divers aspects, proche d'une équation mathématique). Nous souhaitons en effet enrichir, dans l'esprit des élèves, la signification du signe « + » sans faire complétement oublier son rôle d'addition des masses, si l'on considère l'équation de réaction comme une version symbolique de la loi de Lavoisier. L'utilisation d'un type de lecture « moléculaire » de l'équation de réaction permet de traduire le signe « + » en une information plus qualitative : « et » ou

« mis en contact ». Il s'agira malgré tout de ne pas se cantonner à une telle traduction, au risque de favoriser une boucle langagière.

3) La flèche de réaction doit véhiculer l'idée d'une réaction chimique, d'une transformation des réactifs en produits. Elle ne peut représenter une simple égalité entre la masse des réactifs et celle des produits. C'est dans ce symbole que se situe l'ambivalence « conservation/transformation » inhérente à toute équation chimique. Cependant, il nous paraît essentiel d'insister sur l'aspect « transformation » lié à la flèche de réaction afin de distinguer celle-ci du signe « = », symbole véhiculaire puissant de la conservation de la masse.

4) Le coefficient stœchiométrique occupe une place importante dans le dispositif, une période de cours entière lui étant consacrée, construite en fonction de quatre objectifs spécifiques. Premièrement, le concept de coefficient est amené par les représentations des entités microscopiques : il est donc relié à un nombre de molécules ou d'atomes (dans le cas de la combustion du carbone et du magnésium, par exemple). C'est la première signification abordée et renforcée par une lecture moléculaire de l'équation de réaction. Deuxièmement, cette signification microscopique est associée à une signification de nature potentiellement plus macroscopique : le coefficient est avant tout une proportion entre réactifs et entre réactifs et produits. Troisièmement, le coefficient stœchiométrique est présenté dans le cadre d'une tâche de pondération d'une équation chimique. Il constitue l'outil permettant de pondérer l'équation chimique, mais également l'objectif réel de la pondération : la détermination des proportions réactionnelles. Quatrièmement, l'indice et le coefficient doivent être confrontés explicitement afin de montrer leur rôle spécifique dans l'écriture symbolique, et d'insister, en corollaire, sur la différence entre molécule et atome. Nous avons donc veillé à ce que ces significations diverses soient présentées dans la même période de cours, en vue de construire un réseau sémantique riche et équilibré.

5) Nous souhaitons enfin clarifier le concept de réaction chimique au niveau microscopique en amenant les élèves à l'idée d'une rupture et de formation de liaisons, sans pour autant formaliser le concept de liaison chimique. À cette fin, nous recourons à des représentations microscopiques compactes (arrangement de boules directement accolées, en deux ou en trois dimensions).

Notre hypothèse générale peut être formulée comme suit : une circulation explicite entre les niveaux de signification et entre systèmes sémiotiques favorise des significations jugées pertinentes au cours de chimie, et permet de réaliser efficacement un grand nombre de tâches ciblées. De plus, notre séquence de leçons est conçue pour réduire certaines confusions (atome/molécule, indice/coefficient, indice/valence) ou

conceptions tenaces (« + » comme simple addition, « ⟶ » comme équivalent au signe « = », etc.).

Nous avons choisi de ne pas prendre en compte certaines difficultés rencontrées dans la littérature scientifique, comme, par exemple, celles que pose la distinction (pourtant essentielle) entre réseau moléculaire et réseau ionique, considérant – dans cette séquence – que toute formule chimique rend compte d'une « molécule ». Nous étions en effet obligés d'assumer les prérequis construits par les professeurs du premier degré, parmi lesquels l'idée que toute matière est composée de molécules[2]. Nous postposons donc cette distinction à une année ultérieure, lors de l'enseignement-apprentissage formalisé des liaisons chimiques.

8.3. DESCRIPTION DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS

La séquence de leçon se trouve, en deux versions, dans les annexes D et E. La première version (annexe D) est destinée aux élèves. Elle ne correspond pas exactement à l'exemplaire transmis par le professeur collaborant à ses élèves, suite à des légères modifications de forme réalisées par celui-ci. Le contenu est par contre resté inchangé. La deuxième version (annexe E) est destinée au professeur et clarifie une série de points d'intérêt : objectifs didactiques, limites, développements conceptuels, etc. La séquence ayant été construite avant les développements théoriques majeurs décrits dans les chapitres précédents, nous nous basons toujours, dans ces documents, sur le modèle des niveaux de savoir de Houart, et non sur notre modèle des niveaux de signification. Cependant, la reformulation des objectifs et la mise en œuvre de la validation interne de notre séquence de leçons via le modèle des niveaux de signification permettent de gagner en pertinence pour les raisons exposées au chapitre 3[3].

Les trois objectifs développés dans le document destiné au professeur sont formulés spécifiquement afin de justifier l'intérêt concret d'une telle séquence pour un professionnel ; c'est pourquoi ils peuvent différer des axes d'approche développés plus haut. Nous avons ainsi insisté sur le caractère constructiviste de la démarche, sur l'exploration du niveau microscopique selon Houart et sur la clarification du concept de réaction chimique. Nous n'avons pas explicitement cité la construction progressive du langage symbolique et la lutte contre certaines confusions tenaces, même si ces deux thèmes sont abordés dans la séquence en elle-même.

Nous allons maintenant décrire la séquence de leçons période par période.

[2] Voir le chapitre 1.

[3] Par exemple, la difficulté de concevoir le niveau symbolique de Houart comme un niveau de conceptualisation chimique à part entière.

8.3.1. Première période de cours[4]

L'introduction à l'écriture d'une équation de réaction passe par trois phases distinctes : la phase d'action, la phase de formulation et la phase de vérification.

8.3.1.1. Phase d'action

Lors de la phase d'action, le professeur réalise d'abord la démonstration de la combustion d'un morceau de charbon de bois, ainsi que l'identification du dioxyde de carbone par le test à l'eau de chaux[5] (figure 1).

Figure 1. Test à l'eau de chaux : période 1 (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012)[6].

Nous avons choisi la combustion du carbone comme transformation chimique initiale pour cinq raisons majeures :

- La combustion du carbone (ici, un morceau de charbon de bois) est a priori connue des élèves dans leur vie quotidienne (notamment par l'entremise des barbecues).
- L'équation chimique de la combustion du carbone est simple[7] : elle ne présente aucun coefficient stœchiométrique supérieur à l'unité et comprend seulement deux types de symboles chimiques (« C » et « O »).
- Le test d'identification du gaz carbonique par l'eau de chaux permet de déterminer le produit de réaction.
- La combustion des non-métaux fait partie du programme de chimie en troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone (voir chapitre 1).
- La réaction est facile à mettre en place.

[4] Voir annexe D.
[5] Une sélection d'images représentatives de la combustion du carbone est fournie dans l'annexe D.
[6] Les illustrations des parties essentielles des périodes de cours sont issues des vidéos de nos tests in situ. Elles constituent essentiellement un support descriptif pour une meilleure visualisation des attendus.
[7] L'équation de combustion du carbone est également porteuse d'une série d'obstacles (renforcement de l'interprétation additive, état solide présumé du carbone) pour les apprenants.

Pendant la combustion, les élèves notent leurs observations. Rapidement, une mise en commun est effectuée. Le professeur demande alors aux élèves d'imaginer un moyen de transmettre ces informations à quelqu'un qui n'aurait pas vu l'expérience. Les élèves, aidés par le professeur, conviennent de la nécessité d'un langage commun, qui, pour être correct, doit respecter la structure des composés sous leur forme atomique ou moléculaire (niveau de signification microscopique). Dans le but d'accéder à cette structure, le professeur distribue aux élèves, formant des groupes de deux à trois individus, des sacs contenant des modèles en bois représentant les entités composant les réactifs et produits de la réaction de combustion du carbone. Ici commence l'exploration de la réaction chimique au niveau microscopique. Les molécules ou atomes, réactifs et produits, sont modélisés via des sphères en bois de différentes tailles, sans liaisons apparentes (c'est-à-dire en modèles dits « compacts »). Ces modèles moléculaires[8] sont placés dans des sacs opaques fermés, laissant le passage pour une main.

À l'état initial (réactifs) et final (produits) de la réaction correspond un sac contenant les modèles moléculaires appropriés (figure 2).

Figure 2. Modèles moléculaires tridimensionnels et compacts en bois ; sacs opaques avec étiquettes « réactifs » ou « produits » pour la première période de cours (combustion du carbone).

L'élève plonge une main dans chaque sac (figure 3) et dessine grossièrement ce qu'il perçoit par le toucher (figure 4).

[8] Nous utilisons le terme usuel « modèle moléculaire » pour décrire les représentations tridimensionnelles des molécules dans l'enseignement de la chimie. Bien entendu, le terme « modèle » est ici utilisé abusivement : il s'agit plutôt d'un type de représentation dans le cadre du modèle général de la liaison covalente. Les modèles moléculaires peuvent être compacts (sans liaisons apparentes), éclatés (de type « stick and ball »), etc.

Figure 3. Exploration des sacs contenant les modèles moléculaires (période 1, phase d'action) (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012).

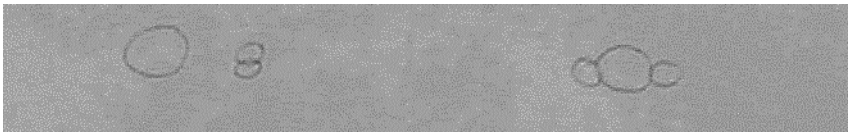


Figure 4. Représentations iconiques microscopiques d'un élève pour la combustion du carbone (période 1, phase d'action) (extrait de la vidéo du 04 mai 2012).

Ainsi, comme les chimistes en laboratoire, l'élève ne « voit » pas les molécules ni les atomes, mais réalise une représentation de la structure des composés au niveau microscopique à l'aide de l'un de ses cinq sens, le toucher. Ce passage d'une information sensorielle à une représentation iconique est susceptible d'amener une discussion sur la démarche de modélisation : en quoi le dessin de l'objet est-il différent de l'objet ? Quelles sont les caractéristiques conservées et celles qui sont perdues ? À la fin de la phase d'action, l'élève possède donc les observations de l'expérience de combustion (niveau macroscopique) ainsi qu'une représentation de la structure des composés de départ et d'arrivée (niveau microscopique).

Les variables didactiques relatives à l'ingénierie sont donc l'articulation macroscopique/microscopique (dans cet ordre) et le choix de ne pas montrer les modèles moléculaires aux élèves. Nous souhaitons favoriser deux comportements particuliers : la concrétisation du lien entre une représentation iconique microscopique et la substance observée d'un point de vue macroscopique (ici, le charbon et l'atome correspondant), ainsi que le renforcement de la distinction entre atome (une boule) et molécule (au moins deux boules associées).

8.3.1.2. Phase de formulation

Suit alors la phase de formulation pendant laquelle l'élève propose une symbolique pour exprimer les caractéristiques des molécules ou atomes qu'il a touchés et dessinés. L'élève associe à chaque sphère un symbole chimique, propose des formules chimiques

(figures 5a et 5b), place celles-ci sur un axe de temps (avant et après la réaction chimique) et tente enfin d'écrire lui-même l'équation de réaction de combustion.

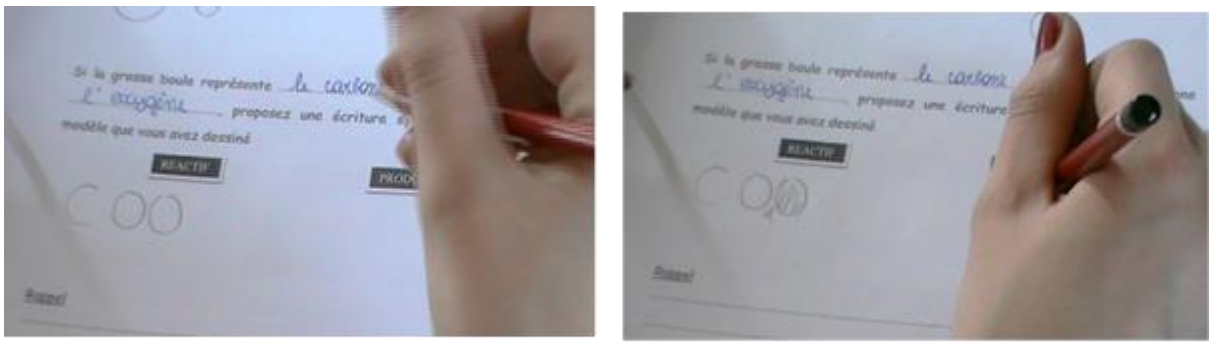


Figure 5. Exemples de productions d'élèves (période 1, phase de formulation). L'élève représente ici les réactifs de la combustion du carbone en utilisant les symboles chimiques. La figure (a) montre la première production ; la figure (b) montre une correction (introduction de l'indice) de la part de la même élève quelques secondes plus tard (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012).

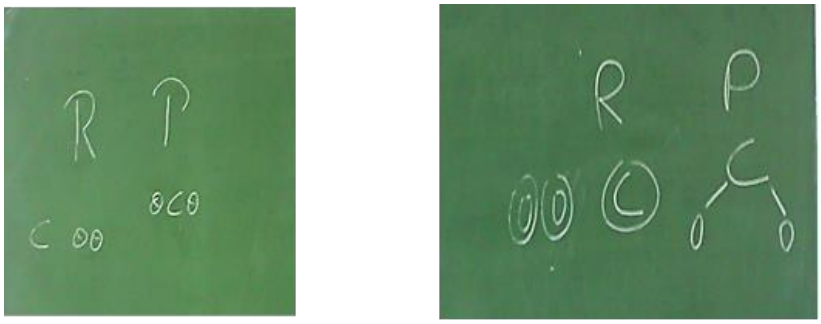
Nous posons l'hypothèse que les élèves ne proposent pas tous la même symbolique, même si l'écriture des formules chimiques – avec, entre autres, le rôle de l'indice – a été abordée précédemment[9].

En jouant sur la proposition d'une formule symbolique par l'élève (variable didactique de l'ingénierie), nous souhaitons faire émerger différentes représentations de l'indice, c'est-à-dire d'un certain nombre d'atomes présents dans une molécule donnée.

8.3.1.3. Phase de vérification

Le traitement de la réaction de combustion du carbone se clôture par une phase de vérification pendant laquelle les élèves discutent de leurs différentes propositions. Tout en étant soutenus par des indications données par le professeur, ils s'entendent sur la symbolique conventionnelle. Cette mise en commun s'opère en confrontant trois écritures symboliques sélectionnées par l'enseignant parmi les propositions des élèves (figures 6a et 6b).

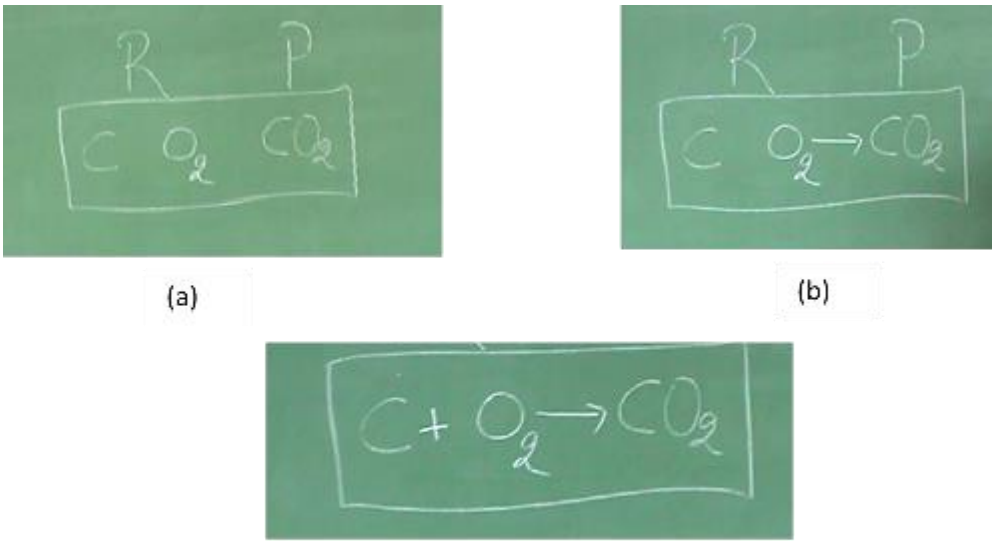
[9] Cette hypothèse est développée dans l'annexe E (document à destination du professeur).



(a) (b)

Figure 6. Exemples de productions d'élèves lors d'une mise en commun (période 1, phase de vérification). L'élève représente ici les réactifs de la combustion du carbone en utilisant les symboles chimiques. Les figures (a) et (b) montrent des propositions différentes sur un même tableau (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012).

Dans le cas des formules moléculaires du dioxygène et du dioxyde de carbone, le professeur insiste sur la notion d'indice en tant que convention pour exprimer le nombre d'atomes dans une molécule donnée. Il insiste aussi sur la notion de symbole atomique, lettre ou groupe de lettres représentant un atome donné. Une fois les formules moléculaires déterminées, le professeur expose alors les quatre conventions majeures de l'équation de réaction (figure 7) :



(a) (b)

(c)

Figure 7. Exemples de représentations symboliques lors d'une institutionnalisation (période 1, phase de vérification). Le professeur et les élèves construisent ensemble les conventions symboliques d'écriture de l'équation chimique. Les figures (a), (b) et (c) rendent compte de la construction progressive de l'équation (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012).

- Le temps s'écoule de gauche à droite, les réactifs sont notés à gauche et les produits à droite.

- Une flèche de réaction est ajoutée entre réactifs et produits afin de souligner le fait qu'il y a réaction ; la flèche peut être traduite par « réagissent pour former ».
- Si la réaction chimique comprend plusieurs réactifs (ou plusieurs produits), ils sont reliés par un signe « + », traduit en français par le terme « et » et indiquant la présence simultanée des réactifs (ou des produits) formant un ensemble.
- La loi de Lavoisier, vue précédemment, se vérifie : on trouve le même nombre de chaque type d'atome, représenté par leur symbole, de part et d'autre de la flèche de réaction.

L'acquisition de ces quatre conventions est renforcée par un exercice de lecture de l'équation de réaction en utilisant les entités microscopiques. L'accent est mis sur la coexistence de plusieurs lectures, dont l'une intègre le caractère multi-particulaire de la réaction chimique. Le recours aux symboles décrivant les états de la matière est envisagé comme une possibilité, sans constituer une obligation.

À ce stade, l'élève a donc « traduit » les informations collectées en observant l'expérience de combustion du carbone et en touchant les modèles moléculaires, dans un langage symbolique commun à tous les chimistes : celui utilisé dans l'écriture des équations de réaction. En comparant cette représentation avec les observations émises précédemment, les élèves et le professeur distinguent les informations reprises par l'équation de réaction (réactifs et produits, formules moléculaires, présence d'une réaction chimique) de celles qui ne s'y trouvent pas (flamme, fumée, mise à feu, cendres, structures moléculaires, évolution quantitative, nombre réel de molécules et d'atomes impliqués). Cette explicitation de l'équation de réaction en tant que représentation limitée est essentielle à la bonne compréhension du rôle des représentations en chimie. Elle permet aussi de cerner les caractéristiques de la langue symbolique (LS) en la distinguant des autres systèmes de représentation.

Un retour rapide sur nos trois axes de construction de la séquence permet de valider le contenu de la première période de cours. Premièrement, la circulation entre niveaux de signification macroscopique, microscopique et symbolique est bien vérifiée : les trois niveaux sont abordés dans la période de cours, avec une comparaison du contenu sémantique des symboles de l'équation de réaction par rapport aux observations macroscopiques réalisées. Deuxièmement, la langue symbolique des chimistes est construite par étapes, de l'écriture des formules moléculaires à la réalisation de l'équation de réaction en elle-même. Troisièmement, certaines significations sont explicitement préférées à d'autres : le « + » est relié au terme « et », la flèche à la présence d'une réaction chimique et à l'expression « réagissent pour former », l'indice au nombre d'atomes dans une molécule. De plus, certaines significations sont volontairement débattues. C'est le cas des significations mathématiques du signe « + » ou de la flèche de réaction : les références à l'addition et au signe égal sont explicitées

et discutées avec les élèves[10]. Le choix d'une confrontation et d'une institutionnalisation orchestrées par le professeur est susceptible d'amener à une prise de conscience plus forte des conventions : place de l'indice, place des réactifs et produits, significations chimiques du signe « + » et de la flèche.

8.3.2. Deuxième période de cours[11]

La succession des différentes phases s'applique ensuite à la réaction de combustion du magnésium.

8.3.2.1. Phase d'action

La phase d'action comprend la réalisation de la combustion du magnésium devant les élèves (figure 8) et l'exploration des sacs opaques associés à cette réaction. La réaction de combustion du magnésium présente plusieurs avantages :

- Elle est bien connue des élèves de par l'émission d'un lumière flash, information que ne transmet pas l'équation de réaction.
- L'équation de combustion du magnésium ne comporte que deux symboles chimiques (« Mg » et « O ») mais elle nécessite l'introduction de coefficients stœchiométriques supérieurs à 1.
- La combustion des métaux fait partie du programme de chimie en troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone (voir chapitre 1).
- La réaction est facile à mettre en place.

Figure 8. Réaction de combustion du magnésium avec flash lumineux (période 2, phase d'action) (extrait de la vidéo de la leçon du 11 mai 2012).

Le fait de réitérer une même structure de cours permet a priori de travailler la circulation macroscopique-microscopique-symbolique chez les élèves. Dans ce cas, c'est la substance « magnésium » qui fait l'objet de la démarche de représentation microscopique après observation de la substance au niveau macroscopique.

[10] Voir annexe E.
[11] Voir annexe D.

8.3.2.2. Phase de formulation

Cette phase est rendue plus facile par les conventions mises en place lors de la première période de cours, mais il subsiste la question du coefficient : comment rendre compte de la présence de deux atomes de magnésium et de deux « molécules » d'oxyde de magnésium ? Une production d'élève, à la figure 9, montre la représentation des réactifs et des produits de la combustion du magnésium en utilisant les symboles chimiques ; mais l'élève traite différemment la présence de deux atomes de magnésium (en ajoutant « 2 » en indice du symbole « Mg ») et de deux molécules d'oxyde de magnésium (dédoublement de « MgO »).

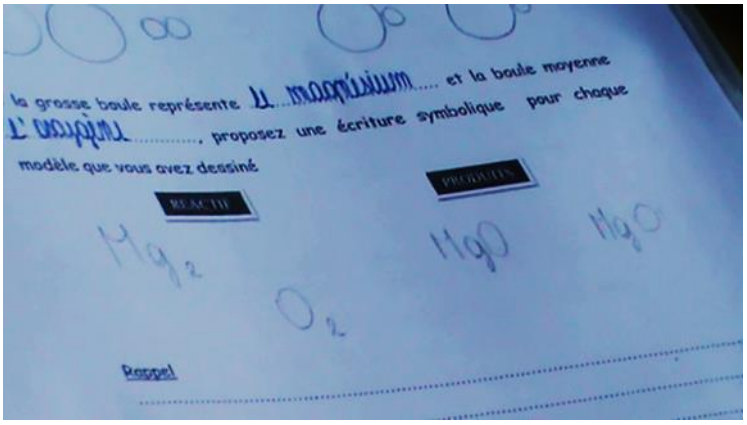


Figure 9. Exemple de production d'élève (période 2, phase de formulation) (extrait de la vidéo de la leçon du 11 mai 2012).

Cette fois, en jouant sur la proposition d'une écriture symbolique, nous souhaitons faire émerger différentes représentations du coefficient, c'est-à-dire d'un certain nombre d'atomes ou de molécules intervenant dans la réaction chimique. La position relative de l'indice et du coefficient est particulièrement discutée.

8.3.2.3. Phase de vérification

De nouveau, le professeur confronte plusieurs propositions d'écritures symboliques différentes (figure 10)[12]. Ce moment de confrontation est idéal pour discuter de la différence entre indice et coefficient, surtout si les propositions des élèves présentent une utilisation de l'un pour l'autre, comme dans la figure 9. Enfin, le coefficient stœchiométrique est installé en tant que nombre de molécules (si le corps est composé d'assemblages d'atomes) ou en tant que nombre d'atomes (si le corps est composé d'atomes et non de molécules).

[12] Nous aborderons plus précisément la démarche entreprise par notre professeur collaborant dans notre analyse a posteriori.

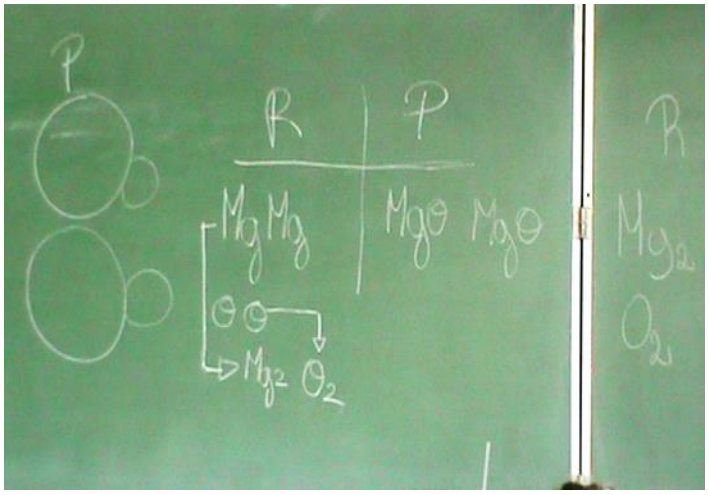


Figure 10. Exemples de productions d'élèves lors d'une mise en commun (période 2, phase de vérification) (extrait de la vidéo de la leçon du 11 mai 2012).

La signification du coefficient en tant que proportion est également mise en exergue, ce qui complète le panorama des significations que nous jugeons favorables à une utilisation efficace du coefficient[13]. Nous favorisons ainsi chez les élèves la construction d'un réseau sémantique complexe du coefficient stœchiométrique. Cependant, la signification macroscopique du coefficient est plus reconstruite à partir du niveau microscopique qu'observée expérimentalement (par l'entremise par exemple d'une mesure d'une perte de masse du magnésium et d'un volume de dioxygène après la réaction chimique). Notons que les trois axes définis plus haut structurent également cette période de cours.

8.3.3. Troisième période de cours[14]

La séquence de leçon se clôt par la réaction d'électrolyse de l'eau, déjà présentée par le professeur dans le cadre de l'enseignement–apprentissage de la loi des proportions définies de Proust. Nous avons choisi l'électrolyse de l'eau comme troisième expérience pour les raisons suivantes :

- Cette expérience a déjà été abordée dans le cours de notre professeur collaborant lors de la construction symbolique des formules chimiques. Les élèves ont donc une connaissance préalable des observations relatives à cette expérience.
- L'équation de réaction implique des formules chimiques simples (« H_2O », « O_2 », « H_2 ») ne comprenant que deux atomes différents (« H » et « O ») et la mise en place de coefficients stœchiométriques supérieurs à l'unité.

De nouveau, les trois phases sont réalisées. La phase d'action consiste, théoriquement, en la réalisation effective de l'expérience d'électrolyse de l'eau. Dans notre cas, le

[13] Voir annexe D.
[14] Voir annexe D.

professeur collaborant a souhaité gagné du temps en ne réalisant pas l'expérience au cours et en comptant sur les connaissances résiduelles des élèves à ce sujet.

Dans les sacs opaques, nous avons volontairement enlevé un modèle moléculaire de l'eau et un modèle moléculaire de dihydrogène, afin d'obtenir une équation de réaction qui nécessite une pondération. La phase de formulation en langue symbolique des chimistes est a priori plus simple car les substances en jeu (eau, dioxygène, dihydrogène) ont déjà été rencontrées par les élèves lors du cours de chimie. De plus, cette activité constitue la troisième phase de formulation en trois périodes consécutives.

Le professeur organise au tableau la mise en commun de différentes propositions d'élèves (figure 11). Lors de la phase d'institutionnalisation, le professeur peut insister sur la signification du signe « + » en tant qu'ensemble des réactifs ou ensemble des produits. En effet, la présence d'un seul réactif (ici, l'eau) nécessite de considérer la signification du signe « + » du côté des produits.

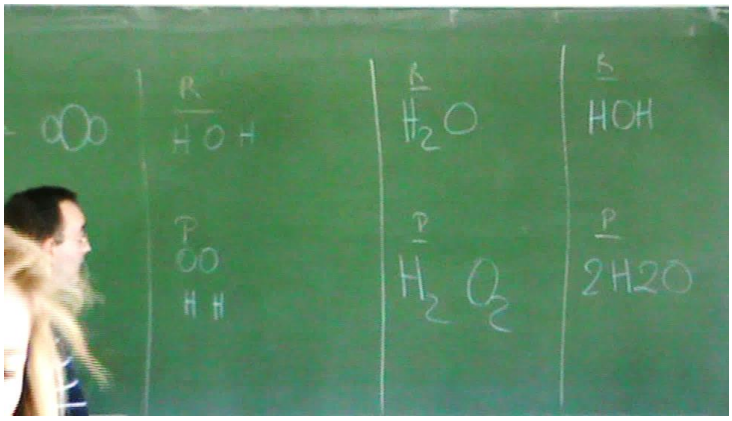


Figure 11. Exemples de productions d'élèves lors d'une mise en commun (période 3, phase de vérification). L'élève représente ici les réactifs et les produits de l'électrolyse de l'eau (extrait de la vidéo de la leçon du 25 mai 2012).

L'objectif principal de cette ultime phase de la séquence est d'aborder la démarche de pondération des équations de réaction en insistant sur l'utilisation de représentations iconiques microscopiques (figure 12).

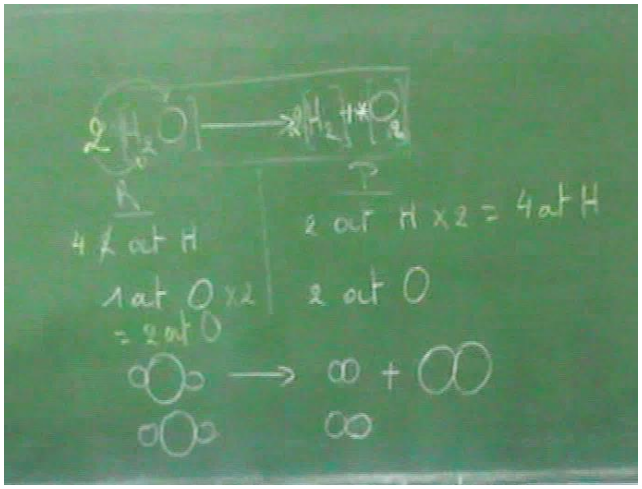


Figure 12. Exemples de démarche de pondération de l'équation d'électrolyse de l'eau en utilisant des représentations moléculaires (période 3, phase de vérification) (extrait de la vidéo de la leçon du 25 mai 2012).

L'intention du professeur collaborant est ici d'imposer l'usage de ces représentations iconiques microscopiques lors de l'examen de fin d'année, afin d'obliger les élèves à circuler entre langue symbolique et registre iconique, et donc, potentiellement, entre la symbolique chimique et les concepts qu'elle représente.

Du point de vue de l'ingénierie didactique, nous jouons sur deux variables : l'introduction du « manque » d'atomes par le niveau microscopique (inventaire sur base du contenu des sacs opaques) et le travail de pondération en circulant entre langue symbolique et représentations iconiques microscopiques. Nous souhaitons ainsi que les élèves testés incarnent plus clairement le coefficient et l'indice dans des significations microscopiques (plutôt que symboliques), tout en conservant un lien avec l'expérience macroscopique (volume double de dihydrogène par rapport au dioxygène).

8.3.4. Synthèse de fin de séquence[15]

La synthèse de fin de séquence regroupe tous les éléments fondamentaux sous forme de réponses à cinq questions posées durant la séquence. La première question s'énonce ainsi : « Comment transmettre des informations à des personnes n'ayant pas vu la réaction ? ». Elle permet de revenir sur la nécessité d'un langage symbolique universel, fait de conventions à assimiler et à respecter. La question « Comment écrire ce qu'il se passe durant une réaction chimique ? » impose l'équation de réaction comme outil de communication incontournable (figure 13). Les conventions topographiques (place de chacun des signes dans l'équation) sont particulièrement mises en évidence.

[15] Voir annexe D.

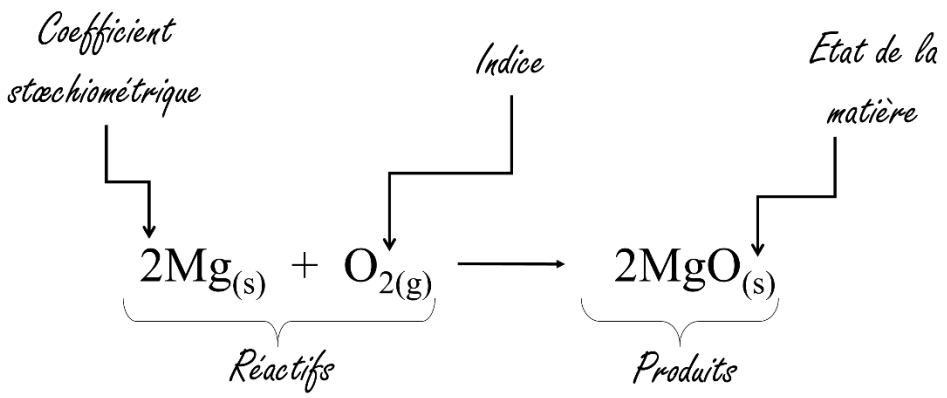


Figure 13. Extrait de la synthèse de fin de séquence : relevé de certaines conventions d'écriture de l'équation de réaction.

La troisième question porte sur la différence entre les observations réalisées au niveau macroscopique et une écriture symbolique comme une équation de réaction. Il convient de montrer que l'équation ne rend compte que de certaines informations choisies : formules chimiques des réactifs et produits, proportion réactionnelle, états de la matière, etc. La quatrième question (« Comment peut-on lire une équation chimique ? ») aborde les lectures possibles, du mono-particulaire au multi-particulaire. La dernière question porte sur la démarche de pondération et revient sur l'importance des coefficients stœchiométriques.

8.4. MÉTHODOLOGIE

Cette séquence de leçons a été testée in situ avec notre professeur collaborant en mai 2012 à l'école B. Nous avons pu la réaliser dans cinq classes (pour un total de 110 élèves) :

- la classe 3A1 constituée de 23 élèves en option scientifique (« sciences générales ») ;
- la classe 3A3 constitué de 20 élèves en option « langues » ;
- la classe 3A4 constituée de 20 élèves en option « langues » ou en option artistique ;
- la classe 3A5 constituée de 23 élèves en option artistique ;
- la classe 3A6 constituée de 24 élèves en option « théâtre ».

La classe de 3A2, constituée de 24 élèves en option scientifique ou en option « langues », a été choisie comme classe-témoin de par la présence de deux types d'élèves (certains en option scientifique, d'autres dans une autre option) en proportion quasiment égale (respectivement 13 pour 11). La séquence dispensée à la classe-témoin correspond à l'ancien cours de notre professeur collaborant, c'est-à-dire une approche rapide de l'équation de réaction suivie de deux heures d'exercices de pondération des équations chimiques.

Nous avons filmé trois fois la première période, deux fois la deuxième période et deux fois la troisième période de la séquence de leçons. De plus, dans la mesure de nos disponibilités, nous avons assisté à 75 % des cours donnés et pris note des données pertinentes. À la fin du premier essai de chaque période, une réunion avec le professeur collaborant a permis de rectifier certains éléments du cours proprement dit : formulation des définitions, dynamique de cours, renforcement de certaines significations, explicitation de confusions possibles.

Un test de fin de séquence, soumis deux semaines après les cours lors de l'examen de fin d'année, a été développé afin de valider ou non les comportements attendus suite à notre analyse a priori.

L'analyse a posteriori a pour but de répondre aux trois questions de recherche suivantes, à l'aide des observations faites lors du cours et des productions des élèves recueillies lors du post-test :

1) La séquence de leçons permet-elle de renforcer certaines significations ciblées, associées aux symboles utilisés dans une équation de réaction ?
2) La séquence, construite sur la circulation entre niveaux de signification, permet-elle aux apprenants de s'approprier différentes significations chimiques véhiculées par les symboles de l'équation de réaction ?
3) La séquence de leçons permet-elle de favoriser la conversion d'une information symbolique en une représentation iconique microscopique ?

Dans la section suivante, nous préciserons les items de notre post-test et justifierons leur intérêt dans le cadre de ces questions de recherche.

8.5. DESCRIPTION DU POST-TEST

Le post-test, consultable à l'annexe F, se compose d'une série de questions ouvertes et de questions à choix multiples, en fonction de l'objectif ciblé.

8.5.1. Questions a), b) et c)

Les trois premières questions ont un sujet commun : les concepts de réactifs et de produits (figure 14).

Dans la question a), il s'agit de tester la maitrise des règles d'écriture de l'équation chimique : les élèves doivent placer le terme « réactifs » en-dessous des symboles à gauche de la flèche et le terme « produits » en-dessous des symboles à droite de la flèche. Dans la question b), les élèves doivent donner deux différences entre réactifs et produits. Cette question ouverte permet de voir dans quelle mesure les élèves dépassent la distinction symbolique (à gauche/à droite de la flèche) et proposent ainsi d'autres

différences relatives à d'autres niveaux (propriétés, arrangement atomique, etc.). Dans la question c), c'est un point commun entre réactifs et produits que doivent fournir les élèves. Nous attendions principalement que ceux-ci évoquent la conservation du nombre d'atomes[16] de chaque type, à la base de la loi de conservation de la masse de Lavoisier, et donc de la démarche de pondération des équations chimiques.

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

....

a) Inscris les termes « réactifs » ou « produits » sur les pointillés ci-dessus.

b) Décris deux différences entre les réactifs et les produits.

……

……...

c) Qu'est-ce qui est commun aux réactifs et aux produits dans une réaction chimique ?

……

……

Figure 14. Extrait du post-test : questions a), b), et c) relatives aux réactifs et aux produits.

Ces trois questions interrogent les différentes facettes des réactifs et des produits que nous avions l'intention de travailler dans la séquence de leçons.

8.5.2. Question d)

La signification du signe « + » est sondée sous la forme d'une question à choix multiples (figure 15). Chaque item rend compte de l'une des principales significations relevées dans le test diagnostique décrit au chapitre 7 : le « + » en tant que symbole de la réaction chimique (item 1), le « + » en tant que mise en contact (item 2), le « + » en tant que symbole de mélange (item 3), le « + » en tant que signe d'addition (item 4).

[16] Rappelons que le concept d'élément n'est pas connu des élèves à ce stade de leur apprentissage. Ce sont donc les atomes qui sont conservés dans cette première approche.

d) Que signifie le signe « + » ?

Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- Le signe « + » signifie qu'il y a réaction chimique entre les deux réactifs.
☐ 2- Le signe « + » signifie que les réactifs sont mis en contact.
☐ 3- Le signe « + » signifie que l'on mélange les réactifs.
☐ 4- Le signe « + » signifie que l'on additionne les réactifs entre eux.

Figure 15. Extrait du post-test : question d) relative à la signification du signe « + ».

Les élèves peuvent sélectionner plusieurs items. Une combinaison d'items montrerait que l'élève est conscient de la variété des significations véhiculées par le signe « + ». Notre séquence de leçons ayant pour but de favoriser le « + » en tant que mise en contact, nous attendions que les élèves choisissent massivement cette réponse, mais qu'ils délaissent le « + » en tant que signe d'addition et le « + » en tant que symbole de la réaction chimique.

8.5.3. Question e)

Elle porte sur la signification de la flèche (figure 16). Également sous la forme d'une question à choix multiples, la question e) comporte 5 items qui rendent compte de significations fréquemment rencontrées lors de notre test diagnostique.

e) Que signifie la flèche ?

Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- La flèche représente la réaction chimique.
☐ 2- La flèche indique les résultats de la réaction : les produits.
☐ 3- La flèche a la même signification que le signe égal en mathématiques.
☐ 4- La flèche signifie « réagissent pour former ».
☐ 5- La flèche signifie que les réactifs sont mis en contact.

Figure 16. Extrait du post-test : question e) relative à la signification de la flèche.

Notre séquence de leçons poursuit le double objectif de renforcer les significations associées aux items 1 et 4 : la flèche symbolise la réaction chimique et peut être traduite comme « réagissent pour former ». A contrario, les items 2 (signification symbolique), 3 (signification mathématique) et 5 (signification à prêter au signe « + ») sont censés être moins souvent sélectionnés par les élèves à la fin de la séquence de leçons.

8.5.4. Question f)

La question f) est consacrée au sens du coefficient stœchiométrique (figure 17). De nouveau, 5 items de réponse sont proposés aux élèves, chaque item étant représentatif d'une signification préalablement définie lors de notre test diagnostique.

f) Que signifie le chiffre 4 dans **4**Na ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- C'est le nombre de molécules de Na impliquées dans la réaction.
☐ 2- C'est le nombre d'atomes de Na impliqués dans la réaction.
☐ 3- Dans cette réaction, il faut quatre fois plus de sodium que de dioxygène.
☐ 4- C'est un coefficient qui permet la pondération de l'équation de réaction.
☐ 5- C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de Na dans une molécule.

Figure 17. Extrait du post-test : question f) relative à la signification du coefficient stœchiométrique.

Notre séquence tend à favoriser a priori les items 2 (nombre d'atomes), 3 (proportion) et 4 (coefficient pour pondérer). Notre but est que les élèves répondent en sélectionnant simultanément ces trois items, démontrant ainsi leur capacité à assigner des significations diverses à un symbole donné. Les items 1 (confusion entre atome et molécule) et 5 (confusion entre indice et coefficient) ne devraient idéalement pas recueillir beaucoup de suffrages.

8.5.5. Question g)

L'indice ne constitue pas une priorité en soi dans notre séquence de leçons. Cependant, par cette question, nous avons souhaité évaluer la capacité des élèves à distinguer indice et coefficient, d'une part, et indice et valence d'autre part (figure 18).

g) Que signifie le 2 dans Na_2O ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- C'est un coefficient : il indique le nombre d'atomes de sodium impliqués dans la réaction.
☐ 2- C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de sodium dans la molécule de Na_2O.
☐ 3- C'est la valence du sodium, c'est-à-dire le nombre de liaisons que le sodium peut effectuer avec un autre atome.

Figure 18. Extrait du post-test : question g) relative à la signification de l'indice.

L'item 3 est une proposition incorrecte : l'indice « 2 » n'est pas la valence du sodium. Il aurait aussi été possible de proposer un item impliquant la traduction de l'indice en la valence de l'oxygène, comme dans notre test diagnostique.

8.5.6. Question h)

La question h) est un copier-coller de la dernière question du test diagnostique : « Que se passe-t-il, selon toi, au niveau des réactifs, pendant la réaction chimique ? » Nous n'attendions pas de comportement précis, mais nous pensons que les productions des élèves peuvent nous donner des indications sur leur capacité à mobiliser des concepts chimiques macroscopiques et microscopiques.

8.5.7. Question i)

L'ultime question du post-test a pour but d'évaluer la capacité de convertir les informations symboliques (LS) en une représentation microscopique iconique (RI^3) en utilisant ce que notre professeur collaborant a appelé les « modèles en boules », c'est à dire des représentations compactes bidimensionnelles des molécules, sans représenter les liaisons chimiques (figure 19).

i) En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium.

Figure 19. Extrait du post-test : question i) relative à la conversion d'informations symboliques en une représentation microscopique iconique.

De nombreuses compétences sont nécessaires pour réaliser une telle tâche : identifier les atomes et les molécules, distinguer indice et coefficient, respecter une légende donnée, etc. Les productions des élèves nous renseigneront sur la performance réelle de ceux-ci quand il s'agit d'utiliser une équation chimique dans une tâche qui constitue, dans ce cas, une partie de la nouvelle démarche de pondération des équations prescrite par notre professeur collaborant. Nous avons également soumis cette question à la classe-témoin afin de montrer que cette tâche de conversion n'est en rien triviale, et qu'elle nécessite un temps d'enseignement-apprentissage.

8.5.8. Défi

Nous terminons le post-test par un défi facultatif (figure 20), similaire à la question i), mais avec une difficulté supplémentaire : la présence de coefficients supérieurs à deux et d'un corps pur composé plus complexe à représenter (« Al_2O_3 »). Nous avons été particulièrement attentifs à l'abstention à ce défi ainsi qu'à la relation entre la question

i) et le défi. Cette question-défi n'a pas été posée aux élèves de la classe-témoin (3A2), car la tâche de conversion constitue un élément important de la validation interne de notre séquence de leçons. Nous avons par conséquent fait le choix que seules les classes-tests devaient être soumises à deux tâches de conversion.

DEFI : En utilisant le modèle en boules vu au cours, représente la réaction symbolisée par l'équation suivante :

$$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$$

Figure 20. Extrait du post-test : question défi relative à la conversion d'informations symboliques en une représentation microscopique iconique, avec des coefficients supérieurs à deux et un corps pur composé.

8.6. RÉSULTATS ET ANALYSE A POSTERIORI

8.6.1. À partir des observations

8.6.1.1. À propos de la durée globale

Du point de vue des contraintes de terrain, notre séquence de leçons s'est insérée avec succès dans l'intervalle de temps défini par le professeur : les trois parties de cours se sont étalées sur les trois périodes de 50 minutes prévues. Notons que cette répartition est inégale : la première partie a pris, en moyenne, 60 minutes, tandis que les deux autres parties ont chacune nécessité 45 minutes en moyenne. Il est normal que la première partie ait duré plus longtemps que les deux autres, car elle implique la mise en place des trois phases (action, formulation, validation) ainsi que l'installation des symboles structurant l'équation de réaction (réactifs, produits, flèche, signe « + »). D'une certaine manière, les deux autres parties profitent du temps consacré à l'introduction de la trame didactique de la séquence et de l'équation chimique. Cette validation de la contrainte temporelle est importante : notre séquence de leçons devait être applicable dans le temps scolaire, afin de respecter les élèves et le professeur collaborant qui s'étaient engagés dans la recherche.

8.6.1.2. À propos de la phase d'action

Les manipulations expérimentales prévues dans les phases d'action n'ont posé aucun problème de réalisation effective[17]. Nous avons conçu un kit simple de réalisation de la

[17] Rappelons que l'électrolyse de l'eau n'a pas été réalisée durant la séquence proprement dite mais quelques semaines auparavant, dans le cadre de l'approche des formules moléculaires.

combustion du charbon de bois (ainsi que le test d'identification du gaz carbonique) qui a permis à notre professeur collaborant d'œuvrer sans se soucier de la présence du matériel dans ses propres locaux. À l'inverse, le matériel nécessaire à la combustion du magnésium et à l'électrolyse de l'eau était déjà disponible dans le local de stockage de l'école B. La partie dédiée à l'exploration des sacs opaques a présenté de nombreux avantages pratiques : durée limitée, accessibilité de la tâche, facilité d'installation et de rangement. Aucune dégradation ou utilisation incorrecte des sacs n'a été observée durant les périodes d'utilisation.

8.6.1.3. À propos de la phase de formulation

C'est la phase la plus courte lors de chacune des trois périodes. Conçue pour passer de la représentation iconique microscopique, issue de l'exploration tactile des sacs opaques, à la langue symbolique, la phase de formulation était a priori facilitée par le fait que la construction des formules moléculaires et une partie de la nomenclature des corps minéraux avaient été enseignées deux mois auparavant. Nos observations (revoir par exemple les figures 6, 9, 10 et 11) mettent en évidence le fait que les élèves éprouvent de réelles difficultés à mobiliser un savoir-faire jugé acquis (en l'occurrence, écrire correctement des formules chimiques) à partir de représentations iconiques microscopiques. Des formulations différentes ont été proposées dans chaque classe testée, et, plus étonnant encore, pour chaque période de cours. Le constat est clair : la conversion d'un registre iconique à la langue symbolique constitue une difficulté majeure pour les élèves, et ce même si cette conversion est travaillée à plusieurs reprises. Notre professeur collaborant n'a pas caché son étonnement face à ce phénomène. Il a cependant réagi pertinemment en menant plus lentement la phase de confrontation des propositions d'écriture symbolique prévue dans la séquence de leçons. Les productions temporaires des élèves n'ont pas été systématiquement relevées ; nous pouvons néanmoins décrire deux types de raisonnements.

Premièrement, certains élèves se basent sur la structure de la représentation iconique qu'ils ont dessinée pour construire la formule moléculaire : chaque boule est remplacée par le symbole chimique correspondant (figure 21). Des écritures comme « OCO » (pour le gaz carbonique) ou « HOH » (pour l'eau) sont typiques de ce type de raisonnement.

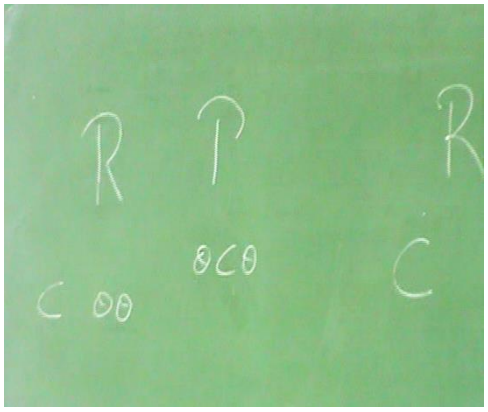


Figure 21. Exemples de productions d'élèves lors d'une mise en commun. L'élève représente ici les réactifs de la combustion du carbone en utilisant les symboles chimiques. La proposition symbolique copie l'agencement atomique dans la représentation iconique microscopique (extrait de la vidéo de la leçon du 04 mai 2012).

On peut également placer dans la même catégorie des propositions telles qu'illustrées à la figure 22. Dans ce cas, le dédoublement de la molécule d'oxyde de magnésium est traduit par « MgO MgO », répétant la structure des représentations iconiques microscopiques repérables en haut de la figure.

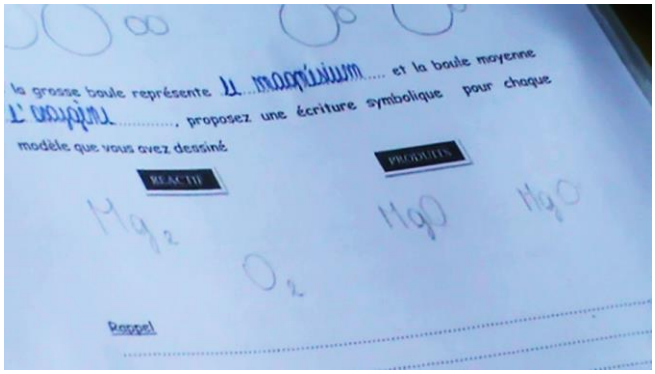


Figure 22. Exemple de production d'élève. L'élève représente ici les réactifs et les produits de la combustion du magnésium en utilisant les symboles chimiques. L'écriture « MgO MgO » emprunte sa structure aux représentations iconiques microscopiques supra (extrait de la vidéo du 11 mai 2012).

L'autre type de raisonnement est également représenté à la figure 22. On observe ainsi un usage incorrect de l'indice dans une écriture comme « Mg_2 » (ou comme « Mg_2O_2 », repérable à la figure 10). Une production de ce genre est utile dans notre séquence de leçons car elle enrichit la confrontation des diverses propositions symboliques : le coefficient et l'indice peuvent être distingués plus aisément grâce à des propositions radicalement opposées (« Mg_2 » versus « 2Mg »). La phase de formulation a fortement sensibilisé notre professeur collaborant et ses élèves à l'importance de la mobilisation de prétendus acquis dans le cadre d'une tâche de conversion d'un système sémiotique à un autre.

8.6.1.4. À propos de la phase de vérification

Phase ultime de chaque période, la phase de vérification débute par la confrontation des propositions symboliques des élèves. Désarçonné, dans un premier temps, par les réponses des élèves, notre professeur collaborant a progressivement su tirer parti de ces différentes écritures pour mettre en relation les représentations iconiques microscopiques et la langue symbolique. Les formes de cette mise en relation ont également varié : d'abord posée en illustration tardive de la réfutation d'une écriture, la conversion en retour d'une proposition symbolique à une représentation iconique a assez vite constitué le principal levier de réfutation pour la suite des tests (figure 23). En effet, la conversion en retour de « Mg_2 » en une représentation iconique (deux boules accolées) montre que l'on ne revient pas à la représentation iconique initiale (deux boules séparées).

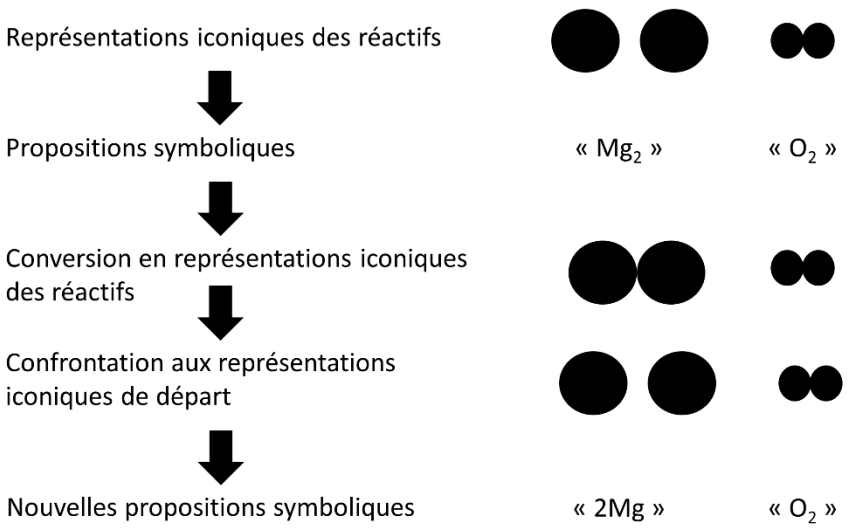


Figure 23. Étapes dans la confrontation des propositions symboliques des élèves, par une conversion en représentations iconiques.

La puissance de cette conversion en retour a été très utile pour amorcer la (re)définition de l'indice et la définition du coefficient stœchiométrique. Ci-dessous, un extrait du verbatim[18] montre le moment où le professeur collaborant décide d'avoir recours à la représentation iconique en retour pour insister sur une erreur dans l'écriture symbolique.

- P : Celui-ci, par contre, j'aime moins. Parce qu'en fait… qui est venu faire celui-ci ? (il montre le tableau avec sa baguette). Celui-ci, quand tu me mets « Mg_2 », ça voudrait dire que tu as le « 2 »… c'est quoi le petit « 2 » ? en bas à droite… C'est ce qu'on appelle un…
- E : Un indice.

[18] Leçon du 11 mai 2012 (phase de vérification).

- P : Un indice, oui. Et l'indice t'indique quoi ?
- E : Hmmm, combien on en prend.
- P : Combien on prend quoi ?
- E : D'atomes.
- P : D'atomes dans… ?
- E : Dans une molécule.
- P : Dans une molécule, or souviens-toi, quand tu as touché ce qu'il y avait dans le sac, tu avais (il dessine deux cercles séparés au tableau) deux de magnésium. Est-ce qu'elles étaient collées l'une à l'autre ?
- E : Non.
- P : Donc, tu ne peux pas considérer effectivement que c'est une molécule, parce que la molécule c'est l'association de tes atomes. Or, ici, tes atomes, ils sont séparés. Ça va ? T'aurais dû l'indiquer où le « 2 » ?
- E : Devant.
- P : Ah. Voilà, t'aurais dû le mettre ici, le « 2 ». Dans ton produit que tu obtiens… (il montre « Mg_2O_2 »)
- E : J'aurais dû mettre le « 2 » devant aussi.
- P : Oui, je suis tout à fait d'accord avec toi. **Quand tu as touché ton produit, est-ce que tu as senti deux boules (il hésite)… Et si tu représentes ceci par ton modèle en boules**, **ça va te donner quoi ?**
- E : **Ce sera tout attaché.**
- P : Tu vas devoir dessiner combien de boules qui représentent le magnésium ?
- E : Deux.
- P : Et combien de boules qui représentent l'oxygène ?
- E : Deux.
- P : **Donc, tu auras quelque chose comme ceci alors (il dessine quatre boules collées les unes aux autres). Est-ce que c'est ce que tu as senti dans le sac ?**
- E : Non.
- P : Donc, est-ce que c'est correct de mettre des indices ici ? Non, donc ça, c'est pas bon (il barre les indices « 2 » dans « Mg_2O_2 »). Par contre, la proposition que tu m'as donnée, de mettre un « 2 », ça, c'est correct.

Plutôt que de faire référence à ce qui a été touché (donc, aux représentations iconiques réalisées lors de la phase d'action), le professeur collaborant choisit de faire représenter l'écriture symbolique incorrecte selon le modèle en boules, afin de montrer le décalage avec les représentations iconiques de départ.

L'exercice de pondération qui clôt la troisième période est fondé sur une circulation répétée entre le registre iconique microscopique et la langue symbolique. Cette

circulation est amorcée par les exercices de conversion en retour réalisés lors des phases de vérification précédentes.

8.6.1.5. Des critiques à prendre en compte

Deux critiques importantes ont été émises par notre professeur collaborant. La première concerne la longueur excessive de la première partie, due, notamment, à l'explicitation de ce que contient (et ne contient pas) une équation chimique, ainsi qu'à la mise en œuvre de différentes lectures littérales de l'équation. La deuxième critique concerne le manque d'entraînement prévu pour la pondération des équations de réaction. C'est en effet sur ce sujet que la séquence classique du professeur collaborant et la nôtre divergent le plus. Contrairement au professeur qui prévoyait deux heures d'exercices, nous ne proposons plus qu'un unique exercice en relation avec l'électrolyse de l'eau. Or, les examens étant très proches de notre test in situ, il était impossible de consacrer une heure supplémentaire à un travail intensif de la pondération des équations chimiques sans déborder sur les nécessaires révisions de fin d'année.

8.6.1.6. Une classe-témoin ?

Enfin, nous avons souhaité assister à un cours de la classe-témoin, pour nous assurer que l'enseignement dispensé par le professeur collaborant différait bien de celui observé dans les classes testées. Si la trame de la séquence initialement dispensée a été bien respectée (une heure d'introduction aux symboles de l'équation de réaction et deux heures d'exercices de pondération), il nous est apparu que le professeur collaborant avait adapté son comportement, en y ajoutant des lectures variées de l'équation ou encore en recourant aux représentations iconiques microscopiques lors des exercices de pondération des équations chimiques. Ces ajustements, produits naturels de la co-construction et de la mise en œuvre effective de notre séquence de leçons, ont ainsi permis l'intégration de certains de nos outils et de nos pratiques dans la classe-témoin. Ce phénomène doit être pris en compte quand il s'agira d'interpréter les résultats du post-test chez les élèves de la classe-témoin, celle-ci ayant été plus que probablement influencée par la pratique répétée d'autres dispositifs jugés (consciemment ou inconsciemment) plus efficaces par le professeur collaborant. De plus, selon l'ingénierie didactique d'Artigue (1988), c'est avant tout l'analyse des comportements des élèves testés qui entre en ligne de compte dans la validation interne de notre séquence : l'interprétation des productions d'élèves dont le contenu enseigné n'est pas totalement maîtrisé par le chercheur s'accompagne nécessairement d'importantes réserves, que nous ne manquerons pas de préciser, le cas échéant.

8.6.2. À partir du post-test

Dans ce passage en revue des principaux résultats du post-test[19], nous donnerons systématiquement le résultat global de la cohorte testée. Dans certains cas, nous préciserons les résultats obtenus classe par classe si l'analyse met en évidence un phénomène particulier. Comme nous l'avons dit plus haut, ceux de la classe témoin sont parfois fournis et brièvement commentés mais ne constituent pas un impératif d'analyse. La notation « tot-2 » indique la fréquence relative moyenne enregistrée uniquement dans les classes testées.

8.6.2.1. Les réactifs et les produits

1) Résultats

La première question (1a) consistait à demander à l'élève de placer les termes « réactifs » et « produits » à l'emplacement ad hoc sous l'équation de réaction. Plus de neuf élèves sur dix (92 %) réalisent cette tâche correctement, ce qui démontre que la définition symbolique des réactifs (à gauche de la flèche) et des produits (à droite de la flèche) n'est pas un problème pour une grande majorité des élèves de notre échantillon (tableau 1).

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Correctes	101	92 %
Incorrectes	7	6 %
Pas de réponse	2	2 %

Tableau 1. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la première question du post-test : « Inscris les termes "réactifs" ou "produits" sur les pointillés ci-dessus. »

Notons que les réponses incorrectes enregistrées ne sont pas toutes dues à l'interversion des deux termes. Trois élèves ont recopié les symboles de l'équation (parfois en sélectionnant certains d'entre eux), ce qui ne constitue en soi qu'une mauvaise compréhension des consignes de la question posée.

La deuxième question (1b) permet d'estimer la capacité des élèves à distinguer les réactifs et les produits. Nous demandions de citer deux différences entre ceux-ci, afin de voir si les élèves étaient capables de circuler entre les niveaux de signification, ou, moins ambitieusement, de quitter le niveau symbolique pour accéder à d'autres systèmes sémiotiques. Le tableau 2 présente la tendance des élèves de la cohorte à

[19] L'intégralité du traitement quantitatif des résultats issus du post-test sont disponibles dans l'annexe G.

répondre en donnant deux différences, une différence, ou en ne répondant pas à la question.

Nombre de réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
2	41	37 %
1	57	52 %
0	12	11 %

Tableau 2. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par nombre de réponses données, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la deuxième question du post-test : « Décris deux différences entre les réactifs et les produits. »

Au-delà d'une abstention relativement importante (11 % des élèves), il apparaît que bien moins de la moitié des élèves (37 %) énoncent deux différences entre les réactifs et les produits. Ils sont plus nombreux dans la classe d'élèves en option scientifique (3A1) dans laquelle le taux de réponses comprenant deux différences culmine à 65 %[20]. Il semble que la plupart des élèves de la cohorte pensent qu'une définition des réactifs et des produits autour d'un seul critère suffise pour exprimer deux différences (par exemple : les réactifs sont les corps avant la réaction, les produits sont les corps après la réaction). Ceci dénote une difficulté dans la compréhension de ce qui est demandé : deux propriétés différentes (une pour les réactifs, une pour les produits) forment-elles une seule et unique différence exprimée ?

Nous avons créé des catégories pour rendre compte des types de différences relevées par les élèves. Le tableau 3 présente les résultats globaux[21], c'est-à-dire le nombre d'élèves et les fréquences relatives moyennes pour toutes les classes testées.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	50	45 %
Plusieurs réactifs / un seul produit	21	19 %
Les états de la matière	18	16 %
La quantité d'atomes	12	11 %
Pas de « + » chez les produits	12	11 %
Pas de réponse	12	11 %

Tableau 3. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par principales catégories de réponses pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la

[20] Voir annexe G.
[21] Les tableaux 3 et 4 n'indiquent que les catégories principales, associées à des fréquences relatives suffisamment importantes. Pour l'ensemble des réponses données, voir annexe G.

deuxième question du post-test : « Décris deux différences entre les réactifs et les produits. » Le total des fréquences relatives est supérieur à 100 % de par la présence de réponses doubles.

Pour ce qui concerne cette question, notre analyse s'articule en quatre points.

1) L'éventail des réponses à la question des différences entre réactifs et produits s'avère très large. On compte ainsi six catégories principales (si l'on compte l'abstention), parmi 17 catégories de réponses différentes qui sont apparues au moins une fois.

2) La réponse largement majoritaire est au croisement des trois niveaux de signification : « Les produits sont les corps après la réaction et les réactifs sont les corps avant la réaction ». Cette formulation laisse entendre à la fois une interprétation macroscopique (disparition des réactifs/apparition des produits), une interprétation symbolique (à gauche/à droite de la flèche de réaction) et une interprétation microscopique (réarrangement des atomes lors de la réaction chimique). C'est également la première définition donnée dans notre séquence de leçons[22]. Elle est majoritaire dans tous les groupes, sauf dans la classe de 3A1 (élèves en option scientifique) où les états de la matière constituent la réponse la plus fréquemment énoncée[23]. Cette distinction temporelle entre réactifs et produits nourrit la définition même de la réaction chimique : une réaction s'opère quand des réactifs se transforment en produits. Elle est véhiculée par l'équation chimique qui représente précisément cette relation entre les réactifs, les produits et la réaction chimique.

3) Dans la réaction de combustion du sodium, on observe un seul type de produit (« Na_2O ») contre deux types de réactifs (« Na » et « O_2 »). Les élèves ont relevé ces caractéristiques singulières : 19 % des élèves ont parlé de la différence entre le nombre de réactifs et le nombre de produits, et 11 % ont souligné l'absence d'un « + » chez les produits. Ces deux réponses décrivent une même particularité de l'écriture symbolique de cette équation : la présence du signe « + » uniquement entre les réactifs. En outre, la distinction entre corps purs simples (chez les réactifs) et corps purs composés (chez les produits) est relevée par certains élèves (6 % des élèves).

4) 11 % des élèves ont répondu que le nombre d'atomes était différent chez les réactifs et chez les produits. Nous verrons, dans l'analyse de la question 1c, que le nombre d'atomes constitue aussi (parfois pour les mêmes élèves) un critère *commun* aux réactifs et aux produits. Comment expliquer ce paradoxe ? Nous posons l'hypothèse que c'est l'identité des réactifs et des produits qui est ici en

[22] Voir annexe D.

[23] Cette tendance ne se retrouve pas chez les élèves en option scientifique de la classe-témoin (1 seul élève mentionne les états de la matière). Ce n'est donc pas a priori une particularité des élèves en option scientifique.

jeu. Au chapitre 7, nous avons observé que certains élèves de grade 11 choisissaient (ou non) d'intégrer le coefficient stœchiométrique dans l'identité des réactifs. Les conséquences de ce choix sont révélées ici. Si le coefficient ne fait pas partie de l'identité des réactifs et des produits, alors le nombre d'atomes change effectivement : les formules chimiques « Na » et « O_2 », prises dans leur ensemble ou indépendamment, comportent un nombre de symboles (et donc d'atomes) différent de « Na_2O ». C'est ce qui fait que les produits sont différents des réactifs : il y a réarrangement atomique, modification structurelle des entités présentes initialement. Ce changement d'identité est consubstantiel à la notion de transformation. Par contre, si le coefficient fait partie de l'identité des réactifs et des produits, alors il apparaît que le nombre d'atomes total ne change pas entre réactifs et produits. Pour vérifier l'égalité, il faut dans ce cas prendre l'ensemble des réactifs et l'ensemble des produits, coefficients compris. Cette conservation du nombre d'atomes est consubstantielle à la conservation de la masse lors d'une réaction chimique. La position adoptée par un élève dépend donc de trois facteurs : la dichotomie « transformation des substances/conservation des atomes » ; le fait de prendre en considération les réactifs et les produits, soit individuellement, soit dans leur ensemble ; le fait de tenir compte ou non du coefficient stœchiométrique dans l'identité des réactifs et des produits.

Les productions des élèves rendent parfois compte de certaines confusions connexes à la stricte distinction entre les réactifs et les produits : entre niveau macroscopique et niveau microscopique (« Dans les réactifs, l'oxygène est gazeux et dans les produits, il est solide »), entre mélange et corps pur composé (« Les réactifs ne sont pas un mélange alors que les produits sont un mélange »), entre équation chimique et équation mathématique (« Le produit, c'est le résultat des réactifs »). Ces exemples démontrent une nouvelle fois l'intérêt diagnostique de telles questions ouvertes, laissant à l'élève la possibilité de s'exprimer librement sur une question posée.

La troisième question (1c) sonde la capacité des élèves à déterminer un point commun entre réactifs et produits. Le tableau 4 présente les résultats globaux pour l'échantillon testé, par catégories de réponses. Le total recensé dans la colonne « nombre d'élèves » dépasse le nombre d'élèves testés de par la présence de réponses doubles, présentant plus d'une catégorie de réponses alors qu'un seul point commun était demandé.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Le type d'atomes	30	27 %
Le nombre d'atomes	23	21 %
Pas de réponse	18	16 %
La masse	17	15 %
Le type de molécules	5	5 %
La possibilité de se transformer	4	4 %

Tableau 4. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par catégories principales de réponses pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la troisième question du post-test : « Qu'est-ce qui est commun aux réactifs et aux produits dans une réaction chimique ? »

On peut d'emblée noter la grande variété de catégories de réponses produites par les élèves[24]. Cependant, quatre catégories présentent une fréquence relative particulièrement importante.

1) Le taux d'abstention est interpellant : 16 % des élèves n'ont pas souhaité répondre à cette question. La fréquence relative liée à l'abstention atteint même 25 % dans la classe de 3A6[25].

2) 30 élèves (27 % de la cohorte) précisent que c'est le type d'atomes qui est commun aux réactifs et aux produits, ce qui en fait la réponse la plus fréquente. Cette réponse n'est pourtant majoritaire que dans 2 classes sur 6. L'identification du type d'atomes passe par l'identification des symboles communs de part et d'autre de la flèche de réaction. Il est intéressant de noter que les élèves n'ont pas parlé de symboles (1 seul élève y fait explicitement référence) mais d'atomes, passant ainsi d'une signification symbolique à une signification microscopique.

3) Pour 21 % de l'échantillon, c'est le nombre d'atomes qui est conservé. Cette réponse est majoritaire dans 4 classes sur 6. Pour faire cette proposition, les élèves doivent avoir identifié les symboles communs chez les réactifs et chez les produits et pris en compte les indices et coefficients stœchiométriques pour chacun d'eux. Il est cependant probable que le souvenir récent de la démarche de pondération des équations ait fourni un point commun directement mobilisable pour toute équation chimique pondérée : le nombre d'atomes de part et d'autre doit être identique.

   Remarquons que l'indécision autour des concepts de réactifs et de produits (pris comme des entités individuelles ou comme des ensembles) vient, comme dans la question 1b, brouiller les représentations des élèves : une dizaine d'entre eux

[24] Voir annexe G.
[25] Voir annexe G.

ajoute que si le type d'atomes est conservé, le nombre d'atomes varie. C'est de nouveau le choix de tenir compte ou non du coefficient stœchiométrique qui est ici en cause.

4) La conservation de la masse n'est citée que par 15 % des élèves. Le lien entre la loi de Lavoisier et l'équation de réaction est ainsi mobilisé par quelques élèves et dans chaque classe, sans que ce ne soit la réponse la plus fréquente. Cette faible fréquence peut s'expliquer par le fait que la conservation de la masse ne constitue qu'un troisième pas dans l'interprétation d'une équation : d'abord, on identifie les atomes présents ; ensuite, on détermine le nombre d'atomes de chaque type en traitant indices et coefficients ; enfin, on conclut que si le nombre d'atomes est conservé, la masse des réactifs est égale à la masse des produits. Pour le dire autrement, si la conservation du type d'atomes est directement observable (via les symboles chimiques) dans une équation de réaction, la conservation de la masse est une interprétation qui demande davantage de circulation entre symboles et concepts. Il est cependant possible que les élèves court-circuitent ce raisonnement en énonçant une loi qu'ils savent être fondamentale pour la construction d'une équation chimique.

Enfin, notons que pour 5 % des élèves, c'est le type de molécules qui constitue le point commun entre réactifs et produits. Il s'agit probablement du résultat de la confusion entre atome et molécule.

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

Avons-nous atteint les objectifs que nous nous étions assignés à propos des réactifs et des produits ? Pour rappel, nous souhaitions que les concepts de réactifs et de produits soient distingués selon quatre facettes durant la séquence de leçon : position dans une équation de réaction, propriétés macroscopiques, arrangement atomique et chronologie dans une réaction chimique. La première définition abordée dans la séquence de leçon se centre sur la distinction temporelle (avant réaction/après réaction) alors que la définition énoncée dans la synthèse insiste sur la position dans l'équation de réaction (à gauche/à droite). Le changement de propriétés macroscopiques et celui de l'arrangement atomique ne sont pas cités en regard des définitions des réactifs et des produits. Cependant, les propriétés macroscopiques distinctes des réactifs et des produits sont observables lors de l'expérience au début de chaque période, tandis que le réarrangement atomique est perceptible dans la phase de représentation iconique par les élèves.

La question 1a nous montre que le positionnement des réactifs et des produits dans l'équation de réaction ne pose pas de problème majeur (92 % de réponses correctes).

L'analyse des réponses à la question 1b montre que les quatre facettes se manifestent dans chaque classe. Mais celle qui concerne la chronologie par rapport à la réaction chimique (corps avant la réaction/corps après la réaction) est largement favorisée par rapport aux autres. Le fait que la position des réactifs et des produits dans une équation chimique ne soit plus mentionnée dans les réponses à la question 1b est tout à fait normal, vu que cet aspect a déjà été mis en avant à la question 1a. L'idée que les produits soient le résultat d'un arrangement atomique différent des atomes présents dans les réactifs ne fait par contre pas l'objet d'une description explicite de la part des élèves. On peut néanmoins trouver des traces implicites de cette caractéristique des produits dans certaines productions d'élèves : « les réactifs se combinent pour former le produit », « Le produit est le résultat du mélange des réactifs », etc. Il apparaît ainsi que le réarrangement atomique nécessite d'être explicité pour être, d'une part, intégré par les élèves, et, d'autre part, mobilisé lors d'un questionnaire.

Ensuite, la question relative au point commun entre réactifs et produits semble avoir déstabilisé une partie des élèves, comme le montre le taux d'abstention (16 %). Le recours à des réponses se situant au niveau de signification microscopique (types d'atomes, nombre d'atomes, type de molécules) dépasse largement, en termes de fréquences relatives, les réponses faisant référence à la conservation de la masse (niveau macroscopique). On observe très peu de références explicites aux symboles ou à l'écriture symbolique. Il en ressort que les concepts microscopiques (atomes, molécules) véhiculés par les formules chimiques sont, la plupart du temps, reconnus et traités par les élèves de la cohorte, ce qui était l'un des objectifs de notre séquence de leçons.

Relevons, pour conclure, qu'une majorité confortable (plus de 90 %) des réponses données par les élèves étaient correctes du point de vue chimique, et ce pour les trois questions. Les deux principales sources d'erreurs sont la confusion entre atomes et molécules et la difficulté à identifier si les coefficients stœchiométriques font partie ou non de l'identité des réactifs et des produits.

8.6.2.2. Le signe « + »

1) Résultats

La question 1d est une question à choix multiples qui permet aux élèves de se positionner face aux significations du signe « + ». Le tableau 5 collecte le nombre d'élèves et les fréquences relatives associées au nombre de réponses cochées. Pour chaque catégorie, les types de combinaisons sont présentés avec leur fréquence relative.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
1 réponse	63	57 %
Mise en contact	29	26 %
Addition	15	14 %
Réaction	14	13 %
Mélange	5	5 %
2 réponses	44	40 %
Mise en contact et mélange	12	11 %
Mise en contact et addition	12	11 %
Mise en contact et réaction	6	6 %
Réaction et addition	6	6 %
Mélange et addition	5	5 %
Réaction et mélange	3	3 %
3 réponses Mise en contact et mélange et addition	2	2 %
0 réponse	1	1 %

Tableau 5. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par nombre de réponses cochées et par combinaisons cochées pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la quatrième question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

Les choix les plus fréquents ne sont constitués que d'un seul item. Le « + » en tant que mise en contact se retrouve ainsi dans plus d'un quart des propositions dans nos classes testées, ce qui en fait le choix le plus fréquent. Ce résultat était attendu, puisque, dans notre séquence de leçons, le signe « + » est explicitement traduit par le fait que les réactifs forment un ensemble, qu'ils sont mis en contact[26].

Les items qui rendent compte du « + » en tant qu'indicateur d'addition et de réaction présentent une fréquence relative comparable (autour de 13 %). Ces deux interprétations ne sont pourtant pas favorisées par notre séquence de leçons.

En outre, l'item « mélange » est de loin la réponse isolée la moins choisie par les élèves (5 %). L'idée de mélange, pour les élèves testés, ne suffit donc pas à rendre compte de ce que signifie le signe « + ».

Cependant, on remarque, dans le tableau 5, que tous les élèves ne se sont pas contentés de sélectionner une réponse parmi les quatre items proposés : plus de 2 élèves sur 5 ont coché au moins deux réponses. Les combinaisons de deux items les plus fréquentes comprennent la signification du signe « + » en tant que mise en contact, associée soit à l'idée de mélange, soit à celle d'addition. Pour certains élèves, l'idée d'une mise en contact doit donc être complétée par le fait qu'une réaction chimique est en jeu, ou qu'une addition (vue comme un ajout, une addition de masse ?) peut être envisagée comme partie prenante de l'opération.

[26] Voir annexe D.

Le tableau 6 nous indique la somme de toutes les occurrences de chaque item, dans les choix d'élèves à une ou plusieurs réponses[27].

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Mise en contact	61	55 %
Addition	40	36 %
Réaction	29	26 %
Mélange	27	25 %

Tableau 6. Nombre d'élèves et fréquences relatives additionnés pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issus des réponses à la quatrième question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

Premier constat : les quatre significations du signe « + » présentent des fréquences relatives supérieures à 24 %, ce qui montre qu'elles coexistent dans les classes. D'ailleurs, les quatre significations (avec des fréquences très variables) sont représentées dans chaque classe testée.

Un deuxième constat s'impose : le « + » en tant que mise en contact est cité par plus de la moitié des élèves (55 %). Cette signification constitue manifestement une base solide pour une petite majorité d'élèves puisqu'elle est majoritaire dans toutes les classes, sauf dans la classe-témoin (où elle est supplantée par la signification du « + » en tant que mélange).

Un troisième constat porte sur l'acception mathématique du signe « + ». En effet, le « + » en tant qu'addition présente des fréquences relatives remarquablement stables dans toutes les classes (entre 30 % et 39 %), ce qui souligne la grande résilience de cette signification. Il semble que le signe « + » dans une « équation » ne puisse être totalement disjoint de la signification qu'il porte en mathématiques.

Quatrième constat : le « + » en tant que réaction peut constituer soit une signification suffisante, soit une signification qui vient compléter une autre interprétation. L'idée que le « + » implique une réaction chimique reste en tout cas pertinente pour une partie des élèves testés.

Enfin, cinquième et dernier constat, le « + » en tant que mélange représente majoritairement une information venant compléter des significations jugées plus importantes, comme le « + » en tant que mise en contact ou le « + » en tant qu'addition.

[27] La répartition classe par classe est consultable à l'annexe G.

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

Pour rappel, le signe « + » est, par nature, polysémique. Nous reproduisons ci-dessous une représentation des niveaux de signification entourant le signe « + » issue du chapitre 7 (figure 24).

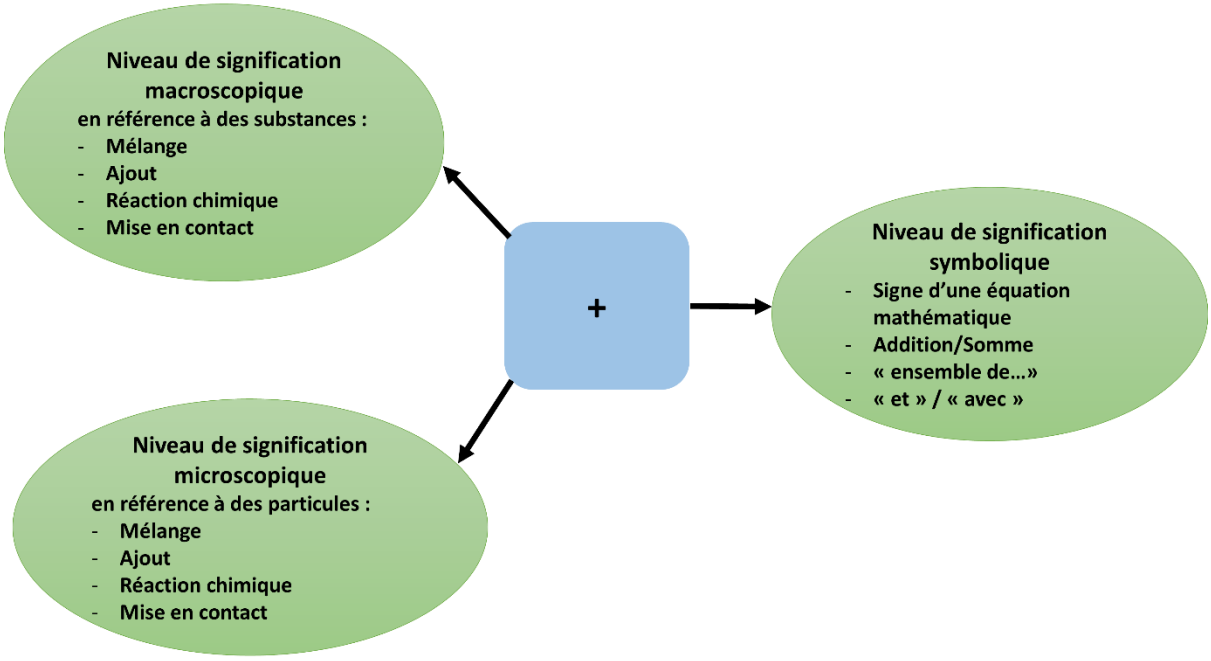


Figure 24. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés au signe « + » dans une équation de réaction.

Nous avions pour objectif de favoriser auprès des élèves la signification du « + » en tant que mise en contact des réactifs, car elle est potentiellement connectée aux niveaux de signification microscopique et macroscopique. Cette signification est renforcée par l'utilisation, dans notre séquence de leçons, du terme « et » dans une lecture littérale de l'équation chimique. Comme aucun item du post-test ne contient la proposition « et » ou la proposition « ensemble de », le « + » en tant que mise en contact devait être le choix prioritaire des élèves testés.

Nous souhaitions aussi réduire l'importance de la signification symbolique du « + » en tant qu'addition, de manière à distinguer équation chimique et équation mathématique. Nous avons insisté, dans la séquence de leçons, sur le fait que le signe « + » dans une équation chimique devait être vu différemment qu'en mathématiques, dans une perspective plus concrète d'ensemble de réactifs ou d'ensemble de produits, au contact l'un de l'autre.

Le premier objectif est atteint : le « + » en tant que mise en contact est la signification majoritaire choisie par les élèves (55 % de la cohorte). Il est toutefois intéressant de

remarquer que le verre est aussi à moitié vide : 45 % des élèves n'ont pas reconnu la mise en contact comme une signification pertinente du signe « + ». La concurrence des autres significations mises au jour au chapitre 7 semble donc non négligeable.

Le deuxième objectif, lui, n'est pas vraiment atteint au bout de la séquence de leçons. Nous avons en effet mis en évidence une fréquence remarquable de la signification du signe « + » en tant qu'addition dans les représentations des élèves. Ce résultat n'est en fait pas une surprise : tant d'un point de vue épistémologique (dans l'histoire des disciplines) que programmatique (dans le curriculum), le signe « + » est associé initialement à l'addition mathématique. Il faudra donc plus que probablement tenir compte de la coexistence de ces deux significations dans l'esprit des élèves, quel que soit le dispositif didactique mis en œuvre.

De plus, les autres significations proposées (mélange et réaction) sont loin d'être abandonnées par les élèves (plus de 24 % de fréquence relative). Il est donc nécessaire d'associer les termes « mélange » et « réaction » à des concepts et à des symboles plus forts, afin de ne pas surcharger le réseau sémantique véhiculé par le signe « + ».

8.6.2.3. La flèche de réaction

1) Résultats

La question 1e est une question à choix multiples qui permet aux élèves de se positionner face aux significations de la flèche de réaction. Dans le tableau 7, on peut voir que les combinaisons de deux ou trois items dépassent en fréquence les réponses ne comprenant qu'un seul item. Ce phénomène est peut-être le signe d'un enrichissement sémantique de la flèche de réaction dans les représentations des élèves testés. Le tableau 8 collecte les fréquences cumulées pour chaque item.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
1 réponse	52	47 %
Réagissent pour former (RPF)	38	35 %
Réaction chimique	7	6 %
Indique les produits	4	4 %
Égal	3	3 %
2 réponses	46	42 %
RPF et indique les produits	21	19 %
RPF et réaction chimique	14	13 %
Égal et indique les produits	6	6 %
Autres réponses	5	5 %
3 réponses	12	11 %
RPF et indique les produits et réaction	10	9 %
Autres réponses	2	2 %

Tableau 7. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par nombre de réponses cochées et par combinaisons cochées pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la cinquième question du post-test : « Que signifie la flèche ? ».

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
« Réagissent pour former »	89	81 %
Indique les produits	45	41 %
Réaction chimique	32	29 %
Égal	12	11 %
Mise en contact	3	3 %

Tableau 8. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes, additionnés pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la cinquième question du post-test : « Que signifie la flèche ? ».

Si nous analysons les résultats item par item, plusieurs constatations émergent :

1) Seuls trois choix (parmi les 14 choix différents recensés) dépassent une fréquence relative de 10 % : le choix unique de l'item « réagissent pour former » et deux combinaisons comprenant ce même item. Ce constat est important, car notre séquence de leçons avait pour but de lier la flèche de réaction à l'expression prototypique « réagissent pour former ». Le tableau 8 confirme cette tendance : l'item « réagissent pour former » est sélectionné par plus de quatre élèves sur cinq (81 % de la cohorte). La réponse unique « réagissent pour former » est majoritaire dans toutes les classes, sauf dans la classe 3A3 où elle est dépassée par la combinaison de réponses « réagissent pour former » et « indique les produits ». Les résultats sont comparables dans la classe-témoin, ce qui s'explique par le fait que le professeur collaborant fait usage de l'expression prototypique « réagissent pour former » dans sa démarche classique.

2) Derrière ce plébiscite, il est intéressant de noter que la flèche indique les produits pour 41 % des élèves, toutes combinaisons confondues. Cependant, cette signification est rarement citée seule (4 % des élèves) : elle constitue le plus souvent un complément d'information dans une combinaison. L'idée que la flèche indique les produits étant une signification hors du champ de la discipline « chimie », il semble important pour les élèves de donner une « coloration chimique » à la flèche en ajoutant une signification faisant référence à la réaction chimique (item « réaction » ou item « réagissent pour former »).

3) La flèche en tant qu'indication de la réaction chimique rencontre un succès mitigé (29 % des élèves), ce qui est explicable en partie par la concurrence de l'expression prototypique « réagissent pour former ». Les deux items sont combinés par 13 % des élèves.

4) L'interprétation de la flèche de réaction comme équivalent au signe « = » est choisie, en réponse unique, par seulement trois élèves. Cette signification est globalement peu rencontrée (11 % des élèves toutes combinaisons confondues). Elle n'est pas du tout citée dans la classe 3A1 alors que sa fréquence relative la plus élevée (25 %) est associée à la classe-témoin[28]. Il est possible que les nombreux exercices de pondération d'équations soumis aux élèves de la classe-témoin aient provoqué une assimilation de la flèche au signe « = » chez certains de ces élèves.

5) La flèche en tant que mise en contact ne convainc que 3 élèves sur 110. Ce résultat était attendu du fait que c'est le signe « + » qui est associé à la mise en contact dans notre séquence de leçons.

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

La flèche de réaction est connectée aux trois niveaux de signification (figure 25).

[28] Voir annexe G.

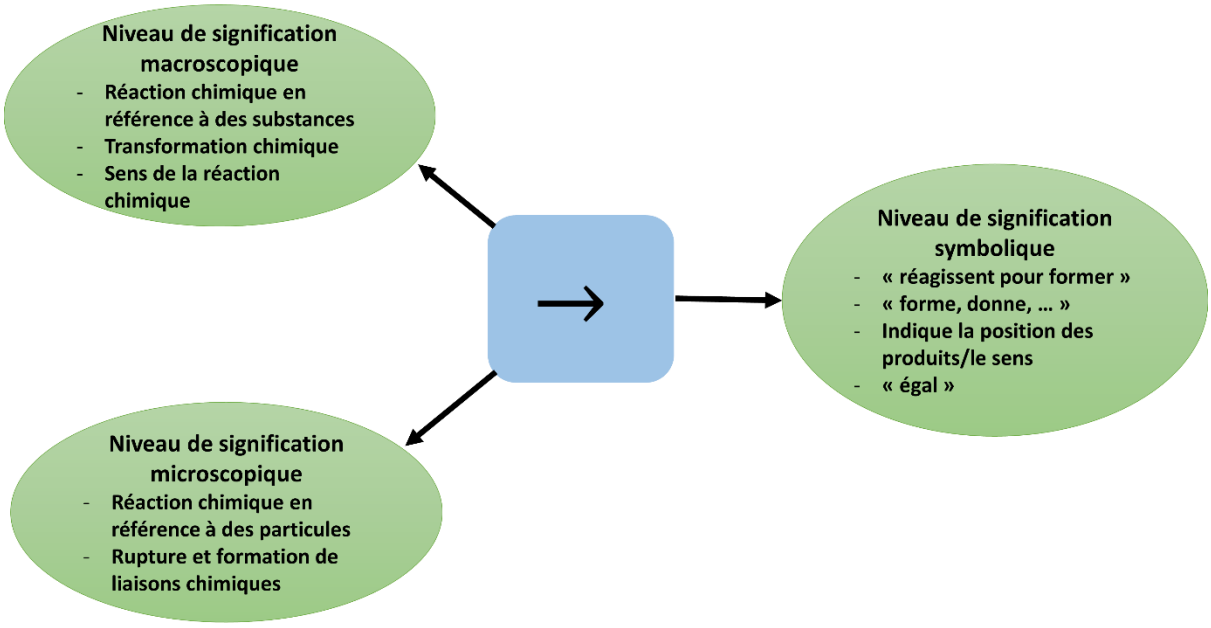


Figure 25. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associés à la flèche dans une équation de réaction.

Notre séquence de leçons a été conçue pour favoriser l'association entre le concept de réaction chimique et le symbole qu'est la flèche dans une équation chimique. Nous avons notamment renforcé ce lien en utilisant l'expression prototypique « réagissent pour former », véhiculaire du fait qu'une réaction chimique est en jeu. Bien entendu, il ne s'agit pas de laisser se créer une boucle langagière, mais bien de connecter la flèche à différentes significations en s'appuyant sur l'expression « réagissent pour former ». Cet objectif semble atteint pour 81 % des élèves, qui associent la signification de la flèche à cette expression. Même si la réponse unique est relativement fréquente (35 %), l'item « réagissent pour former » est le plus souvent combiné à d'autres significations, ce qui était également l'un des objectifs de notre séquence de leçons. La combinaison de trois items, en particulier, a été repérée dans 12 propositions d'élèves, ce qui est un résultat satisfaisant. Chacune de ces combinaisons de trois items cochés comportent l'expression « réagissent pour former », qui sert donc de base à un réseau sémantique enrichi de la flèche de réaction.

Dans le chapitre 7, nous avons montré que les fréquences relatives associées à l'expression « réagissent pour former » variaient fortement en fonction des écoles (de 5 % dans l'école B à 73 % dans l'école C). Par notre analyse, nous confirmons l'importance des dispositifs didactiques mis en œuvre dans le renforcement de certaines significations : notre séquence de leçons suffit pour fixer une signification choisie à un symbole donné, dans le cas de la flèche de réaction. A contrario, l'item « réaction chimique » est assez peu sélectionnée (moins de 30 % des élèves testés), ce qui peut

être justifié par la préséance donnée par les élèves à l'item « réagissent pour former » dans le même domaine sémantique.

Nous souhaitions également déforcer l'assimilation de la flèche de réaction au signe « = ». Notre post-test montre qu'un élève sur dix environ associe les deux symboles, ce qui constitue une fréquence relative assez faible.

Nous pouvons noter également que, dans les choix exprimés par les élèves, l'item relatif au signe « = » n'est jamais associé à un item relatif à la réaction chimique. Il y a donc bien séparation nette entre ce qui est de l'ordre de la transformation (réaction chimique, « réagissent pour former ») et ce qui est de l'ordre de la conservation (signe « = »). Seule la signification courante, qui veut que la flèche indique « quelque chose », est associée à l'un ou l'autre de ces aspects. Elle peut en effet indiquer soit le résultat d'une transformation, soit le résultat d'une addition. Cette signification ancrée dans le vécu des élèves (carte, code de la route, signalétique dans les bâtiments, etc.) est encore sélectionnée par 41 % des élèves testés.

Enfin, il est intéressant de noter la fréquence d'une combinaison d'items ne faisant pas référence à la réaction chimique : l'item relatif au signe égal associé à l'item « indique les produits » (6 élèves sur 110). Dans une certaine mesure, il s'agit potentiellement d'une combinaison performante : derrière la signification usuelle de la flèche (indiquer « quelque chose »), l'élève voit la nécessité de préciser qu'il existe une égalité cachée qu'il lui faut expliciter. Si la réaction chimique (et donc la notion de transformation) est la grande absente de ce type de combinaison, la conservation de « quelque chose » d'indéfini est par contre bien présente.

8.6.2.4. Le coefficient stœchiométrique et l'indice

1) Résultats

Dans cette partie, nous allons sonder les représentations des élèves testés concernant le coefficient stœchiométrique (tableaux 9 et 10) et l'indice (tableau 11) après notre séquence de cours.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
1 réponse	39	35 %
Coefficient pour pondérer	15	14 %
Nombre d'atomes	11	10 %
Nombre de molécules	9	8 %
Indice	4	4 %
2 réponses	65	59 %
Coefficient et nombre de molécules	24	22 %
Coefficient et nombre d'atomes	19	17 %
Indice et nombre d'atomes	7	6 %
Autres réponses	15	14 %
3 réponses	6	6 %
Coefficient et nombre de molécules et nombre d'atomes	3	3 %
Autres réponses	3	3 %

Tableau 9. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes par nombre de réponses cochées pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la sixième question du post-test : « Que signifie le chiffre 4 dans "4Na" ? »

La question portant sur le coefficient stœchiométrique comporte cinq items différents : coefficient pour pondérer, nombre d'atomes, nombre de molécules, indice et proportion. Le tableau 9 indique que les combinaisons de deux items sont majoritaires (59 % des élèves testés). Nous avons dénombré, dans notre échantillon, un total de 14 choix différents pour cette question, ce qui montre la grande variété des combinaisons proposées.

Parmi les combinaisons possibles, deux associations d'items présentent une fréquence relative particulièrement élevée : les combinaisons « coefficient pour pondérer et nombre de molécules » et « coefficient pour pondérer et nombre d'atomes ». La première constitue un point d'ancrage important pour les élèves. Ce succès est confirmé par le tableau 10, qui recense les fréquences relatives cumulées pour chaque item : 67 % des élèves de la cohorte a sélectionné l'item « coefficient pour pondérer ». Le lien entre le chiffre devant un symbole chimique et la désignation « coefficient » semble installé chez une majorité d'élèves, tout en l'intégrant dans la démarche de pondération. Cette interprétation peut constituer une base de significations symboliques susceptibles d'être connectées aux autres niveaux de signification.

48 élèves sur 110 (44 % de la cohorte) ont indiqué que le coefficient donnait, dans ce cas, le nombre d'atomes de sodium. Ils sont donc parvenus à extraire une signification pertinente du coefficient en fonction du contexte donné.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Coefficient	74	67 %
Nombre d'atomes	48	44 %
Nombre de molécules	45	41 %
Indice	18	16 %
Proportion	1	1 %

Tableau 10. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes, additionnés pour chaque item et issus des réponses à la sixième question du post-test : « Que signifie le chiffre 4 dans "4 Na" ? »

Trois autres constats importants sont à prendre en compte.

1) Pour 41 % des élèves testés, le chiffre 4 dans l'expression symbolique « 4 Na » indique le nombre de molécules de Na. La confusion entre molécule et atome est donc encore bien présente dans l'esprit de certains élèves. Plus intrigant encore, il s'avère que les élèves en options scientifiques sont les plus enclins, face à cette question, à confondre atome et molécule : en 3A1, 14 élèves sur 24 (61 %) ont sélectionné cet item[29]. Dans les autres classes testées, cette signification du coefficient est stable (entre 30 et 45 % d'occurrence).

2) 16 % des élèves confondent le coefficient et l'indice, ce qui constitue une fréquence relative non négligeable, d'autant plus que la confusion est présente chez au moins un élève dans toutes les classes testées[30]. Il est probable que l'association forte entre « nombre d'atomes » et le terme « indice » ait joué dans le choix de ces élèves. Le nombre d'élèves confondant les deux termes dans la question portant sur la signification de l'indice est comparable (tableau 11).

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Indice	90	82 %
Valence de Na	33	30 %
Coefficient	14	13 %

Tableau 11. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes, additionnés pour chaque item et issus des réponses à la septième question du post-test : « Que signifie le chiffre 2 dans "Na_2O" ? »

3) La fréquence relative de l'item « proportion » est très faible : seul 1 élève sur 110 l'a sélectionné, dans une combinaison de trois items. Nous ne pouvons que

[29] Voir annexe G.
[30] Voir annexe G.

prendre acte de ce phénomène qui montre que la signification du coefficient en tant que proportion est annihilée par d'autres significations plus pertinentes aux yeux des élèves.

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

Le coefficient stœchiométrique se trouve au carrefour des trois niveaux de signification (figure 26).

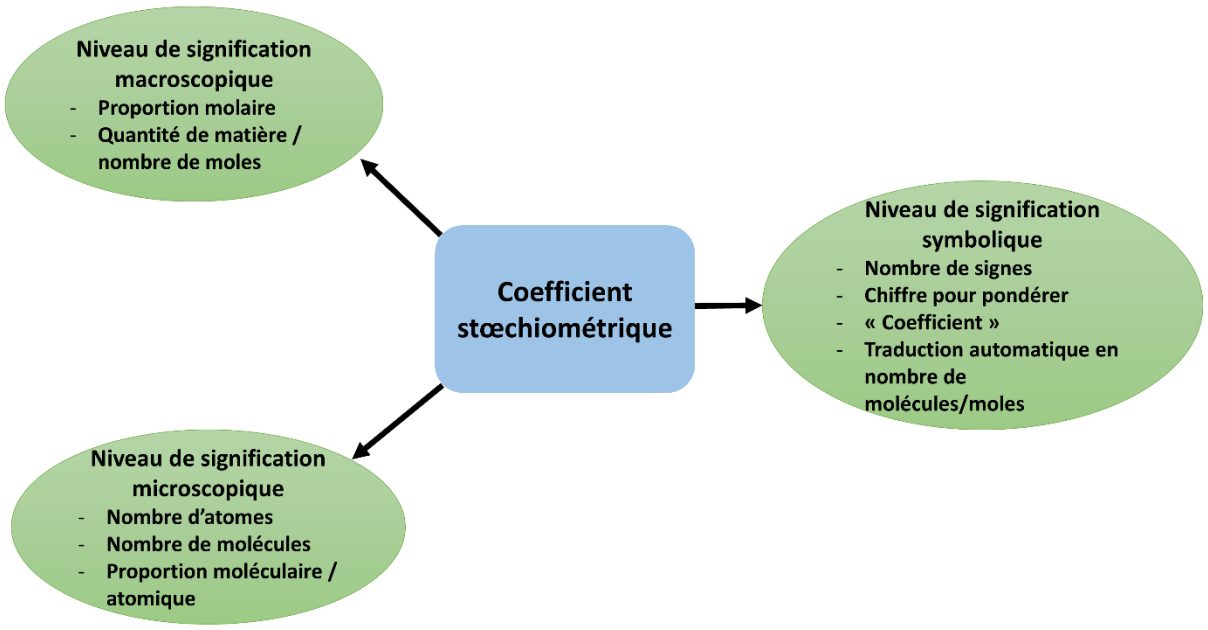


Figure 26. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au coefficient stœchiométrique dans une équation de réaction.

Concernant le coefficient stœchiométrique, les objectifs de notre séquence étaient ambitieux : enrichir le champ sémantique du coefficient en faisant coexister les trois niveaux de signification (coefficient pour pondérer, proportion et nombre de molécules/atomes) et réduire les confusions entre atome et molécule d'une part et entre indice et coefficient d'autre part.

Les résultats de notre post-test sont éclairants. Le champ sémantique du coefficient stœchiométrique, tel que construit par les élèves, est déséquilibré. Les significations de niveau microscopique et symbolique ont complètement caché la signification pouvant potentiellement mener au niveau macroscopique (proportion). Les significations plus symboliques (désignation « coefficient » et pondération) sont sélectionnées par 67,5 % des élèves, alors que les significations microscopiques (nombre d'atomes, nombre de molécules) se situent dans des fréquences relatives plus basses (respectivement 43,5 % et 41 %). La signification du coefficient en tant que proportion est marginale (1 élève sur 110). La méthode employée dans la séquence de leçons, via une lecture littérale de

l'équation chimique explicitant les ratios réactionnels, n'a pas atteint son but[31]. Il faut souligner que le coefficient était d'abord défini, dans notre séquence de leçons, en tant qu'indicateur d'un nombre d'atomes ou de molécules. Il était ensuite directement présenté comme étant aussi l'indicateur d'une proportion et, enfin, intégré dans la démarche de pondération. Nous remarquons que l'absence d'une tâche concrète (autre qu'une lecture littérale) mettant en œuvre la signification du coefficient comme une proportion est préjudiciable à son intégration dans le réseau sémantique construit par les élèves.

La confusion entre atome et molécule (au moins d'un point de vue terminologique) est encore très présente : 41 % des élèves pensent que, dans le cas de la combustion du sodium, le coefficient indique un nombre de molécules de sodium. L'incapacité des élèves à adapter la définition du coefficient aux types d'entités rencontrées reste un obstacle important, difficile à lever. Il n'est donc guère surprenant que la confusion entre atome et molécule se retrouve en cinquième année, comme nous l'avons montré au chapitre 7. Pour rappel, 33 % des élèves de grade 11 affirmaient que, dans l'expression « 4Na », le chiffre « 4 » indiquait un nombre de molécules. Notre étude amène un constat supplémentaire : c'est la classe constituée d'élèves en option scientifique qui présente la fréquence relative la plus élevée dans la sélection de l'item « nombre de molécules » (61 % des élèves). Ce résultat interroge le profil des élèves en option scientifique : leur capacité à intégrer en profondeur les modèles enseignés (dont le modèle moléculaire s'appliquant à toute la matière) est-elle un handicap quand il s'agit de sélectionner des significations en fonction du contexte ? Ou est-ce simplement une utilisation terminologique malheureuse sans confusion effective des deux concepts ?

En outre, plus d'un élève sur dix confond l'indice et le coefficient, du moins dans les termes employés. Cette interversion des désignations peut néanmoins ne pas avoir de répercussions importantes, tant que les informations convoyées par les symboles sont pertinentes dans les résolutions de tâches demandées.

8.6.2.5. La réaction chimique

1) Résultats

La pénultième question du post-test est une question ouverte portant sur la signification de la réaction chimique du point de vue des réactifs. Le test diagnostique, décrit au chapitre 7, nous avait déjà informé sur le type de catégories de réponses possibles. Nous les avons donc reprises pour comptabiliser les fréquences absolues et relatives (tableau 12).

[31] Voir annexe D.

« Les réactifs réagissent entre eux pour former un produit – ils peuvent se dissoudre, se transformer, se fusionner (ou je ne sais pas quoi encore) ». Cette réponse d'élève résume bien le concept de réaction chimique tel qu'il semble être construit dans l'esprit des apprenants à ce stade de leur apprentissage. La réaction chimique est, de fait, très diversement représentée par les élèves testés : en tant que mélange, en tant que fusion, en tant qu'assemblage, en tant qu'union, en tant que transformation, en tant que dissolution. Les termes scientifiques peuvent même s'empiler comme dans la proposition ci-dessus.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme s'assembler, se réarranger, se lier, etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	34	31 %
Réagissent entre eux (sans indication du processus réactionnel)	23	21 %
Pas de réponse	17	15 %
Se mélanger (idée principale)	16	15 %
Se transforment (sans indication d'une référence au mécanisme du processus réactionnel)	13	12 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (combustion, solution, disparition/apparition)	10	9 %
Référence à un changement de propriétés	8	7 %
Changement de nature des molécules/substances	6	6 %
Disparition et apparition d'atomes	3	3 %

Tableau 12. Nombre d'élèves et fréquences relatives pour les principales catégories de réponses à la huitième question du post-test : « Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs pendant la réaction chimique ? »

Ce flou conceptuel trouve premièrement sa source dans la difficulté des élèves à distinguer les différents processus chimiques et physiques qui leur ont été présentés durant les trois premières années de l'enseignement secondaire. Il est vrai que les écueils sont nombreux : comment distinguer clairement mélange (15 % des élèves) et réaction chimique, si celle-ci débute par un mélange des réactifs et se termine par un mélange des produits ? Quand deux types de réactifs ne donnent qu'un type de produit après un apport de chaleur (amorce de combustion), ne peut-on pas parler de « fusion » ? Le réarrangement atomique qui permet la transformation des réactifs en produits peut-il être décrit comme un « mélange d'atomes » ? Ainsi, les termes rencontrés précédemment en chimie (dissolution, fusion, mélange, réaction) semblent,

aux yeux des élèves, être pertinents pour décrire tout phénomène décrit plus tard dans le cours.

Deuxièmement, les verbes « réagir (entre eux) » ou « se transformer » sont choisis au total par 33 % des élèves testés (21 % pour « réagir » et 12 % pour « se transformer »), sans autre description du mécanisme réactionnel. Ces verbes véhiculeraient donc suffisamment d'informations pour ne pas nécessiter d'informations complémentaires. Le raisonnement de ces élèves est somme toute logique : « réagir » laisse entendre une action des substances les unes sur les autres, alors que « se transformer » indique clairement un changement de forme intrinsèque à la réaction chimique. Les détails du processus réactionnel sont omis au profit de ces termes jugés plus englobants par les élèves.

Troisièmement, la volonté de certains de décrire le processus réactionnel se confronte aux limites de l'ensemble du vocabulaire disponible à cet âge pour décrire un tel mécanisme. Alors, les élèves empruntent au langage courant des verbes rendant compte de liens formés : unir, s'assembler, se lier, etc. Il convient de saluer l'effort : en puisant dans le vocabulaire quotidien, ces élèves nourrissent des représentations de la réaction chimique qui pourront être utiles dans l'avenir. Pour le dire autrement, il vaut mieux une représentation de la réaction chimique approximativement formulée qu'une absence totale de représentation.

Quatrièmement, la réaction chimique implique, pour un certain nombre d'élèves, un changement de nature (6 %) ou de propriétés (7 %). Dans les deux cas, il s'agit de définitions issues du programme de chimie en troisième année de l'enseignement secondaire en FWB : la réaction chimique est une réaction au cours de laquelle les réactifs changent de nature. Ce changement de nature est identifié grâce à un changement de propriétés. Le flou n'est pas levé : qu'est-ce, en définitive, que la *nature* d'une substance ? Quel changement microscopique provoque une modification des propriétés ? Plus que le processus réactionnel, c'est ici l'issue de la réaction chimique qui est décrite.

Cinquièmement, la réaction de combustion du sodium va constituer un refuge pour certains élèves. Le fait que le sodium brûle, que de la chaleur soit libérée ou qu'un solide soit formé est cité par ces élèves comme partie prenante du processus réactionnel : un mécanisme particulier se voit ainsi préféré à un mécanisme général. Ce comportement est sans doute renforcé par l'énoncé de notre question : en focalisant sur la combustion du sodium, nous avons involontairement détourné l'attention des élèves de la réaction chimique en tant que concept général.

Sixièmement, aucun élève ne fait explicitement référence à une rupture chez les réactifs. Bien entendu, l'idée d'un réassemblage peut impliquer une séparation des atomes constitutifs des réactifs, mais la relation reste implicite. L'absence de référence à la

rupture de liaisons initiales est peut-être renforcée par la présence d'un seul produit dans notre équation de réaction, susceptible d'être formé par la « fusion » des deux réactifs.

Enfin, notons que l'abstention est particulièrement forte pour cette question (15 % des élèves).

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

Dans le chapitre 7, nous tentions l'exercice délicat de catégoriser certaines significations prêtées à la réaction chimique (figure 27).

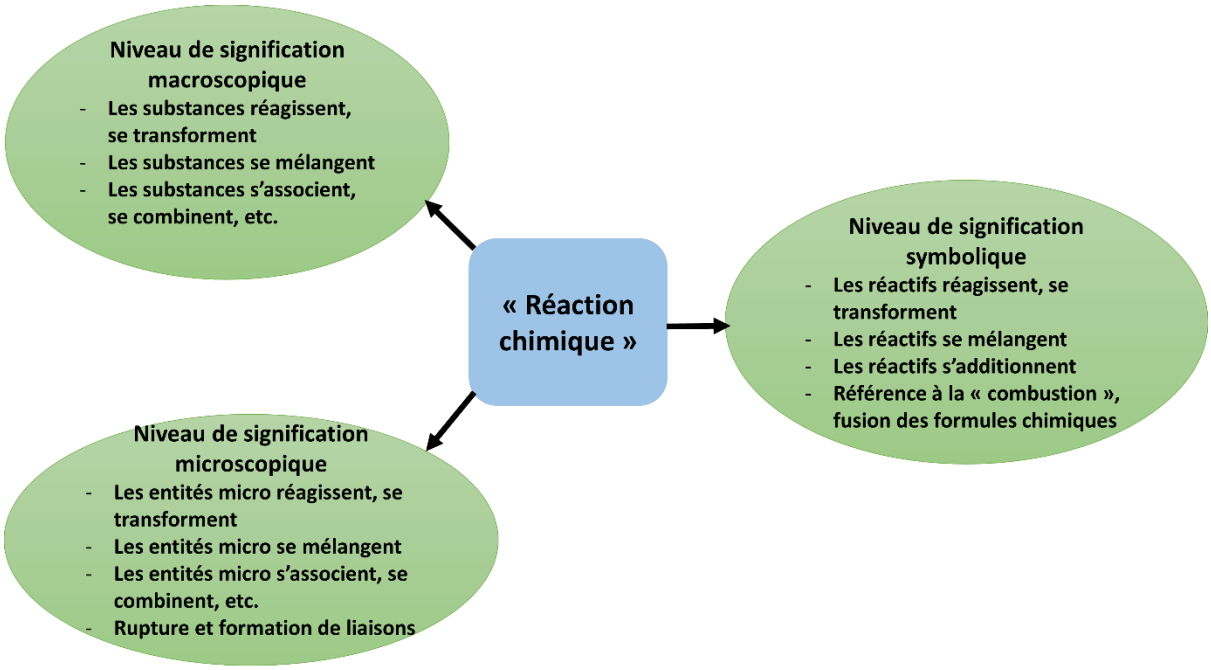


Figure 27. Schéma des niveaux de signification et exemples de significations associées au terme « réaction chimique » exprimées à partir d'une équation de réaction.

La clarification du concept de réaction chimique, notamment au niveau microscopique, ne constituait pas un objectif majeur de la séquence de leçons. Nous souhaitions cependant savoir si l'utilisation fréquente de représentations iconiques microscopiques allait induire l'idée de rupture de liaisons chez les réactifs et de formation de liaisons chez les produits.

Le constat est clair : ce phénomène n'a pas eu lieu. Deux raisons principales nous semblent à l'origine de cet échec relatif. D'abord, la réaction chimique est insérée dans un réseau de processus chimiques et physiques (mélange, transformation chimique, réaction chimique, changements d'état, combustion) récemment assimilés, d'où une certaine instabilité sémantique. Il arrive ainsi plus fréquemment que les concepts de mélange ou de fusion viennent parasiter le concept de réaction chimique en construction. Ensuite, la réaction chimique proposée dans notre test comporte un

distracteur fort : le fait que deux types de réactifs se transforment en un type de produit met l'accent sur la formation de liaisons pour former les produits (assemblage, union, fusion), non sur la rupture de liaisons initiale et nécessaire pour que la réaction se déroule.

Il est à noter que les significations relevées chez les élèves de 16-17 ans (grade 11) dans le chapitre 7 le sont également chez les élèves de 14-15 ans (grade 9). Il semble ainsi que les premières représentations de la réaction chimique, aussi approximatives qu'elles soient, subsistent dans l'esprit des élèves et constituent un socle sur lequel d'autres représentations plus précises de la réaction chimique (rupture et formation de liaisons chimiques) peuvent se greffer. Les représentations de la réaction chimique fonctionneraient donc davantage par accumulation que par remplacement.

8.6.2.6. La représentation microscopique iconique des réactifs et des produits

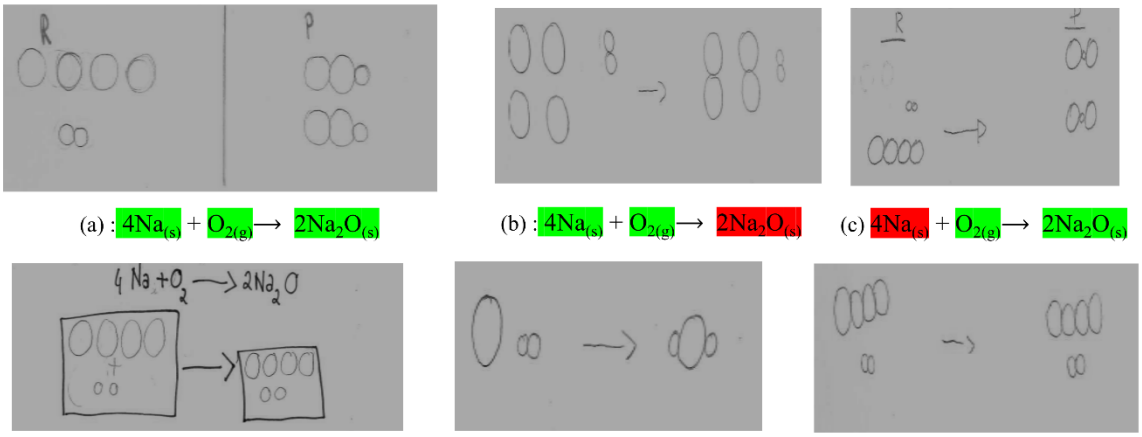
1) Résultats

L'ultime question du post-test interroge la capacité des élèves à convertir des informations symboliques (ici, une équation de réaction) en une représentation iconique microscopique (ici, en utilisant le modèle moléculaire compact). L'équation de réaction de combustion du sodium comporte plusieurs obstacles importants : des coefficients supérieurs à 1, différents états de la matière, un corps pur composé. Les représentations des états de la matière ne sont pas prises en compte dans nos résultats : par exemple, les quatre atomes de sodium doivent être représentés séparément, même si le sodium est macroscopiquement à l'état solide. De plus, tout agencement des atomes dans la molécule d'oxyde de sodium est considéré comme correct.

Le tableau 13 présente les productions d'élèves regroupées en catégories d'achèvement ; la figure 28 en montre quelques exemples concrets. Les formules chimiques qui ont fait l'objet de représentations iconiques correctes sont données sur fond vert ; les formules chimiques qui ont fait l'objet de représentations iconiques correctes apparaissent sur fond rouge.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4	4 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	10	9 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	1	1 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4	4 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	11	10 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	1	1 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	2	2 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	25	23 %
Combustion du carbone/magnésium	27	25 %
Pas de réponse	25	23 %

Tableau 13. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique, issues des réponses à la neuvième question du post-test : « En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium. »



(a) : $4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$ (b) : $4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$ (c) $4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$

(d) : $4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$ (e) : type « combustion du carbone » (f) : $4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$

Figure 28. Exemple de productions d'élèves pour la réaction de combustion du sodium : représentations iconiques des réactifs et des produits.

L'analyse du tableau 13 nous amène à une série de conclusions d'importance.

1) L'exercice de conversion n'est complètement réussi que par 4 élèves sur 110 (4 % de la cohorte). Si l'on tient compte des productions rendant compte correctement soit des réactifs, soit des produits, on atteint la somme de 15 étudiants, ce qui ne constitue que 14 % de notre échantillon testé. Aucun élève

de la classe-témoin n'est parvenu à réaliser parfaitement l'exercice[32]. La conclusion est sans appel : l'exercice de conversion d'informations symboliques en une représentation iconique microscopique est loin d'être trivial. Il pose de sérieux problèmes à une grande majorité d'élèves. Notons que les élèves en option scientifique présentent des performances deux fois supérieures à la moyenne des autres élèves : 9 élèves de 3A1 représentent correctement soit les réactifs, soit les produits, soit les deux, contre 6 élèves au total sur l'ensemble des élèves des autres classes testées. Cette capacité particulière de conversion entre deux systèmes sémiotiques pourrait être une caractéristique importante des élèves en option scientifique.

2) L'abstention est de l'ordre de 23 % des élèves testés. Elle monte à 50 % pour les élèves de la classe de 3A6, ce qui indique la difficulté de l'exercice telle que ressentie par ces élèves.

3) 27 élèves (25 % des élèves) ont représenté la réaction de combustion du sodium en utilisant les représentations iconiques utilisées dans le cadre de la réaction de combustion du carbone ou du magnésium (abordées lors des deux périodes de cours de notre séquence de leçons). Ces élèves n'ont donc pas du tout suivi l'équation de réaction donnée en début de post-test. Nous émettons l'hypothèse que ce phénomène est largement dû au fait que nous n'avons pas récrit l'équation de réaction en-dessous de la question 1i (même si cette équation était présentée au recto de la feuille).

Cette hypothèse est confortée par l'analyse des productions d'élèves face à la question-défi qui clôt le post-test (voir tableau 14). On peut voir que les représentations imitant la combustion du carbone ou du magnésium ont disparu des productions d'élèves. Or, dans le cas de la question-défi, nous avons écrit l'équation de combustion de l'aluminium sous la question posée . La présence effective de l'équation symbolique en vis-à-vis de la question semble ainsi, pour certains élèves, servir de support nécessaire à la représentation iconique microscopique.

Nous remarquons également qu'un nombre plus important d'élèves a correctement représenté la réaction de combustion de l'aluminium (12 élèves contre 4 à la question 1i), et que le nombre d'élèves ayant représenté correctement soit les réactifs, soit les produits, soit les deux, est en nette augmentation (25 % de la cohorte). Enfin, il est intéressant de noter que les productions ne présentant aucune représentation correcte sont en hausse (de 23 % à 28 %). Cette légère augmentation est due à l'absence de représentations des réactions de combustion du carbone et du magnésium. Des exemples de productions d'élèves pour chaque catégorie sont présentés à la figure 29.

[32] Voir annexe G.

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	12	11 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	13	12 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	10	9 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	4	4 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	31	28 %
Combustion du carbone/magnésium	0	0 %
Pas de réponse	34	31 %

Tableau 14. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique, issues des réponses à la question-défi du post-test (représentation de la réaction de combustion de l'aluminium).

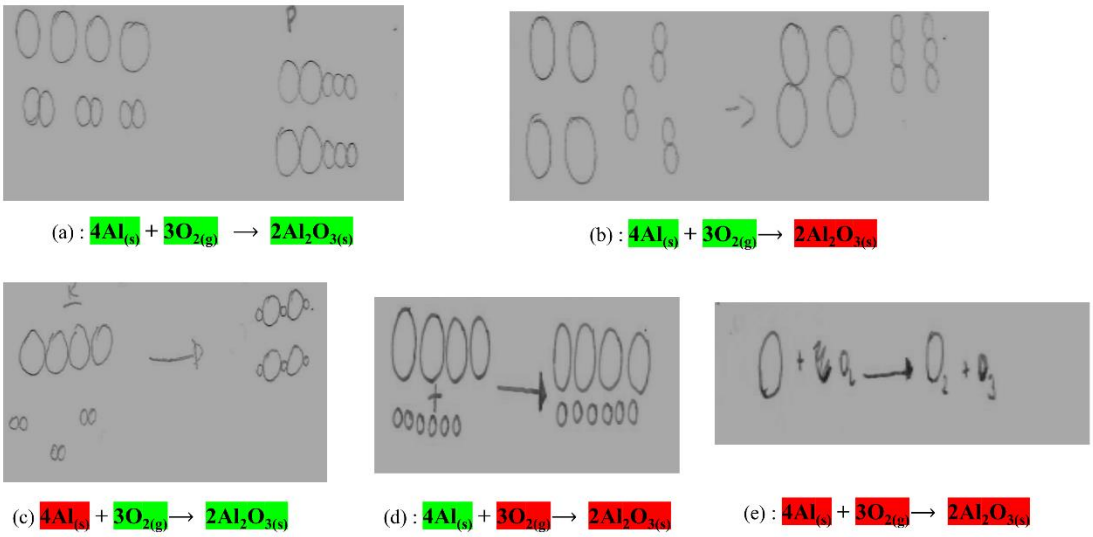


Figure 29. Exemple de productions d'élèves pour la réaction de combustion de l'aluminium : représentations iconiques des réactifs et des produits.

Nous reviendrons plus abondamment, au chapitre 9, sur les différentes erreurs de représentation iconique rencontrées dans les productions d'élèves. Nous nous contentons ici d'estimer si les comportements attendus des élèves au bout de notre séquence de leçons ont été vérifiés.

2) Confrontation entre analyse a posteriori et analyse a priori

Dans le chapitre 4, nous avons montré que les représentations iconiques moléculaires pouvaient constituer des ponts entre les formules symboliques et les concepts chimiques (figure 30).

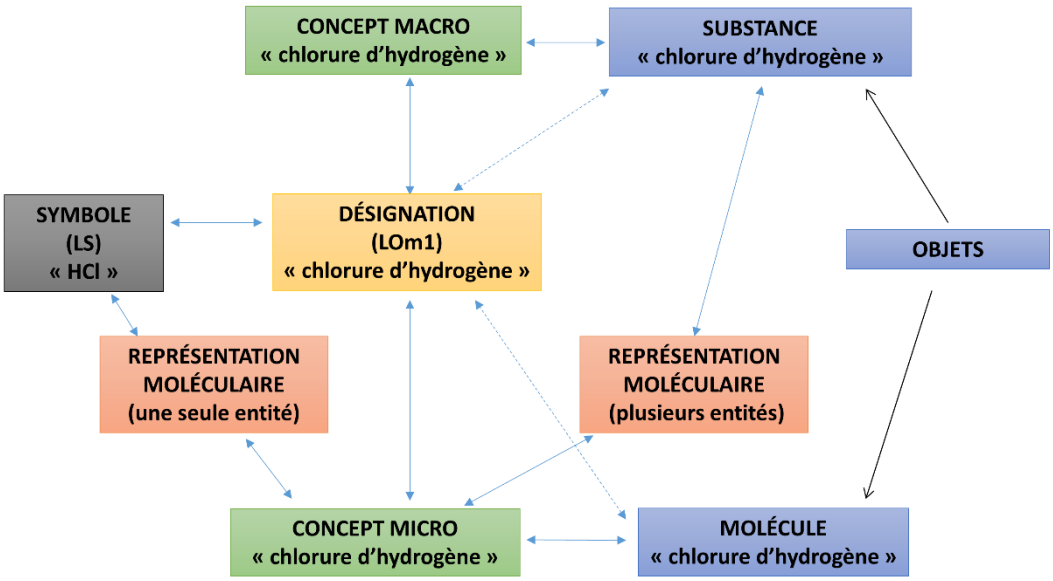


Figure 30. Représentation des relations entre désignation, formule symbolique, représentations moléculaires, concepts macroscopiques et microscopiques et objets pour une désignation de corps composé moléculaire.

La séquence de leçons avait pour but de favoriser la circulation entre systèmes sémiotiques et, in fine, entre niveaux de signification. Si l'analyse de la conversion, par les élèves, d'une information symbolique en des termes de la langue ordinaire modifiée montre des signes encourageants (voir questions précédentes), la conversion en une représentation iconique microscopique reste une tâche complexe pour une grande majorité d'élèves. 4 élèves représentent correctement la réaction de combustion du sodium et 12 font de même pour la réaction de combustion de l'aluminium.

La présence directe (c'est-à-dire, à la suite de la question posée) de l'équation de réaction à représenter au niveau microscopique semble constituer un support essentiel pour un grand nombre d'élèves. En l'absence d'équation chimique directement disponible, certains élèves convoquent des représentations d'autres réactions chimiques, qu'ils adaptent ou non à la réaction donnée. Ces modèles mobilisables sont souvent les premières représentations microscopiques abordées dans la séquence de leçons (combustion du sodium, combustion de l'aluminium).

Cet exercice de conversion entre systèmes sémiotiques implique la mise en œuvre conjuguée des significations du coefficient stœchiométrique, de l'indice, ainsi que des

concepts d'atome et de molécule. La combinaison de plusieurs procédures et savoirs est sans doute à la source des difficultés rencontrées par les élèves. Une amélioration de notre séquence de leçons passe obligatoirement par l'analyse fine des erreurs rencontrées dans les productions d'élèves.

8.7. CONCLUSIONS

Nous avons développé une séquence de leçons en suivant la méthodologie de l'ingénierie didactique selon Artigue. Les objectifs de cette séquence ont été fixés selon trois axes : une circulation favorisée entre niveaux de signification (via l'usage de différents systèmes sémiotiques), un apprentissage progressif de la langue symbolique en lien avec les autres systèmes sémiotiques, un enrichissement du contenu sémantique des signes de la symbolique chimique tout en favorisant ou défavorisant certaines significations. Des observations réalisées par nous-même et le professeur collaborant d'une part, et un post-test soumis aux élèves d'autre part, ont permis de nourrir l'analyse a posteriori de notre séquence.

Avant d'aborder la vérification de nos objectifs proprement dits, il est important de préciser que la séquence de leçons a rencontré avec succès les contraintes imposées par le professeur collaborant : la durée de trois période de cours a été respectée, le matériel expérimental était simple et efficace, aucun débordement n'a été observé lors de la manipulation des sacs opaques et des modèles moléculaires en bois. Ces conditions respectées font de notre séquence un outil didactique adapté à une réalisation effective du programme de chimie de troisième année dans une école secondaire en Belgique francophone. Cependant, notre professeur collaborant a émis deux critiques importantes. D'une part, la première partie de cours est trop longue et déséquilibre la séquence. D'autre part, trop peu d'exercices sur la pondération des équations chimiques ont été réalisés. Ces deux remarques ont fait l'objet d'ajustements que nous décrirons dans le chapitre 9, en vue du test in situ réalisé l'année suivante, en 2013.

Concernant le premier objectif, les trois niveaux de signification (macroscopique, microscopique et symbolique) ont été effectivement abordés dans la séquence de leçons, et ce dans chacune des trois parties. Nous avons explicitement relié les symboles introduits dans l'équation de réaction avec les substances (observables pendant la manipulation expérimentale) et les entités microscopiques (rencontrées pendant la phase d'exploration des sacs opaques). Cependant, le post-test montre qu'une immense majorité des élèves a intégré préférentiellement certaines significations (essentiellement symboliques et microscopiques) au détriment des significations de niveau macroscopique ou pouvant y mener. C'est particulièrement le cas du coefficient stœchiométrique, pour lequel la signification de « proportion » – pourtant explicitée dans la séquence de leçons – a été très peu relevée par les élèves. Malgré tout, des concepts macroscopiques sont utilisés par une part non négligeable d'élèves (16 %)

pour décrire ce qui se déroule chez les réactifs pendant la réaction chimique. Cette part « macroscopique » de la signification d'une réaction chimique peut servir à nourrir la part sémantique consacrée à ce niveau dans les symboles de l'équation.

Le deuxième objectif consistait à développer progressivement la langue symbolique des chimistes, en veillant notamment à ce que le temps consacré à la démarche de pondération des équations de réaction soit modéré par rapport au temps dédié à l'enseignement-apprentissage des symboles en eux-mêmes. Cette répartition temporelle a effectivement été vérifiée. Nous souhaitions également travailler la conversion réciproque entre langue symbolique et registre iconique microscopique. Quel que soit le sens de la conversion, cette tâche a constitué un réel obstacle pour une majorité d'élèves. Pendant la phase de formulation de chaque partie de cours, nous avons observé que les élèves éprouvaient de difficultés à convertir une représentation iconique (issue de l'exploration des sacs opaques) en une écriture symbolique. De la même manière, les dernières questions du post-test ont montré que la conversion d'une équation de réaction en une représentation iconique microscopique de la réaction n'était correctement réalisée que par une faible part d'élèves testés (entre 4 et 11 % selon le type d'équation de réaction). Ce double constat nous amène à la mise en place d'une séance de remédiation focalisée sur ces exercices de conversion entre systèmes sémiotiques. L'élaboration, la mise en œuvre et l'analyse des effets de cette séance de remédiation sont décrites dans le chapitre 9.

Le troisième axe précisait les significations que nous avions choisies de favoriser ou de défavoriser pour chaque symbole de l'équation de réaction. Les résultats issus de l'analyse du post-test sont mitigés. Certaines significations, jugées pertinentes, ont effectivement été renforcées : le « + » en tant que mise en contact (55 % des élèves) ou la flèche traduite par l'expression prototypique « réagissent pour former » (81 % des élèves). Le fait qu'un nombre important d'élèves sélectionnent deux réponses parmi les items proposés dans les questions 1d, 1e et 1f est un signe de la complexification de la charge sémantique des symboles, objectif avoué de notre séquence. Signalons aussi qu'un petit nombre d'élèves continue à confondre la flèche de réaction et le signe « = » (11 %), ou à intervertir les termes « indice » et « coefficient » (entre 13 et 16 %). Ces fréquences restent cependant très limitées et peuvent soutenir la validation interne de notre séquence de leçons.

Il subsiste cependant une série de significations parasites et de confusions conceptuelles en fin de séquence. Nous retenons cinq obstacles particulièrement tenaces.

Premièrement, chez certains élèves, l'identité des réactifs et des produits pose des problèmes d'application de la loi de conservation de la masse (et donc du nombre d'atomes de chaque espèce de part et d'autre de la flèche). S'ils sont pris séparément et sans tenir compte du coefficient stœchiométrique (« Na » et « O_2 » chez les réactifs, « Na_2O » chez les produits), les réactifs et les produits ne présentent pas le même

nombre d'atomes de chaque espèce. Cette caractéristique rejoint d'ailleurs l'idée d'une transformation, d'un changement au cours de la réaction. Mais si l'on considère l'ensemble des réactifs et l'ensemble des produits, coefficients stœchiométriques compris (« 4Na » et « O_2 » chez les réactifs, « $2Na_2O$ » chez les produits), la conservation du nombre d'atomes de chaque espèce se vérifie. On voit que le nombre d'atomes de chaque espèce est au centre du jeu : est-ce un point commun (conservation) ou une différence (transformation) entre réactifs et produits ?

Deuxièmement, le choix du signe « + » en tant qu'addition présente une fréquence relative importante et d'une grande stabilité dans les classes (entre 30 et 39 %). Même si la signification du signe « + » en tant que « mise en contact » est majoritaire dans les réponses des élèves, le signe « + » en tant qu'addition reste une signification présente et peu bousculée par notre séquence de leçons. Notons quand même que nous n'avions pas pour objectif d'éliminer complètement cette signification du signe « + », l'équation chimique étant, par certains aspects, une équation mathématique (dans le cadre, par exemple, de la conservation de la masse).

Troisièmement, la flèche de réaction indique les produits pour 41 % des élèves testés. Même si cette signification est souvent sélectionnée dans une combinaison plus large, elle s'avère être stabilisée dans l'esprit des élèves. Une représentation quotidienne de la flèche semble donc être plus résistante à un changement de signification, et reste séduisante pour un bon nombre d'élèves.

Quatrièmement, les confusions entre atome et molécule ainsi qu'entre indice et coefficient pourraient influencer les performances des élèves pour déterminer la signification du coefficient stœchiométrique et convertir des informations symboliques en une représentation iconique microscopique. La confusion entre atome et molécule touche particulièrement les élèves en option scientifique, dans le cas de la question de la signification du coefficient stœchiométrique. Par contre, chez ce type d'élèves, la capacité de conversion entre une écriture symbolique et une représentation iconique semble moins marquée par la confusion entre atome et molécule. En effet, les élèves en option scientifique présentent des performances supérieures aux autres élèves pour la tâche de conversion entre les deux systèmes sémiotiques.

Cinquièmement, le concept de réaction chimique est parasité par d'autres processus qui lui sont associés, comme la fusion, le mélange ou la dissolution. Ces processus sont jugés d'autant plus pertinents par les élèves dans le cas de l'équation de combustion du sodium : deux réactifs semblent « fusionner » pour former un seul produit. Plus encore, aucun élève, au terme de notre séquence, n'a mis en avant la nécessaire rupture entre atomes chez les réactifs pour permettre un réassemblage des atomes formant les produits.

Les résultats de la validation interne de notre séquence de leçons constituent un carrefour : soit, ainsi que Bouvard et Pécuchet, nous pouvons recourir à un ouvrage moins difficile ; soit nous tentons de l'améliorer en fonction des forces et faiblesses mises au jour. La première option n'en étant pas une pour un didacticien, le prochain et ultime chapitre présentera un développement subséquent de la séquence de leçons, palliant une partie des défauts, mais conservant les qualités relevées.

Nous émettons l'hypothèse qu'une séance de remédiation mettant en œuvre une série d'exercices de conversion entre écriture symbolique et registre iconique microscopique est susceptible de lever une partie des confusions rémanentes. En effet, les représentations iconiques microscopiques permettent de travailler à la fois l'identité des réactifs (pris individuellement ou comme un ensemble), la conversion entre les indices/coefficients et les atomes/molécules ainsi que l'idée que la réaction chimique passe par la rupture et la formation de liaisons chimiques.

Le chapitre 9 décrit l'élaboration de la séance de remédiation, en abordant notamment l'analyse des erreurs de représentations iconiques repérées dans les productions d'élèves. Nous préciserons également les effets de cette séance sur les performances des élèves, grâce à un post-test impliquant la conversion bilatérale entre langue symbolique et registre iconique microscopique.

Chapitre 9

Développement et effets d'une séance de remédiation renforçant la circulation entre écriture symbolique et registre iconique microscopique

> Qu'il me soit permis de répondre à quelques objections qu'on a faites contre l'emploi de ces formules pour la désignation de la composition atomique des corps. On a dit qu'elles manquaient de clarté, induisaient en erreur, et n'offraient aucun avantage. Certes, elles ne sont obscures que tant qu'on n'est pas familier avec leur signification ; et une fois qu'on sait les interpréter, il n'y a rien de plus facile que de les comprendre. Dans aucun cas elles ne peuvent induire en erreur, puisqu'elles sont la simple expression de la composition d'un corps, suivant l'idée de celui qui a fait la formule. Si cette idée manque de justesse, elle induira en erreur, de quelque manière qu'on l'exprime.
>
> La formule n'y contribue en rien.
>
> (Berzelius, 1838, p. 266)

9.1. INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons décrit la conception et la mise en œuvre d'une séquence de leçons aux objectifs ambitieux : circuler entre niveaux de signification, entre systèmes sémiotiques et construire un réseau sémantique complexe et pertinent entourant les symboles principaux employés dans l'équation chimique. L'analyse a posteriori, réalisée à partir d'un post-test et de nos observations in situ, a débouché sur la validation interne de certains de nos objectifs. A contrario, plusieurs manquements importants apparaissent à la fin de la séquence de leçons, tels que la subsistance de certaines confusions (entre atome et molécule, entre indice et coefficient) ou de faibles performances dans des tâches de conversion d'informations symboliques en une représentation iconique microscopique. Nous avons posé l'hypothèse qu'une séance de remédiation brève axée sur ce type de tâches était susceptible de traiter une partie des lacunes de notre dispositif didactique mises en avant par l'analyse a posteriori. Ce chapitre présente la méthodologie que nous avons adoptée afin de construire et tester cette séance de remédiation dans des classes ayant suivi notre séquence de leçons en mai 2013. Nous débuterons par une analyse des erreurs de représentation iconique issues des productions des élèves testés en mai 2012. Ensuite, nous aborderons les ajustements apportés à la séquence de leçons suite aux résultats de l'analyse a posteriori du test de 2012, en ce compris la mise en place d'une séance de remédiation axée sur la circulation entre langue symbolique et registre iconique microscopique. Enfin, nous préciserons les impacts de cette séance de remédiation à court terme, à l'aide d'un second post-test.

Nous chercherons à répondre à deux questions de recherche :

1) Quelles sont les catégories d'erreurs mises au jour par l'analyse de représentations iconiques microscopiques produites par les élèves à partir de symboles contenus dans une équation de réaction ?
2) Dans quelle mesure une courte séance d'exercices (quarante minutes) construite sur la circulation entre écriture symbolique et représentation iconique microscopique peut-elle augmenter les performances des élèves face à une tâche de conversion d'un système sémiotique à l'autre ?

9.2. TYPES D'ERREURS DANS LES REPRÉSENTATIONS ICONIQUES MICROSCOPIQUES

Les productions d'élèves issues du post-test de 2012 ont été analysées afin de déterminer des catégories d'erreurs fréquemment rencontrées dans les représentations iconiques microscopiques réalisées à partir des équations de réaction de combustion du sodium et de l'aluminium. Nous avons relevé six types d'erreurs de représentation, aux fréquences variables, que l'on peut relier aux difficultés rencontrées par les élèves selon la littérature (voir chapitre 2), à la difficulté de maîtriser les règles de différents systèmes sémiotiques (voir chapitres 4, 5 et 6) ainsi qu'aux significations que les élèves prêtent à certains symboles de l'équation (voir chapitres 3, 7 et 8). Notons que ces erreurs peuvent apparaître simultanément dans certaines productions.

9.2.1. Type 1 - Représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés

Ce type d'erreur est très fréquent : 25 élèves sur 110 sont concernés. Dans leurs productions, ces élèves représentent l'oxyde d'aluminium Al_2O_3 en distinguant le corps pur simple « Al_2 » et le corps pur simple « O_3 » (voir figure 1a). Dans le cas de la combustion du sodium, l'oxyde de sodium « Na_2O » est représenté par deux entités distinctes : le corps pur simple « Na_2 » et le corps pur simple « O » (voir figure 2b).

Il existe deux variantes de cette erreur, en fonction de la prise en compte du coefficient stœchiométrique. Premièrement, certains élèves appliquent le coefficient aux deux corps purs simples (figure 1a et 1b). Ainsi, dans la figure 1a, le coefficient « 2 » est distribué sur le corps pur simple « Al_2 » et sur le corps pur simple « O_3 ». Dans la figure 1b, le coefficient est également distribué sur les deux corps purs simples, mais il est converti en un indice : « 2O » devient « O_2 ».

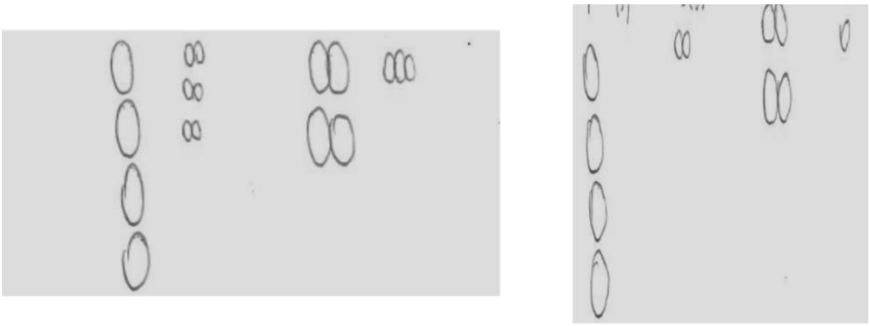
$4Al + 3O_2 \longrightarrow 2Al_2O_3$ $\qquad$ $4Na + O_2 \longrightarrow 2Na_2O$

(a) (b)

Figure 1. Exemple de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 1 : représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés (a) dans le cas de la combustion de l'aluminium et (b) dans le cas de la combustion du sodium. Le coefficient stœchiométrique est ici pris en compte pour les deux corps purs simples.

Deuxièmement, le coefficient peut être appliqué uniquement au corps pur simple qui débute la formule chimique (figure 2a et 2b). Par exemple, dans la figure 2a, le coefficient « 2 » est appliqué sur « Al_2 » (deux molécules) mais pas sur le corps pur simple « O_3 » (une seule molécule).

$4Al + 3O_2 \longrightarrow 2Al_2O_3$ $\qquad$ $4Na + O_2 \longrightarrow 2Na_2O$



(a) (b)

Figure 2. Exemple de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 1 : représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés (a) dans le cas de la combustion de l'aluminium et (b) dans le cas de la combustion du sodium. Le coefficient stœchiométrique n'est ici pas pris en compte pour les deux corps purs simples, mais uniquement pour le premier corps pur simple.

Cette représentation iconique microscopique est bien entendu à mettre en parallèle avec l'interprétation additive, c'est-à-dire l'idée que tout corps composé est constitué de corps purs simples juxtaposés, dont l'intégrité n'est pas modifiée par l'assemblage chimique. Ce lien entre l'interprétation additive, l'écriture symbolique et la représentation iconique microscopique a été mis en évidence, dans le cas de l'eau, par quelques auteurs dans la littérature scientifique (Ben Zvi *et al.*, 1988 ; Keig et Rubba, 1993 ; Cokelez et Dumon, 2005). Par exemple, dans la publication de Ben Zvi (1988), la molécule « H_2O » est représentée par certains élèves sous la forme d'une molécule de « H_2 » et d'un atome d'oxygène séparé. La prise en compte du coefficient

stœchiométrique dans l'interprétation additive, par contre, a été peu explorée. Nous montrons ici deux comportements possibles : soit une distribution sur les deux termes, soit une distribution appliquée uniquement sur le premier terme. Dans la suite du chapitre, nous allons montrer que, dans une certaine mesure, la présence d'un coefficient stœchiométrique supérieur à l'unité semble favoriser l'interprétation additive.

9.2.2. Type 2 – Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient stœchiométrique

Comme on l'observe dans la figure 2, il arrive que les élèves ne prennent pas (ou partiellement) en compte le coefficient stœchiométrique dans leur représentation iconique macroscopique. Il peut s'agir d'une distribution incomplète (figure 2) ou d'une non-utilisation du coefficient (figure 3). Dans le cas de la figure 3b, il manque une molécule d'oxyde de sodium ; dans le cas de la figure 3a, il manque une molécule d'oxyde d'aluminium (la proposition étonnante pour les réactifs sera discutée dans le point suivant). Ce type d'erreur est assez fréquent (14 élèves dans la cohorte de 2012) et est très souvent combiné à d'autres erreurs dans les productions visées, ce qui montre que les difficultés peuvent s'accumuler rapidement dans l'esprit des élèves.

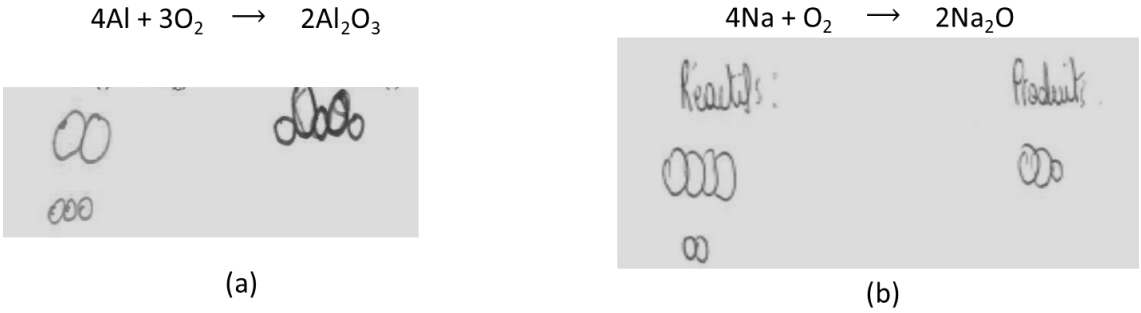


Figure 3. Exemple de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 2 : non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient stœchiométrique (a) dans le cas de la combustion de l'aluminium et (b) dans le cas de la combustion du sodium.

9.2.3. Type 3 - Non-utilisation de l'indice

Dans la figure 3b, l'élève a dessiné une molécule de « O_3 » alors que l'équation chimique indique « $3O_2$ ». L'indice « 2 » est ainsi nié au profit du coefficient stœchiométrique « 3 », avec, en prime, une confusion des rôles. Un tel comportement n'est pas rare puisqu'il touche une dizaine d'élèves de la cohorte testée en 2012. Deux hypothèses – entre lesquelles il est impossible de trancher, en l'absence de justification explicite des élèves – peuvent expliquer le phénomène. La première consiste à postuler que l'élève a évité de faire apparaître l'indice, dont il n'a pas compris la signification, et, dans l'incertitude, a utilisé le coefficient stœchiométrique comme substitut. On trouve mention de telles omissions dans la publication de Friedel et Maloney (1994),

lors de tâches impliquant le calcul d'une masse molaire ou d'une quantité de matière dans un problème stœchiométrique. Comme avec l'interprétation additive, il semble qu'un coefficient stœchiométrique supérieur à 1 augmente les chances de confusion.

Une deuxième hypothèse consiste à envisager la reconstruction des réactifs à partir des produits. Dans ce cas, l'indice n'a même pas été lu. En effet, en partant du produit « Al_2O_3 », l'élève a reconstruit les réactifs en posant l'existence de « Al_2 » et de « O_3 », corps purs simples composant le produit final (voir figure 3a). Nous serions ici devant une deuxième version de l'interprétation additive, dans laquelle les réactifs initiaux sont remplacés par les corps purs simples qui semblent former le corps pur composé final. Le cas le plus fréquent est représenté à la figure 4. On peut y repérer la molécule de « O_3 » chez les réactifs, exacte réplique des trois atomes d'oxygène reliés aux deux atomes d'aluminium dans le produit.

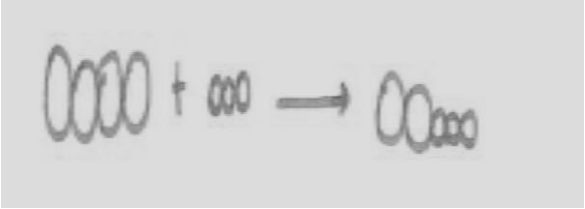


Figure 4. Exemple de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 3 : non-utilisation de l'indice, dans le cas de la combustion de l'aluminium.

9.2.4. Type 4 – Agrégation des réactifs et/ou des produits

Dans une vingtaine de productions d'élèves, les réactifs et/ou les produits sont agrégés, formant ainsi des « super-molécules ». Le cas le plus fréquent consiste en la représentation de « $2Al_2O_3$ » en une seule molécule (figure 5). Les figures 5a et 5b indiquent un même comportement : les élèves construisent le produit en juxtaposant les corps dessinés séparément du côté des réactifs. Pour ces élèves, dans une réaction chimique, les corps simples se collent les uns aux autres pour former les produits. On n'observe dans ce cas aucun réarrangement atomique. La figure 5c constitue une variante du cas précédent : les trois molécules de dioxygène sont dessinées séparément chez les réactifs, et ajoutées individuellement à la structure composée de quatre atomes de sodium soudés. Enfin, la figure 5d montre un cas spécial combinant une non-utilisation de l'indice (chez les réactifs), une utilisation incomplète du coefficient (chez les produits) et une agrégation des atomes formant le produit final en une seule molécule.

Les figures 5a, 5b et 5c peuvent être discutées en faisant référence à l'interprétation additive. En effet, dans les trois productions, le corps pur composé final est bien le fruit de la juxtaposition de corps purs simples préalablement décrits chez les réactifs. Par contre, la figure 5d n'est pas un produit de l'interprétation additive : le corps pur simple

« O_3 », présenté chez les réactifs, se retrouve éclaté en deux parties lors de la constitution du corps pur composé final.

Enfin, peut-être doit-on voir une représentation abusive de l'état solide dans cette agrégation forcée des réactifs et produits. Dans la réaction de combustion du sodium, le sodium et l'oxyde de sodium se présentent à l'état solide, comme indiqué dans l'équation de réaction. Certains élèves ont pu tenter de représenter l'état solide de ces substances en agrégeant les atomes de sodium d'une part et les molécules d'oxyde de sodium d'autre part. La représentation des trois molécules de dioxygène en une seule molécule agrégée pourrait être une projection du processus choisi pour les produits, appliqué aux réactifs.

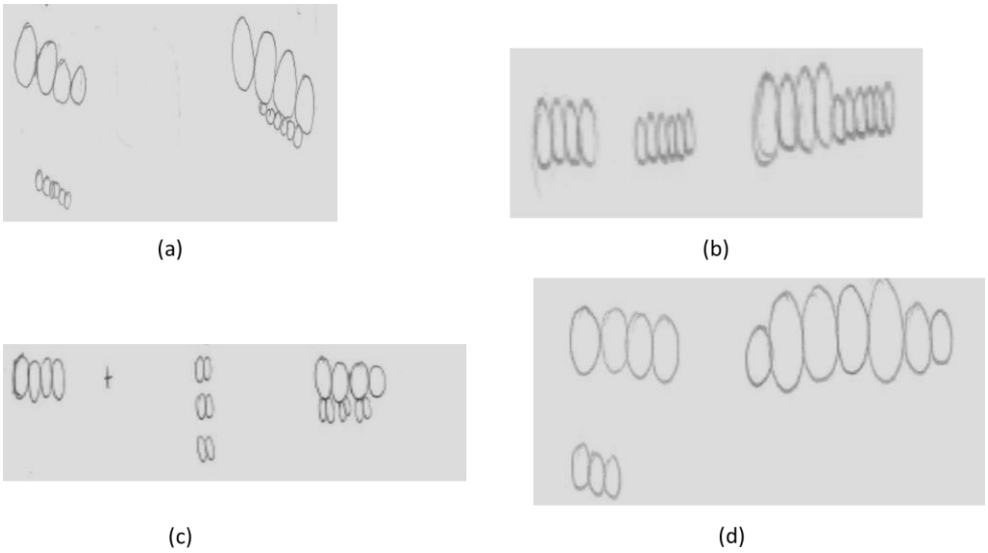


Figure 5. Exemples de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 4 : agrégation des réactifs et/ou des produits, dans le cas de la combustion de l'aluminium.

9.2.5. Type 5 – Éclatement des réactifs et/ou des produits

Dans quelques productions, on remarque une séparation de tous les atomes constitutifs, du côté des réactifs et/ou du côté des produits, donnant l'impression d'un inventaire des atomes en présence sans représenter les associations éventuelles entre eux (figure 6). Relativement rare (7 élèves de la cohorte), ce phénomène est potentiellement sous-tendu par des raisonnements variés. Premièrement, l'idée d'inventorier les atomes peut être associée à la démarche de pondération des équations de réaction, dans laquelle il faut identifier le nombre de chaque espèce d'atomes présent, en « brisant » mentalement les molécules. Deuxièmement, le concept de molécule n'est peut-être pas mobilisé par l'élève dans le cas de la représentation d'une réaction chimique, considérée comme un réarrangement d'atomes isolés. Troisièmement, la présence des six atomes d'oxygène séparés laisse entendre que l'état de la matière (ici, gazeux) a été incorrectement interprété. Il est envisageable qu'un élève représente l'état gazeux par des atomes

séparés les uns les autres afin d'occuper l'espace disponible. Notons qu'une erreur de ce type n'est pas anodine : elle peut rendre compte de confusions importantes (entre atome et molécule, entre pondération et processus réactionnel, entre indice et coefficient) et se combiner dès lors à d'autres types d'erreurs.

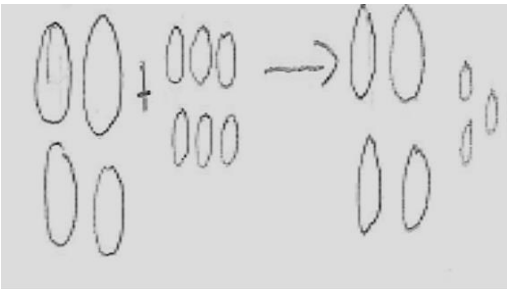
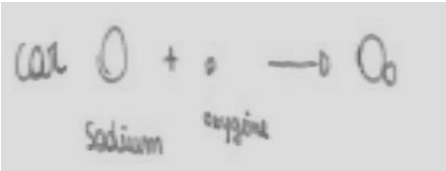


Figure 6. Exemple de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 5 : éclatement des réactifs et/ou des produits, dans le cas de la combustion de l'aluminium.

9.2.6. Type 6 – Représentation d'une autre réaction chimique

Un résultat a particulièrement retenu notre attention : 27 élèves (sur 110) ont représenté la réaction de combustion du sodium en empruntant les représentations iconiques utilisées précédemment dans la séquence pour les réactions de combustion du carbone (figure 7b) et du magnésium (figure 7a). Ce phénomène pourrait être favorisé, voire provoqué, par le fait que l'équation de combustion du sodium se trouve au recto de la page du questionnaire, quand la question figure, elle, au verso : les élèves n'auraient tout simplement pas retourné le document. Cette explication est soutenue par le fait que la question-défi, qui porte sur la combustion de l'aluminium dont l'équation chimique figurait directement en-dessous de la question, n'a pas suscité ce type d'erreurs.



(a)

(b)

Figure 7. Exemples de productions d'élèves (mai 2012) présentant l'erreur de type 6 : représentation d'une autre réaction chimique, dans le cas de la combustion du sodium.

Bref, si la présence évidente d'une équation chimique guide logiquement les élèves, son absence (ou sa localisation éloignée) mène à des comportements surprenants. Plutôt que de chercher l'équation chimique dans les données précédentes sur le document, certains élèves reprennent totalement ou en partie des représentations iconiques qu'ils jugent correctes, car confirmées par le professeur pendant la séquence de leçons. Ce transfert inadéquat repose sur des similitudes de fait entre les cas étudiés : combustion, présence d'oxydes à la fin de la réaction et utilisation de boules de tailles différentes. À la figure

7a, l'élève adapte même la réaction de combustion du magnésium à celle du sodium en ajoutant les noms des atomes concernés. Ce phénomène informe sur l'existence de modèles temporaires qui servent de refuges pour les élèves face à un manque de données ou face à une incompréhension de la question posée.

Le tableau 1 présente la fréquence relative de chaque type d'erreurs de représentations iconiques microscopiques dans le post-test de 2012. Pour comptabiliser les types d'erreurs, nous ne notons qu'une occurrence dans le cas où le type d'erreur est rencontré dans les deux réactions chimiques à représenter. Par exemple, dans ce tableau, il faut lire que 10 élèves ont produit une représentation iconique rendant compte d'une non-utilisation de l'indice, soit pour les deux réactions chimiques, soit pour l'une d'entre elles.

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative (tot-2)
Représentation d'une autre réaction chimique	27	25 %
Représentation du CPC en CPS séparés	25	23 %
Agrégation des réactifs et/ou des produits	21	19 %
Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	14	13 %
Non-utilisation de l'indice	10	9 %
Eclatement des réactifs et/ou des produits	7	6 %

Tableau 1. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les types d'erreurs de représentation iconique microscopique issues des réponses aux deux dernières questions du post-test (2012).

Les six types d'erreurs relevés ne constituent pas une liste exhaustive. Cependant, il nous est maintenant possible d'utiliser cette grille de lecture pour analyser toute production d'élèves contenant des représentations iconiques microscopiques simples à partir d'une équation chimique. Les pistes explicatives amènent logiquement à des pistes de remédiation grâce à des exercices ciblés.

Avant d'aborder la construction de la séquence de remédiation, arrêtons-nous sur les représentations iconiques correctes des produits, véhiculant des conceptions variées de la réaction chimique. Celles-ci, on le verra, se révèlent intéressantes lorsqu'il s'agit d'imaginer une séance de remédiation adaptée.

9.3. Types de représentations iconiques microscopiques correctes

Une vingtaine d'élèves ont correctement représenté la molécule d'oxyde de sodium et/ou la molécule d'oxyde d'aluminium (en tenant compte ou non du coefficient stœchiométrique). Rappelons que nous jugeons correcte toute représentation respectant

la composition atomique, quel que soit l'agencement des atomes entre eux. En fonction de la connectivité atomique proposée par les élèves, nous avons distingué quatre catégories de représentations iconiques, présentées ici dans un ordre croissant de sophistication.

9.3.1. Représentation linéaire

Ce type de représentation iconique rend compte de la trame de la formule chimique (figure 8). Les atomes se succèdent en respectant l'ordre de lecture de la formule chimique.

Figure 8. Exemples de productions d'élèves (mai 2012) présentant des représentations linéaires (a) de l'oxyde d'aluminium et (b) de l'oxyde de sodium.

Une représentation linéaire peut être considérée comme une visualisation de l'interprétation additive : les corps purs simples sont juxtaposés, comme s'ils pouvaient à tout moment être séparés par une quelconque méthode physique ou chimique. Dans une certaine mesure, une telle représentation est aussi le produit d'une conceptualisation particulière de la réaction chimique. La structure des produits serait tributaire de l'agencement originel des réactifs : une liaison entre deux extrémités de ceux-ci sans rupture nécessaire.

Il est à noter que si les représentations linéaires sont majoritaires dans le cas de la combustion de l'aluminium, elles sont supplantées par un autre type de représentation dans le cas de la combustion du sodium ; nous y reviendrons.

9.3.2. Représentation à plusieurs accroches

Ce type de représentation, illustré à la figure 9, est ainsi nommé car une partie de la molécule (par exemple, pour l'oxyde d'aluminium, les trois atomes d'oxygène) est accrochée à l'autre via deux atomes différents. Cette caractéristique la distingue de la représentation linéaire, dans laquelle la connexion n'est assurée que par une seule accroche.

(a)

(b)

Figure 9. Exemples de productions d'élèves (mai 2012) présentant des représentations à plusieurs accroches (a) de l'oxyde d'aluminium et (b) de l'oxyde de sodium.

Une représentation à plusieurs accroches peut toujours être associée à une éventuelle interprétation additive mais elle s'affranchit par contre de la trame de la formule chimique. Elle est rare dans les productions d'élèves (cinq cas). Il est à noter que dans la représentation à plusieurs accroches, les atomes de même type sont toujours représentés par « blocs » : par exemple un bloc de « Al_2 » et un bloc de « O_3 ».

9.3.3. Représentation décalée

La représentation iconique décalée (voir un exemple à la figure 10) se distingue par la présence d'une structure de base (par exemple, deux atomes d'aluminium soudés) autour de laquelle sont dispersés les autres éléments formant la molécule (par exemple, les trois atomes d'oxygène).

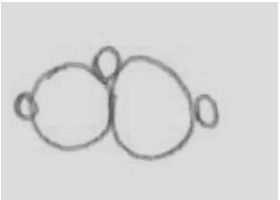


Figure 10. Exemple de production d'élèves (mai 2012) présentant une représentation décalée de l'oxyde d'aluminium.

Dans ce type de représentation, il n'est plus question d'interprétation additive ou de respect de la trame de la formule chimique. Au contraire, la molécule ainsi représentée nécessite une conceptualisation plus riche de la réaction chimique, impliquant la rupture de liaisons chez les réactifs (ou du moins, chez l'un des réactifs). La représentation décalée présente une fréquence faible (3 élèves).

9.3.4. Représentation alternée

La représentation alternée est la plus sophistiquée des représentations iconiques relevées : les atomes d'aluminium et d'oxygène se succèdent en alternance, formant ainsi une structure symétrique (figure 11a).

(a) (b)

Figure 11. Exemples de productions d'élèves (mai 2012) présentant des représentations alternées (a) de l'oxyde d'aluminium et (b) de l'oxyde de sodium.

Nous avons compté dix occurrences pour chacune des molécules ciblées (oxyde d'aluminium et oxyde de sodium), ce qui en fait le deuxième type de représentation le plus fréquemment proposé par les élèves. L'alternance des atomes implique une distanciation par rapport à la formule chimique et un abandon des blocs constitutifs des autres types de représentation iconique. Dans ce cas, on ne trouve pas de structures fixes qui se juxtaposent, ni de structure de base en bloc liée à des atomes disséminés. En plus de supposer une représentation pertinente de la réaction chimique (avec formation et rupture de liaisons), la représentation alternée a la symétrie comme élément fondateur, architecte des molécules.

9.3.5. Représentativité des quatre types

Les tableaux 2 et 3 présentent les fréquences relatives et le nombre d'élèves comptabilisés pour chaque type de représentation iconique microscopique correcte. Nous avons distingué le traitement des deux réactions de combustion, le produit final revêtant une importance considérable : le tableau 2 présente les résultats pour l'équation de combustion du sodium et le tableau 3 pour celle de l'aluminium[1].

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
Représentation alternée	10	9 %
Représentation linéaire	9	8 %
Représentation à plusieurs accroches	5	5 %
Représentation décalée	0	0 %

Tableau 2. Nombre d'élèves et fréquences relatives pour les types de représentations iconiques microscopiques correctes, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la neuvième question du post-test (2012) – réaction de combustion du sodium.

[1] Nous avons considéré l'ensemble des représentations iconiques correctes de l'oxyde de sodium et de l'oxyde d'aluminium, même dans les cas où le coefficient n'était pas respecté, quand un autre produit (incorrect) était ajouté ou quand une représentation de type « combustion du carbone » était convoquée.

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
Représentation linéaire	13	12 %
Représentation alternée	8	7 %
Représentation décalée	3	3 %
Représentation à plusieurs accroches	1	1 %

Tableau 3. Nombre d'élèves et fréquences relatives pour les types de représentations iconiques microscopiques correctes, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons, issues des réponses à la question-défi du post-test (2012) – réaction de combustion de l'aluminium.

Ces différentes analyses ont permis de nourrir nos réflexions quant au contenu de la séance de remédiation destinée aux élèves présentant des difficultés à représenter correctement des entités microscopiques à partir d'informations symboliques. Cette séance s'insère dans un ensemble plus large d'ajustements de la séquence de leçons.

9.4. AJUSTEMENT ET DÉVELOPPEMENT DE LA SÉQUENCE DE LEÇONS

Notre séquence de leçons a été ajustée et consolidée en empruntant quatre voies, issues de notre analyse a posteriori (voir chapitre 8).

9.4.1. Rééquilibrage des parties de la séquence

Notre professeur collaborant avait mis en avant un déséquilibre entre la première partie de la séquence et les deux autres. La première partie dépassait le temps dévolu à une période de cours classique (50 minutes), les élèves découvrant à la fois la trame didactique (action/formulation/vérification) et les principaux symboles de l'équation chimique, excepté le coefficient stœchiométrique. Des considérations sur ce qui apparaît (ou pas) dans l'équation chimique et sur les différentes lectures possibles de l'équation avaient également été abordées. Pour tenter de rééquilibrer le temps consacré à chaque partie, nous avons déplacé le temps dévolu aux différentes lectures dans la deuxième partie. En outre, nous avons supprimé l'encart consacré aux informations présentes ou absentes d'une équation chimique, afin de nous centrer sur les principaux objectifs de la séquence.

9.4.2. Extension de la séquence de leçons

La préparation du test in situ de 2013 a débuté par une bonne surprise : notre professeur collaborant avait choisi de modifier son programme afin de nous octroyer quatre périodes de 50 minutes, soit une de plus qu'initialement. Cette période supplémentaire, que le professeur consacrait traditionnellement à des exercices sur la pondération des équations chimiques, a été transformée en une séance de remédiation axée sur la

conversion entre langue symbolique et registre iconique microscopique. En effet, les résultats de l'analyse du test in situ de 2012 avaient convaincu notre professeur collaborant de changer ses priorités. Le manque de maîtrise des élèves dans la conversion entre systèmes sémiotiques est devenu la problématique centrale du cours, dont la prise en compte nécessitait la construction d'une séance de remédiation travaillant à la fois la pondération des équations chimiques et les représentations iconiques microscopiques.

9.4.3. Construction de la séance de remédiation et d'un deuxième post-test

La préparation de la séance de remédiation nécessitait l'analyse du post-test de la séquence de leçons. Nous avons traité les productions d'élèves issues de la question de conversion entre langue symbolique et registre iconique microscopique en identifiant les types d'erreurs de représentation iconique décrits ci-avant. Chaque production se voit ainsi caractérisée en fonction d'un ou de plusieurs types d'erreurs, ce qui permet d'orienter son auteur vers un chemin particulier dans la séance de remédiation.

Nous avons ensuite conçu une série d'exercices qui permettent de travailler spécifiquement certains types d'erreurs[2]. Le tableau 4 présente succinctement la tâche associée aux exercices proposés, ainsi que les objectifs poursuivis.

Exercices	Conversion	Contenu	Objectifs principaux
1a	RI -> LS	4 molécules de Cl_2	Pas d'agrégation/éclatement des molécules Traiter une représentation iconique Utilisation correcte de l'indice
1b	RI -> LS	2 molécules de $MgCl_2$	Traiter une représentation iconique Utilisation correcte du coefficient
2a	LS -> RI	3 atomes de fer	Pas d'agrégation des atomes
2b	LS -> RI	2 molécules de Cl_2O_5	Pas de représentation du CPC en CPS séparés Pas d'agrégation/éclatement des molécules Utilisation correcte du coefficient
3a	RI -> LS	Équation pondérée de formation du SO_2	Traiter la représentation iconique microscopique pour une équation pondérée
3b	RI -> LS	Équation pondérée de combustion du CH_4	Pas d'agrégation/éclatement des molécules

[2] Voir annexe H.

			Traiter la représentation iconique microscopique pour une équation pondérée avec trois types d'atomes Utilisation correcte de l'indice (« $2O_2$ » particulièrement)
4a	LS -> RI	Équation pondérée de formation du Fe_2O_3	Pas d'agrégation des molécules Pas de représentation du CPC en CPS séparés Utilisation correcte de l'indice (« $3O_2$ » particulièrement) Utilisation correcte du coefficient
4b	LS -> RI	Équation pondérée de formation du HI	Pas d'éclatement des molécules Traiter la représentation iconique microscopique pour une équation pondérée
4c	LS -> RI	Équation pondérée de formation du $ZnCl_2$	Exercice supplémentaire
5	LS -> RI RI -> LS	Pondération d'équations chimiques en passant par les RI	Tous les objectifs visés

Tableau 4. Types d'exercices proposés pour la séance de remédiation, type de conversion entre systèmes sémiotiques et objectifs principaux visés.

Ensuite, nous avons élaboré un « parcours optimisé » pour chaque élève en fonction des types d'erreurs relevés dans le premier post-test (tableau 5).

Types d'erreurs	Parcours proposé
Représentation des CPC en CPS séparés	2b – 4a – 5
Agrégation des réactifs et/ou des produits	1a – 2ab – 3b – 4a – 5
Eclatement des réactifs et/ou des produits	1a – 2b – 3b – 4b – 5
Représentation d'une autre réaction chimique	1ab – 4b – 3ab – 5
Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	1b – 2b – 4a – 5
Non-utilisation de l'indice	1a – 3b – 4a – 5

Tableau 5 : Types d'erreurs de représentation iconique microscopique et parcours proposé aux élèves dans la séance de remédiation.

Chaque parcours constitue une trame de base qui peut être complétée ou assouplie en fonction des besoins. Notons que les parcours optimisés veillent à se centrer sur une difficulté repérée, tout en travaillant dans les deux sens la conversion entre les systèmes sémiotiques donnés (de la LS à la RI^3, et de la RI^3 à la LS). Enfin, un post-test

exclusivement dédié à la conversion réciproque entre langue symbolique et registre iconique microscopique a été développé[3]. Son contenu est balisé pour limiter le temps de soumission du test, ainsi que pour sonder l'ensemble des erreurs de représentation iconique repérées (tableau 6).

Exercices	Conversion	Contenu	Objectifs principaux
1	LS -> RI	Equation pondérée de formation du NH_3	Tous les objectifs visés
2	RI -> LS	Equation pondérée de formation du Fe_2O_3	Traiter une représentation iconique Utilisation correcte du coefficient et de l'indice
3	LS -> RI RI -> LS	Equation non-pondérée de la réaction entre HI et Cl_2	Tous les objectifs visés (excepté représentation du CPC en CPS séparés)

Tableau 6. Types d'exercices présentés dans le post-test n°2, type de conversion entre systèmes sémiotiques et objectifs principaux visés.

La sophistication des représentations iconiques correctes (linéaire, alternée, etc.) ne constitue pas un objectif de remédiation. Par contre, l'évolution de ces représentations sera étudiée à travers les productions issues des deux post-tests.

9.4.4. Modifications du post-test n°2

Nous avons opéré quelques modifications dans le post-test clôturant les trois premières parties de la séquence de leçons :

- Nous avons d'abord supprimé la question portant sur le point commun entre les réactifs et les produits, mais conservé celle concernant les différences entre les réactifs et les produits.
- Pour les questions à choix multiples, nous avons distingué deux temps. Dans un premier temps, l'élève donne son **premier choix** en cochant un seul item. Dans un deuxième temps, l'élève a la possibilité de compléter sa réponse en proposant d'autres items (figure 12). Cette démarche nous permet d'accéder au premier choix de l'élève (qui peut être considéré comme sa signification préférentielle), ce que ne permettait pas le post-test de 2012.
- La question-défi, enfin, a été supprimée. La séance de remédiation permet en effet de travailler plus profondément les conversions entre langue symbolique et registre iconique microscopique.

[3] Voir annexe I.

Le post-test ainsi modifié est disponible en annexe J.

Que signifie le signe « + » ?

c.1. Parmi les propositions suivantes, cocher la case qui vous paraît la plus correcte.

- ☐ 1- Le signe « + » signifie qu'il y a réaction chimique entre les deux réactifs.
- ☐ 2- Le signe « + » signifie que les réactifs sont mis en contact.
- ☐ 3- Le signe « + » signifie que l'on mélange les réactifs.
- ☐ 4- Le signe « + » signifie que l'on additionne les réactifs entre eux.

c.2. Si d'autres propositions sont également correctes, inscrire leur(s) numéro(s) ci-dessous:

……

Figure 12. Extrait du post-test de 2013 - Question portant sur la signification du signe « + » en deux temps : premier choix – second(s) choix.

9.5. MÉTHODOLOGIE

Nous avons testé, en mai 2013, la nouvelle séquence de leçons dans l'école B auprès d'une cohorte de 54 élèves, répartis sur trois classes. On compte 18 élèves de l'option « sciences générales » (SG) répartis sur deux classes (3A1 et 3A2) et 36 élèves de l'option « sciences de base » (Sb) répartis sur l'ensemble des classes (3A1, 3A2 et 3A3). Les trois classes ont suivi la séquence de leçons donnée par notre professeur collaborant. Un premier post-test a été soumis aux élèves après les trois premières périodes de cours. Une séance de remédiation a été menée durant la quatrième période, à la fin de laquelle les élèves ont été soumis à un deuxième post-test, portant exclusivement sur la conversion réciproque entre langue symbolique et représentation iconique microscopique. Pour ce test in situ, nous n'avons filmé aucune des leçons. Par contre, nous avons assisté aux trois séances de remédiation qui ont clôturé la séquence de leçons dans chacune des classes testées.

Pour le traitement des données, nous avons repéré les réponses les plus fréquentes et calculé les fréquences relatives associées. En complément, une comparaison entre deux sous-groupes a été réalisée en fonction de l'option (sciences générales et sciences de base).

9.6. RÉSULTATS

9.6.1. À partir des observations in situ et des témoignages du professeur collaborant

Les contraintes temporelles sont vérifiées : la séquence de leçons et la séance de remédiation (y compris les deux post-tests) s'intègrent dans les quatre périodes de cours de 50 minutes mises à notre disposition par le professeur collaborant. Après modification de la séquence, les trois périodes ont été équilibrées, chacune d'elle

nécessitant entre 45 et 50 minutes. De manière générale, le professeur collaborant a profité de l'expérience acquise en 2012 pour affiner son discours et optimiser la dynamique des activités (notamment la confrontation entre propositions symboliques qui débute la phase de vérification[4]).

La séance de remédiation devait être brève et directement applicable en classe. Il s'est avéré que le parcours personnel prévu a été effectivement réalisé par la plupart des élèves dans le temps imparti. Certains élèves ont pu dépasser les objectifs du parcours personnalisé, et ainsi réaliser l'ensemble des exercices. Notre présence, en appui du professeur collaborant, a permis à chaque élève d'accéder à une personne-référente pendant la réalisation de son parcours. Un encadrement suffisant (au moins deux personnes) semble constituer une limite de notre séance de remédiation, dans le cas où le nombre d'élèves dépasse la vingtaine. Le deuxième post-test, quant à lui, n'a posé aucun problème de mise en œuvre.

9.6.2. À partir du premier post-test

Le premier post-test clôt les trois périodes de cours de la séquence de leçons. Il permet de comparer les analyses a posteriori du test de 2012 aux analyses a posteriori du test de 2013. Cette comparaison doit être nuancée par une réduction importante de la cohorte testée (110 élèves en 2012, 54 élèves en 2013). De plus, nous avons modifié le post-test de manière à accéder au premier choix de l'élève dans les significations de certains symboles, ce qui est susceptible d'influencer les fréquences relatives des items proposés, notamment en favorisant la combinaison d'items. Enfin, nous avons souhaité évaluer les différences entre les élèves d'option « sciences générales » (5 périodes par semaine) et les élèves d'option « sciences de base » (3 périodes par semaine). Les deux groupes étant relativement peu fournis (18 élèves en sciences générales, 36 élèves en sciences de base), nous nous contenterons de montrer certaines tendances dans notre échantillon, sans généraliser à des populations plus importantes. L'ensemble des résultats se trouvent à l'annexe G.

[4] Voir chapitre 8. Il apparaît que la phase de conversion en retour de la langue symbolique aux représentations iconiques microscopiques a été considérablement étayée par le professeur collaborant. Il a témoigné d'une utilisation ultérieure et systématique de cette phase dans ses pratiques après le test de 2013, ce qui démontre la puissance de l'outil dans le cadre de l'enseignement-apprentissage de la symbolique chimique.

9.6.2.1. Les réactifs et les produits

1) Résultats

Comme en 2012, la première question (1a) consistait à demander à l'élève de placer les termes « réactifs » et « produits » à l'emplacement ad hoc sous l'équation de réaction. Les résultats sont similaires (tableau 7).

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Correctes	94 %	92 %
Incorrectes	6 %	6 %
Pas de réponse	0 %	2 %

Tableau 7. Fréquences relatives moyennes pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Inscris les termes "réactifs" ou "produits" sur les pointillés ci-dessus. »

La deuxième question (1b), déjà présente en 2012, permet d'estimer la capacité des élèves à préciser des différences entre réactifs et produits. Dans le tableau 8, nous avons mesuré la tendance des élèves à exprimer aucune, une ou deux différences. Les élèves du test de 2013 sont légèrement plus nombreux, en termes de fréquence relative, à répondre en précisant deux différences. Ce phénomène pourrait être une conséquence d'une intervention du professeur collaborant qui avait insisté oralement sur la nécessité de donner deux différences. On peut néanmoins observer que cette intervention n'a pas empêché 41 % d'élèves de ne fournir qu'une seule réponse. Nous n'avons pas relevé de différences entre les groupes selon l'option choisie.

Nombre de réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
3	2 %	0 %
2	52 %	37 %
1	41 %	52 %
0	6 %	11 %

Tableau 8. Fréquences relatives moyennes pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Décris deux différences entre les réactifs et les produits ».

Le tableau 9 présente les principales catégories de réponses rencontrées dans les productions d'élèves.

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	39 %	45 %
Pas de « + » chez les produits	37 %	11 %
Les produits sont à droite de la flèche – les réactifs à gauche de la flèche	31 %	1 %
Plusieurs réactifs / un seul produit	15 %	19 %
La quantité d'atomes	7 %	11 %
Pas de réponse	7 %	11 %
Les états de la matière	4 %	16 %

Tableau 9 : Fréquences relatives moyennes pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Décris deux différences entre les réactifs et les produits. »

Les fréquences relatives varient fortement d'une année à l'autre. Il est intéressant de noter que notre cohorte de 2013 semble particulièrement portée sur les significations symboliques : l'absence de « + » chez les produits (37 % des élèves) et la position des réactifs par rapport à la flèche (31 % des élèves) présentent de hautes occurrences par rapport à 2012.

Par contre, la catégorie la plus populaire est identique en 2012 et 2013 : la distinction « temporelle » entre réactifs et produits (avant réaction/après réaction) reste ainsi une base de travail pour environ 2 élèves sur 5. Nous avons repéré une différence importante entre les deux groupes en fonction de l'option : 5 élèves en sciences de base ont noté que le nombre d'atomes est une différence entre réactifs et produits, contre aucun en sciences générales. Pour rappel, les réactifs et produits peuvent ne pas présenter un même nombre d'atomes constitutifs si l'on ne tient pas compte des coefficients stœchiométriques[5].

Nous avons supprimé la question 1c du post-test de 2012, portant sur la capacité des élèves à déterminer un point commun entre réactifs et produits.

2) Analyse

La première question montre que, comme en 2012, le positionnement symbolique des réactifs et des produits dans l'équation de réaction est acquis pour une large majorité d'élèves.

Par contre, l'analyse des réponses à la deuxième question montre une grande variabilité des fréquences relatives des items, et montre la présence importante de deux des quatre

[5] Voir le chapitre 8 pour une discussion sur ce sujet.

facettes visées : la position dans une équation de réaction et la chronologie dans une réaction chimique (corps avant la réaction/corps après la réaction). Si celle-ci est encore favorisée, la position dans l'équation chimique est largement plus représentée qu'en 2012 (alors qu'elle est déjà testée dans la question 1a). Les réponses relatives à une modification de l'arrangement atomique et/ou des propriétés des réactifs et des produits restent marginales. Ce constat s'explique par le fait que les deux facettes les plus fréquentes sont explicitement définies dans la séquence de leçons, contrairement aux deux autres.

Le nombre d'atomes constitue une différence entre réactifs et produits pour 4 élèves sur 54. Le problème de l'identité des réactifs (ensemble ou isolé ? Avec les coefficients ou non ?) apparaît donc aussi dans cette cohorte d'élèves.

9.6.2.2. Le signe « + »

1) Résultats

Dans notre post-test de 2013, la question portant sur les significations du signe « + » propose plusieurs items, avec la possibilité pour l'élève de donner un premier choix dans une combinaison éventuelle d'items. L'une des conséquences de ce modus operandi est l'augmentation importante de réponses contenant plusieurs items (tableau 10).

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
1 réponse	26 %	57 %
Addition	9 %	14 %
Mise en contact	9 %	26 %
Réaction	6 %	13 %
Mélange	1 %	5 %
2 réponses	52 %	40 %
Mise en contact et mélange	19 %	11 %
Mélange et addition	13 %	5 %
Mise en contact et réaction	9 %	5 %
Autres réponses	10 %	/
3 réponses	19 %	2 %
Mise en contact et mélange et réaction	9 %	0 %
Mise en contact et mélange et addition	6 %	2 %
Autres réponses	4 %	/
4 réponses	4 %	1 %

Tableau 10. Fréquences relatives moyennes par nombre de réponses cochées, et par combinaisons cochées, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

Ainsi, les réponses présentant plus d'un item présentaient une fréquence relative de 43 % en 2012, contre 74 % en 2013. Cette augmentation importante des réponses multiples, désormais majoritaires, conjuguée à la diminution de l'échantillon, entraîne une dispersion accrue des fréquences relatives en fonction du type de combinaisons cochées.

De plus, si l'on s'intéresse aux fréquences pour chaque item, on observe une hausse pour l'ensemble des items par rapport à 2012, tout en conservant une hiérarchie semblable entre les items (tableau 11). Il semble donc que la consigne explicite qui informe qu'un choix multiple est possible (en insistant sur le fait qu'il faille faire un « premier choix ») pousse les élèves à cocher plusieurs items. L'augmentation semble bénéficier particulièrement à l'item « mélange » (de 26 à 56 %) : en effet, nous avons vu, dans le chapitre 8, que la signification du « + » en tant que mélange était le plus souvent citée en complément à une autre signification.

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Mise en contact	63 %	55 %
Mélange	56 %	26 %
Addition	44 %	36 %
Réaction	37 %	25 %

Tableau 11. Fréquences relatives additionnées pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

Cependant, la situation diffère quelque peu quand on analyse les premiers choix exprimés par les élèves (tableau 12). La signification « mise en contact » convainc plus de deux élèves sur cinq (24 élèves). À l'inverse, 12 élèves prêtent prioritairement au signe « + » la signification qu'il véhicule dans le domaine des mathématiques : une addition entre termes distincts.

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Mise en contact	24	44 %
Addition	12	22 %
Réaction	10	19 %
Mélange	8	15 %

Tableau 12. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour chaque item cité en premier choix, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

La comparaison des groupes selon l'option choisie révèle deux tendances dans les premiers choix exprimés (tableau 13) : le « + » en tant que mise en contact est favorisé

chez les élèves en sciences générales (61 % contre 36 % en sciences de base), et le « + » en tant qu'addition présente une fréquence deux fois plus importante dans le groupe de sciences de base (28 % contre 11 % dans le groupe en sciences générales).

Réponses 1er choix	Fréquence relative en SG	Fréquence relative en Sb
Mise en contact	61 %	36 %
Addition	11 %	28 %
Réaction	17 %	22 %
Mélange	11 %	14 %

Tableau 13. Fréquences relatives moyennes pour chaque item cité en premier choix en fonction de l'option choisie, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le signe "+" ? »

2) Analyse

Ces résultats permettent de confirmer l'analyse a posteriori du test précédent, en établissant une hiérarchie plus précise des significations du signe « + ».

Le « + » en tant que mise en contact reste majoritaire (63 % des élèves ont coché l'item associé) mais il est concurrencé par les autres items proposés. Dans le groupe en sciences générales, 11 élèves sur 18 (61 %) ont cité l'item « mise en contact » comme premier choix, pour 13 élèves sur 36 en sciences de base. Le « + » comme mise en contact constitue donc une base solide sur laquelle peut se construire le réseau de significations.

En outre, le « + » en tant qu'addition rencontre un plus grand succès dans notre test de 2013. L'item « addition » est en effet la combinaison isolée la plus souvent cochée avec l'item « mise en contact ». Remarquons que les élèves en option sciences de base présentent une tendance plus importante à associer le signe « + » à sa signification mathématique : 10 élèves sur 36 citent même l'item « addition » en premier choix.

La signification du « + » en tant que mélange est également favorisée, avec une fréquence relative en augmentation de 30 %. Par contre, cette signification est rarement un premier choix dans la cohorte testée (8 élèves sur 54).

Enfin, le « + » en tant que symbole de la réaction est la signification qui présente la plus faible fréquence relative (37 % des élèves). Comme dans le test de 2012, cette signification est souvent combinée au « + » comme mise en contact. Notons également, phénomène non négligeable, que l'item « réaction » a été sélectionnée comme premier choix par 3 élèves de « sciences générales » et 7 élèves de « sciences de base ».

Bref, les significations entourant le signe « + » dans une équation chimique sont véritablement en concurrence dans l'esprit des élèves. Leurs fréquences relatives élevées soulignent encore leur coexistence dans les classes.

9.6.2.3. La flèche de réaction

1) Résultats

Comme pour le signe « + », la possibilité d'émettre un premier choix a augmenté le taux de combinaisons multiples pour la question portant sur les significations de la flèche (tableau 14).

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
1 réponse	30 %	47 %
« Réagissent pour former » (RPF)	24 %	35 %
Réaction chimique	4 %	6 %
Indique les produits	2 %	4 %
Egal	0 %	3 %
2 réponses	43 %	42 %
« RPF » et réaction chimique	20 %	13 %
« RPF » et indique les produits	11 %	19 %
« RPF » et égal	7 %	0 %
Autres réponses	5 %	10 %
3 réponses	28 %	11 %
« RPF » et indique les produits et réaction	13 %	9 %
« RPF » et indique les produits et égal	9 %	0 %
Autres réponses	6 %	2 %

Tableau 14. Fréquences relatives moyennes par nombre de réponses cochées, et par combinaisons cochées, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie la flèche ? »

Par contre, malgré une dispersion plus importante des fréquences en 2013, les quatre principales combinaisons cochées sont assez similaires entre les deux tests. On peut toutefois remarquer une percée des combinaisons à trois réponses, qui contiennent toujours, dès lors, une signification non souhaitée (soit l'item « égal », soit l'item « indique les produits »). Si l'on se focalise sur les fréquences additionnées pour chaque item (tableau 15), on observe la remarquable stabilité des items « réagissent pour former » et « indique les produits », et l'augmentation de la fréquence des items « égal » (de 11 % à 20 % d'occurrence) et « réaction chimique » (de 29 à 43 %).

L'augmentation de la fréquence relative de l'item « égal » est en grande partie due aux élèves de l'option sciences de base : 10 élèves sur 36 dans ce groupe ont coché cet item, contre un seul élève de l'option sciences générales.

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
« Réagissent pour former »	91 %	81 %
Réaction chimique	43 %	29 %
Indique les produits	39 %	41 %
Égal	20 %	11 %
Mise en contact	4 %	3 %

Tableau 15. Fréquences relatives moyennes, additionnées pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie la flèche ? »

Les premiers choix exprimés pour la signification de la flèche confirment l'avantage de la signification « réagissent pour former » sur les autres items (tableau 16). Les autres significations viennent essentiellement compléter cette expression prototypique. Si 16 élèves sur 18 (89 %) en sciences générales ont opté pour la signification « réagissent pour former » en premier choix, ce taux tombe à 69 % en sciences de base. L'item « indique les produits » est la signification concurrente dans le groupe d'élèves en sciences de base : 6 élèves sur 36 l'ont sélectionné en tant que premier choix.

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
« Réagissent pour former »	41	76 %
Indique les produits	7	13 %
Réaction chimique	5	9 %
Egal	1	2 %
Mise en contact	0	0 %

Tableau 16. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour chaque item cité en premier choix, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie la flèche ? »

2) Analyse

Une hiérarchie de significations entourant la flèche de réaction émerge, avec des écarts de fréquence plus importants que dans le réseau sémantique associé au signe « + ».

Comme en 2012, l'item « réagissent pour former » constitue la signification la plus souvent citée, tant en fréquence cumulée (91 %) que dans les premiers choix exprimés (76 %).

L'item « réaction chimique » est également fréquemment sélectionnée (43 % de la cohorte). Ces deux résultats valident l'un de nos objectifs a priori : connecter la flèche à la réaction chimique.

La représentation selon laquelle la flèche indique les produits est stable : 2 élèves sur 5 la choisissent en 2012 et en 2013. Cette signification constitue un premier choix pour 7 élèves sur 54.

Enfin, l'assimilation de la flèche de réaction au signe « = » présente une fréquence relative assez importante (20 % de la cohorte – 1 élève sur 5, quoique seul un élève ait sélectionné cet item comme premier choix). Ce phénomène peut être imputé à deux facteurs : l'augmentation générale des réponses à combinaisons multiples et la tendance des élèves en sciences de base à conserver la signification mathématique du signe « + » dans l'équation chimique.

9.6.2.4. Le coefficient stœchiométrique et l'indice

1) Résultats

Un des principaux objectifs de notre séquence de leçons est de favoriser la distinction entre atomes et molécules d'une part, et entre indice et coefficient d'autre part. Le tableau 17 indique que le nombre d'élèves associant le coefficient stœchiométrique à un nombre de molécules, même dans le cas du sodium, reste très important. En termes de fréquences additionnées, le taux est même en progression par rapport à 2012 (de 41 % à 56 %).

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Coefficient	78 %	67 %
Nombre de molécules	56 %	41 %
Nombre d'atomes	37 %	44 %
Indice	11 %	16 %
Proportion	9 %	1 %

Tableau 17. Fréquences relatives moyennes, additionnées pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le chiffre 4 dans "4 Na" ? »

Le résultat le plus étonnant provient de l'analyse des données en fonction de l'option choisie (tableau 18). En effet, la fréquence relative d'élèves ayant sélectionné l'item « nombre de molécules » (72 %) en sciences générales est plus important qu'en sciences de base (50 %).

Plus encore, un élève sur quatre dans la cohorte de 2013, exprime l'item « nombre de molécules » comme premier choix pour la signification du coefficient stœchiométrique (tableau 19). Parmi les 13 élèves ayant fait ce choix, 6 élèves sont en sciences générales et 7 élèves sont en sciences de base.

Réponses	Fréquence relative SG	Fréquence relative Sb
Coefficient	83 %	78 %
Nombre de molécules	72 %	50 %
Nombre d'atomes	33 %	42 %
Indice	0 %	17 %
Proportion	17 %	3 %

Tableau 18. Fréquences relatives moyennes, additionnées pour chaque item, en fonction de l'option choisie, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le chiffre 4 dans "4 Na" ? »

La confusion entre molécule et atome touche donc particulièrement les élèves de sciences générales, sans pour autant épargner les élèves de sciences de base. Notons cependant que l'item « proportion » présente une fréquence relative plus importante en 2013 qu'en 2012, même si le nombre d'élèves concernés (4) reste marginal.

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Coefficient	29	54 %
Nombre de molécules	13	24 %
Nombre d'atomes	7	13 %
Indice	3	6 %
Proportion	2	4 %

Tableau 19. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour chaque item cité en premier choix, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le chiffre 4 dans "4 Na" ? »

L'analyse des choix opérés par les élèves à propos de la signification de l'indice permet de constater que la confusion entre indice et coefficient (tableau 20) est devenue peu fréquente : seuls trois élèves (en sciences de base) ont opté pour l'item « coefficient ». 20 % des élèves (très majoritairement en sciences de base) associent encore l'indice à la valence de l'atome, ce qui constitue un résultat encourageant sans être pleinement satisfaisant.

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Indice	93 %	82 %
Valence de Na	20 %	30 %
Coefficient	6 %	13 %

Tableau 20. Fréquences relatives moyennes, additionnées pour chaque item, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Que signifie le chiffre 2 dans "Na_2O" ? »

2) Analyse

L'analyse a posteriori de 2012 est en grande partie confirmée en 2013. Le champ sémantique du coefficient stœchiométrique est toujours déséquilibré : les significations des niveaux microscopique et symbolique sont largement plus fréquentes que la signification menant au niveau macroscopique (proportion), même si celle-ci progresse quelque peu.

Si la confusion entre les termes « indice » et « coefficient » semble être moins fréquente, la confusion entre atome et molécule reste un problème : un élève sur quatre choisit en premier l'item « nombre de molécules » comme signification du coefficient stœchiométrique, dans le cas du sodium. 56 % des élèves ne peuvent se départir de la signification « nombre de molécules » pour le coefficient alors que celui-ci est appliqué à un corps atomique.

Ces confusions n'apparaissent pas de la même manière en fonction de l'option choisie par l'élève. Dans notre échantillon, les élèves de sciences générales sont plus touchés par la confusion entre atome et molécule, alors que les élèves de sciences de base tendent à confondre plus souvent indice et coefficient ou indice et valence. Ce résultat peut être interprété comme une conséquence de la capacité supérieure des élèves d'option scientifique à retenir et intégrer des modèles temporaires, tel que celui du modèle moléculaire enseigné dans les premières années.

9.6.2.5. La réaction chimique

1) Résultats

La question ouverte portant sur le processus réactionnel n'a, dans l'ensemble, pas apporté de constat majeur. En effet, les fréquences mesurées en 2012 pour chaque catégorie de réponse sont semblables à celles mesurées en 2013 (tableau 21).

Deux phénomènes nouveaux émergent malgré tout de l'analyse des données :

- 3 élèves (d'option sciences générales) ont explicitement fait référence à la rupture et à la formation de liaisons dans le processus réactionnel. Une telle représentation de la réaction chimique n'avait pas été rencontrée en 2012.
- Certaines significations exprimées pour des symboles de l'équation sont plus souvent réinvesties dans la représentation du processus réactionnel[6]: « les réactifs sont mis en contact », « réagissent pour former les produits », « réagissent en proportion », « s'additionnent », etc. Les significations particulières de chaque symbole sont ainsi utilisées pour nourrir la représentation de la réaction chimique dans son ensemble.

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme s'assembler, se réarranger, se lier, etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	37 %	31 %
Réagissent entre eux (sans indication du processus réactionnel)	15 %	21 %
Se transforment (sans indication d'une référence au comment du processus réactionnel)	13 %	12 %
Se mélanger (idée principale)	11 %	15 %
Pas de réponse	7 %	15 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (effervescence, combustion, solution, disparition/apparition)	7 %	9 %
Référence explicite à la rupture et/ou formation de liaisons chimiques (au niveau microscopique)	6 %	0 %
Conservation du nombre d'atomes	4 %	0 %

Tableau 21. Fréquences relatives pour les principales catégories de réponses, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs pendant la réaction chimique ? »

2) Analyse

Nous avions, pour le test de 2012, regretté qu'aucun élève n'ait formulé explicitement une représentation de la réaction chimique comprenant la rupture de liaisons chez les

[6] Voir annexe G.

réactifs et la formation de liaisons chez les produits. Dans le test de 2013, on trouve trois productions d'élèves comportant une représentation de ce type.

Ce résultat encourageant ne permet cependant pas d'oublier l'immense majorité de réponses basées sur des « mots-refuges » tels que : « les réactifs réagissent », « se transforment », « se mélangent », « s'assemblent », etc.

9.6.2.6. La représentation microscopique iconique des réactifs et des produits

1) Résultats

Nous avons clos le premier post-test par une tâche de conversion des informations contenues dans l'équation de combustion du sodium en une représentation iconique microscopique (en utilisant des « modèles moléculaires » compacts). Dans le test de 2012, nous avions expliqué le taux important d'abstention et de productions erronées par le fait que nous n'avions pas récrit l'équation de combustion du sodium à la suite de la tâche. En 2013, l'équation chimique apparaissait en-dessous de la question posée ; les résultats confirment notre hypothèse de départ (tableau 22).

Réponses	Fréquence relative (2013)	Fréquence relative (2012)
Réactifs et produits corrects	37 %	4 %
Au moins un réactif/produit correct	31 %	27 %
Aucun réactif/produit correct	31 %	48 %
Pas de réponse	0 %	23 %

Tableau 22. Fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2012 et 2013, issues des réponses à la question du post-test : « En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium. »

On remarque en effet que le taux de réponses correctes est en très nette augmentation, alors que l'abstention a complètement disparu. Par contre, 63 % des élèves éprouvent toujours des difficultés à réaliser la tâche de conversion, dont une majorité en sciences de base (tableau 23) : 28 élèves de cette option sur 36 n'ont pas réussi à dessiner une représentation iconique correcte.

Réponses	Fréquence relative SG	Fréquence relative Sb
Réactifs et produits corrects	67 %	22 %
Au moins un réactif/produit correct	22 %	33 %
Aucun réactif/produit correct	11 %	44 %

Tableau 23. Fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique en fonction de l'option choisie, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question du post-test : « En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium. »

L'écart est très important avec les élèves de sciences générales, dont 67 % de la cohorte ont réussi l'exercice de conversion.

Les fréquences des types d'erreurs rencontrés ont été mesurées en reprenant les catégories présentées au début de ce chapitre (tableau 24). Quatre types d'erreurs (1, 2, 4 et 5) sont relevés. On observe un des effets de l'ajout de l'équation chimique directement en-dessous de la question : aucun élève ne produit de représentation iconique proche de la combustion du carbone ou du magnésium (erreur de type 6). Cette erreur semble donc bien provoquée par l'absence de données symboliques directement accessibles. L'erreur de type 1 est repérée dans 13 productions d'élèves (sur 54), ce qui donne une fréquence relative de 24 %. L'interprétation additive est donc présente chez près d'un quart des élèves constituant notre échantillon. Elle est plus fréquente chez les élèves en sciences de base (11 élèves sur 36). L'identification des types d'erreurs a permis de guider chaque élève vers un parcours adapté lors de la séance de remédiation.

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	13	24 %
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	9	17 %
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	8	15 %
Type 5 - Eclatement des réactifs et/ou des produits	4	7 %
Type 3 – Non-utilisation de l'indice	0	0 %
Type 6 – Représentation d'une autre réaction chimique	0	0 %

Tableau 24. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les types d'erreurs de représentation iconique microscopique, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question du post-test : « En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium. »

Enfin, nous nous sommes focalisés sur la qualité des représentations iconiques correctes du corps pur composé (« $2Na_2O$ », tel que noté dans l'équation chimique). La représentation la plus sophistiquée (dite « alternée ») présente la fréquence relative la plus haute (31,5 % des élèves) alors que la représentation la moins sophistiquée (dite « linéaire ») est repérée dans 22 % des productions d'élèves (tableau 25). On retrouve la hiérarchie établie en 2012, avec des fréquences beaucoup plus importantes dues à la hausse du taux de réponses correctes. La tendance à fournir une représentation iconique alternée est présente quelle que soit l'option choisie par l'élève (6 élèves de sciences générales et 11 élèves de sciences de base), avec une fréquence relative comparable (respectivement 33 % et 31 %).

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Représentation alternée	17	31 %
Représentation linéaire	12	22 %
Représentation à plusieurs accroches	3	6 %
Représentation décalée	0	0 %

Tableau 25. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les types de représentation iconique microscopique correcte du corps pur composé, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question du post-test : « En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), représente la réaction de combustion du sodium. »

9.6.3. À partir du deuxième post-test

Le deuxième post-test avait pour but de sonder les performances des élèves lors d'une tâche de conversion (LS -> RI^3) : avaient-elles été améliorées par une courte séance de remédiation ciblée en fonction des types d'erreurs observées ?

Un élève de 3A1 (en option « sciences de base ») et un élève de 3A2 (en option « sciences générales ») n'ont pas passé ce test. Par contre, trois élèves de 3A3 (en option « sciences de base ») l'ont passé sans avoir réalisé le premier post-test.

Le tableau 26 montre que la séance de remédiation a un impact important sur les performances des élèves. Le taux de représentation iconique correcte passe de 37 % (20 élèves) à 65 % (36 élèves). Surtout, les représentations iconiques complètement incorrectes passent d'une fréquence de 31 % (17 élèves) à 4 % (2 élèves).

Réponses	Fréquence relative post-test n°2 (nombre d'élèves)	Fréquence relative post-test n°1 (nombre d'élèves)
Réactifs et produits corrects	65 % (36)	37 % (20)
Au moins un réactif/produit correct	31 % (17)	31 % (17)
Aucun réactif/produit correct	4 % (2)	31 % (17)

Tableau 26. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique, avant et après la séance de remédiation, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question a) du post-test n°2.

L'effet est particulièrement visible sur les performances des élèves en sciences de base (tableau 27).

Réponses	Fréquence relative post-test n°2 Sb (nombre d'élèves)	Fréquence relative post-test n°1 Sb (nombre d'élèves)
Réactifs et produits corrects	53 % (20)	22 % (8)
Au moins un réactif/produit correct	42 % (16)	33 % (12)
Aucun réactif/produit correct	5 % (2)	44 % (16)

Tableau 27. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les catégories d'achèvement de l'exercice de représentation iconique microscopique, avant et après la séance de remédiation, pour les élèves en sciences de base, dans les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question a) du post-test n°2.

Sur les 36 élèves de sciences de base testés dans les trois classes et qui avaient passé le premier post-test, on observe que :

- **21 élèves ont amélioré leur performance** (13 vers une maîtrise totale et 8 sur la voie de la maîtrise).
- 7 élèves ont conservé leur bon résultat initial.
- 5 élèves conservent un résultat moyen.
- 1 élève a réalisé une moins bonne performance.
- 1 élève a produit une représentation iconique incorrecte dans les deux tests.
- 1 élève n'a pas passé le test.

En sciences générales, la quasi-totalité des élèves (16 sur 17) ont produit une représentation iconique microscopique correcte après la séance de remédiation.

Les types d'erreurs de représentation iconique ont également été dénombrés pour le post-test n°2 (tableau 28).

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative post-test n°2
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	8	15 %
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	5	9 %
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	3	5 %
Type 5 - Éclatement des réactifs et/ou des produits	3	5 %

Tableau 28. Nombre d'élèves et fréquences relatives moyennes pour les types d'erreurs de représentation iconique microscopique, après la séance de remédiation, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question a) du post-test n°2.

L'erreur de type 1 est associée à un phénomène particulier. D'une part, certains élèves (9), qui avaient commis une erreur de ce type dans le post-test n°1 ne la commettent plus dans le post-test n°2 : il peut s'agir d'un effet de notre séance de remédiation. D'autre part, 4 élèves séparent le corps pur composé en ses corps purs simples constitutifs dans le post-test n°2, alors qu'ils avaient correctement représenté le corps pur composé dans le post-test n°1. Autrement dit, quand l'interprétation additive est traitée chez certains élèves ciblés, elle peut disparaître (au moins temporairement) ; mais elle peut tout aussi bien resurgir chez d'autres élèves qui n'ont pas fait l'objet d'une remédiation ciblée pour ce type d'erreurs. Ce phénomène nourrit notre hypothèse de l'interprétation additive comme une primitive phénoménologique, c'est-à-dire un raisonnement intuitif que les élèves doivent sans cesse inhiber pour mettre en œuvre d'autres raisonnements[7].

Enfin, la séance de remédiation a fortement influencé le type de représentations iconiques correctes produites par les élèves (tableau 29). Bien entendu, le corps pur composé diffère selon le post-test : oxyde de sodium pour le premier et ammoniac pour le deuxième. Néanmoins, on remarquer une baisse des représentations alternées[8] au profit des représentations linéaires, qui semblent favorisées par notre séance de remédiation : elles constituent en effet la représentation la plus simple lorsque l'on dénombre les atomes composant une molécule.

[7] Pour une discussion épistémologique de l'interprétation additive et l'hypothèse d'une « p-prim », voir le chapitre 5.

[8] Dans le cas de l'ammoniac, une représentation « alternée » se distingue d'une représentation « décalée » par la présence d'un axe de symétrie dans la molécule.

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative post-test n°2
Représentation linéaire	30	55 %
Représentation décalée	11	20 %
Représentation alternée	3	5 %

Tableau 29. Nombre d'élèves et fréquences relatives pour les types de représentation iconique microscopique correctes, après la séance de remédiation, pour les classes ayant suivi notre séquence de leçons en 2013, issues des réponses à la question a) du post-test n°2.

8 élèves sont ainsi passés d'une représentation alternée de l'oxyde de sodium (premier post-test) à une représentation linéaire de l'ammoniac (deuxième post-test). Ils s'adaptent en cela à l'objectif essentiel de la tâche de conversion : vérifier la composition atomique d'une molécule, et non prévoir l'agencement atomique le plus probable.

9.7. Discussions

Cette recherche s'inscrit notamment dans la continuité des travaux de Hinton et Nakhleh (1999). Leur étude porte sur les représentations d'étudiants de première année universitaire concernant la réaction chimique, sur base du « chemistry triplet » de Johnstone. Dans la conclusion de cet article, ils écrivent (p.166-167) :

> […] two principles for teaching emerge. First, helping students develop facilities in using multiple representations requires that educators help students become explicitly aware of these representations and provide opportunities in the classroom for students to use these representations. […] Second, educators must develop assessments designed to reveal students' macroscopic, microscopic and symbolic ideas[9].

Un peu plus loin, Hinton et Nakhleh mettent en avant un obstacle important :

> A major barrier to achieving this goal is that methods of evaluation are not well adapted to assessing ideas that are not represented in written form. Most classroom communication occurs through written and spoken language. This poses no particular obstacle to using symbolic representations in evaluation, but microscopic and macroscopic representations are less easily communicated using language. Pictorial language is one option for communicating these

[9] « […] Deux principes d'enseignement émergent. Premièrement, aider les étudiants à développer des habiletés à utiliser des représentations multiples implique que les enseignants aident les étudiants à prendre conscience explicitement de ces représentations et assurent des moments au cours desquels les étudiants utilisent ces représentations. […] Deuxièmement, les enseignants doivent développer des évaluations construites pour révéler les idées des étudiants aux niveaux macroscopique, microscopique et symbolique » (traduction libre).

> representations, another option is using written or spoken language to describe mental pictures of these representations[10].

Notre séquence de leçons applique les deux principes de Hinton et Nakhleh, en permettant aux élèves d'utiliser les différents systèmes sémiotiques et en décrivant explicitement les rôles et limites. Nos méthodes d'évaluation (post-test n°1 et post-test n°2) utilisent les deux options décrites dans la citation supra : nous utilisons à la fois les représentations iconiques (« pictural language ») et la description des représentations mentales par la langue ordinaire modifiée (« written language »). Ce croisement des deux options permet de juger de la cohérence des représentations des élèves face à des tâches diverses. Une série de constats d'importance émerge de notre analyse.

9.7.1. Une hiérarchie des significations

En comparant les résultats de 2012 et 2013, notre premier constat est celui de la stabilité des significations exprimées, notamment dans les questions ouvertes portant sur l'identité des réactifs et la description du processus réactionnel. Notre travail d'analyse de 2012 avait donc bien permis de définir des catégories exhaustives.

Les questions à choix multiples du post-test de 2013 diffèrent de celles posées en 2012 par la possibilité donnée aux élèves d'exprimer un premier choix. Ce changement a eu pour effet d'augmenter le taux de combinaisons multiples, et donc, de manière générale, les fréquences relatives des items. Cependant, cette augmentation ne profite pas de la même manière à toutes les significations. Ainsi, les significations symboliques empruntées aux mathématiques sont plus souvent cochées par les élèves dans le test de 2013 : le « + » en tant qu'addition passe de 36 % à 44 % en fréquence relative, la flèche en tant qu'équivalent du signe « = » passe de 11 % à 20 %. Les significations de nature plus chimiques, mais que l'on pourrait qualifier de « secondaires » par rapport aux significations les plus populaires, sont également renforcées : c'est le cas du signe « + » en tant que mélange (de 26 % à 56 %) ou de la flèche en tant que réaction chimique (de 29 % à 43 %). Enfin, une confusion majeure voit son occurrence augmenter par le biais de ce changement de méthodologie d'évaluation. En effet, le coefficient en tant que nombre de molécules dans le cas du sodium dépasse la barre des 50 % de fréquence relative (+ 15 % par rapport à 2012). Aucune autre signification dans le cas du coefficient stœchiométrique ne présente une telle augmentation.

[10] « Un obstacle majeur pour atteindre ce but est que la plupart des méthodes d'évaluation ne sont pas adaptées pour évaluer des idées qui ne sont pas représentées sous forme écrite. Une large part de la communication dans la classe se base sur le langage parlé ou écrit. Cela ne pose pas de problème particulier pour les représentations symboliques à évaluer, mais les représentations microscopiques ou macroscopiques sont moins facilement communicables en utilisant le seul langage naturel. Le langage pictural constitue une option pour communiquer de telles représentations, une autre option est d'utiliser le langage écrit ou parlé pour décrire les représentations mentales des élèves » (traduction libre).

En outre, les significations les plus populaires ne sont pas bousculées par ce changement méthodologique. Leurs fréquences relatives additionnées sont même en légère augmentation. Le résultat le plus frappant se trouve dans l'expression des premiers choix. Les significations les plus citées sont celles que nous avons choisi de favoriser dans notre séquence de leçons. Or, les écarts de fréquence sont bien plus grands par rapport aux écarts enregistrés pour les fréquences additionnées. Il existe donc bien des significations que les élèves, quoi qu'il arrive, jugent plus pertinentes, même si elles coexistent avec d'autres significations possibles.

Bref, le changement de la méthode d'évaluation semble avoir poussé les élèves à exprimer une plus grande partie de la charge sémantique qui accompagne les symboles de l'équation chimique. Manifestement, les significations s'avèrent être combinées dans un ordre qui s'apparente à une hiérarchie globale :

- Dans le haut de la hiérarchie se trouvent les termes ou les expressions prototypiques que nous avons explicitement favorisées pendant la séquence de leçons : « + » en tant que mise en contact, la flèche traduite en « réagissent pour former », le coefficient et son rôle d'agent dans la pondération des équations chimiques, l'indice en indicateur d'un nombre d'atomes dans une molécule. Ces significations les plus populaires – que nous dénommons « primaires » – dépassent la barre des 60 % de fréquence relative, pour atteindre 91 % dans le cas de l'expression prototypique « réagissent pour former ».
- Viennent ensuite les significations que nous appelons « secondaires ». Elles sont de trois types : soit de niveau symbolique et empruntée aux mathématiques (addition, égal), soit de niveau symbolique et empruntée à d'autres domaines (flèche qui « indique les produits »), soit de niveaux macroscopique ou microscopique (nombre de molécules/d'atomes, mélange, réaction chimique).
- Enfin, à la base de la hiérarchie se trouvent les significations qui sont usuellement associées à un autre symbole, et que nous appelons significations « tertiaires » (coefficient en tant qu'indice, flèche en tant que mise en contact, signe « + » en tant que réaction).

Ce travail de hiérarchisation des significations, favorisé par l'augmentation du taux de réponses à combinaisons multiples, est bien entendu à nuancer au regard de la taille de l'échantillon (54 élèves seulement). Cependant, les écarts entre les fréquences relatives étaient déjà en partie observables dans le test de 2012, qui profitait d'une cohorte plus large (110 élèves). De plus, au-delà des chiffres, un professeur de chimie peut être intéressé par le seul résultat qualitatif : les élèves de 15 ans se construisent assez

rapidement un réseau complexe de significations, dans lequel – imparablement – ils imposent un ordre de pertinence. Cet ordre est éclairé par notre étude locale.

9.7.2. Des profils d'élèves en fonction de l'option

Nous avons souhaité mettre en évidence les éventuelles différences entre le groupe d'élèves en sciences générales (18 élèves dispersés dans deux classes) et le groupe d'élèves en sciences de base (36 élèves dispersés dans trois classes). La taille de notre échantillon étant restreinte, nous nous limitons à donner des tendances, dont il faudra nécessairement tester la persistance dans des études ultérieures. Nous avons dénombré quatre points de divergence entre les deux groupes. Ces lignes de faille sont susceptibles d'esquisser des profils caractéristiques, utiles à la différenciation des apprentissages dans le cas, notamment, de classes composées de plusieurs options.

Premièrement, les élèves de l'option sciences générales expriment une hiérarchie des significations plus nette, présentant des écarts importants entre fréquence relative des différents items tant pour les fréquences additionnées que pour les premiers choix exprimés. A contrario, les fréquences relatives associées à chaque item sont plus dispersées pour les élèves de l'option « sciences de base », rendant compte de réseaux sémantiques plus variés dans ce groupe. Les élèves en sciences générales convergeraient donc vers des significations communes, alors que chacun des élèves en sciences de base aurait construit son réseau conceptuel propre. Il est aussi possible que ce résultat soit dû au nombre plus important d'élèves dans la cohorte en sciences de base (et donc, d'une augmentation de la variabilité), ainsi qu'à la diversité des options qui la complètent (langues, théâtre, artistique).

Deuxièmement, les élèves en sciences de base ont tendance à cocher plus souvent les items associés à des significations provenant du champ disciplinaire des mathématiques. Dans le cas du signe « + », 55 % des élèves de cette option ont coché l'item « addition » contre 22 % des élèves en sciences générales. On retrouve la trace de ce comportement dans la question portant sur la signification de la flèche : 28 % des élèves en sciences de base ont indiqué que la flèche était l'équivalent du signe « = » contre 6 % des élèves en sciences générales. Ces derniers semblent donc avoir distingué plus radicalement les significations chimiques des significations mathématiques, au contraire des élèves de sciences de base qui recourent encore souvent à celles-ci. L'identification précise des traits distinctifs de la chimie en tant que discipline serait caractéristique des élèves en sciences générales.

Troisièmement, la confusion entre atome et molécule dans le cas du coefficient stœchiométrique est plus prégnante chez les élèves en sciences générales : 72 % ont coché l'item « nombre de molécules » (dans le cas du sodium), contre 50 % des élèves de sciences de base. Cet item est même cité en premier choix par un tiers des élèves de sciences générales. L'expression prototypique « nombre de molécules » associée au

coefficient stœchiométrique serait particulièrement pertinente dans l'esprit de ces élèves, qui font également preuve de moins d'esprit critique face à une définition temporaire vue au cours. À l'inverse, les élèves de sciences de base semblent capables d'ajuster cette définition avec moins de rigidité.

Quatrièmement, les élèves de sciences générales sont plus performants que ceux de sciences de base quand il s'agit de réaliser une tâche de conversion entre deux systèmes sémiotiques : 67 % produisent une représentation iconique correcte au premier post-test contre 22 % des élèves de sciences de base. Un tel écart n'est pas explicable par le type d'enseignement auquel ils ont été soumis, car les élèves des deux options sont mélangés dans deux des trois classes testées (en 3A1 et 3A2). Deux conséquences en découlent. D'une part, le professeur de chimie d'une classe mixte (du point de vue des options) doit prendre conscience d'un déficit potentiel de la capacité de conversion entre systèmes sémiotiques chez les élèves en sciences de base. Même si la raison de ce déficit reste à définir, nous posons l'hypothèse que la maîtrise des règles à l'intérieur de chaque système sémiotique est principalement en cause. Il faudra donc que l'enseignant présente indépendamment chaque système sémiotique, avant de travailler spécifiquement les tâches de conversion avec ses élèves. D'autre part, la confusion entre atome et molécule décrite plus haut n'a pas d'incidence sur la performance des élèves en sciences générales quand on leur soumet une tâche de conversion entre langue symbolique et registre iconique microscopique. Ce paradoxe avait déjà été en partie repéré par Hinton et Nakhleh (1999, p.166). Une erreur terminologique n'implique donc pas forcément un dysfonctionnement dans la réalisation de tâches mettant en œuvre des concepts (essentiellement au niveau microscopique).

9.7.3. Une tâche plus complexe qu'il n'y paraît

Convertir une information symbolique en une représentation iconique microscopique est considéré par beaucoup de professeurs comme une tâche aisée ; il ne s'agirait après tout que de passer d'un code ardu (des symboles chimiques, des indices, des coefficients) à un code bien plus simple (un dessin avec des cercles de différentes tailles). On retrouve pourtant dans la littérature scientifique récente de nombreuses études montrant les énormes difficultés rencontrées par élèves et étudiants face à ce problème.

De nombreux auteurs se sont centrés sur la tâche de conversion d'un schéma particulaire (donc, de représentations iconiques microscopiques) à une écriture symbolique (Nurrenbern et Pickering, 1987 ; Sanger, 2000, 2006 ; Arasasingham *et al.*, 2004). La conversion inverse est moins explorée, surtout dans le cas d'une question ouverte (Arasasingham *et al.*, 2004 ; Wood et Breyfogle, 2006 ; Dawidowitz *et al.*, 2010). Dans les trois premières études citées, l'exercice consiste à dessiner un schéma particulaire correspondant aux produits d'une réaction dont on donne l'état initial sous la forme

d'un schéma particulaire. L'équation de réaction étant fournie, la difficulté réside dans le traitement du réactif en excès et dans la prise en compte des coefficients stœchiométriques. Entre 30 et 50 % des étudiants réussissent cette tâche, selon l'étude et le temps d'instruction. Dawidowitz et ses collaboratrices font remarquer que la performance augmente avec le nombre de semaines de cours : 46,3 % des productions sont correctes après six semaines de cours, pour une occurrence de 67,0 % après douze semaines de cours. La tâche est donc difficile mais elle n'est pas insurmontable pour la plupart des étudiants.

L'étude qui se rapproche le plus de notre méthodologie est celle de Yarroch (1985). Elle montre que seulement 42 % des étudiants testés sont capables de convertir une équation chimique (qu'ils ont pourtant réussi à pondérer) en un schéma particulaire correct. Les résultats de notre test de 2013 et les données de Yarroch convergent : 37 % des élèves de notre échantillon ont réussi la tâche de conversion d'une équation chimique en une représentation iconique.

L'évolution des performances avec le temps d'instruction (dans notre cas, via une séance de remédiation) est similaire à celle observée par Dawidowitz *et al.* : nous passons de 37 % à 65 % de représentations iconiques correctes. Nous divergeons cependant de cette étude par l'intervalle de temps et par le public ciblé. Nous avons en effet observé un changement après une séance de 40 minutes, alors que Dawidowitz et ses collaboratrices ont relevé les données avec un écart de six semaines. Il apparaît donc que le changement peut être (très) rapide si l'on met en œuvre un dispositif didactique qui cible les difficultés des élèves préalablement identifiées. De plus, nous apportons un dispositif didactique qui traite les difficultés au moment où l'écriture symbolique est enseignée pour la première fois aux élèves (15 ans, grade 9), c'est-à-dire en troisième année de l'enseignement secondaire. Ce choix permet d'affermir les bases de la communication en chimie, rendant plus aisé l'apprentissage de concepts ultérieurement dans le cursus, jusqu'à l'université.

9.7.4. Agrégation et interprétation additive

Le type de représentation iconique incorrect le plus relevé dans la littérature scientifique consiste en l'agrégation des atomes pour former une « super-molécule », chez les produits de réaction (Yarroch, 1985 ; Wood et Breyfogle, 2006 ; Dawidowitz *et al.*, 2010). Par exemple, l'écriture symbolique « $2NH_3$ » est représentée sous la forme d'un agrégat de type « N_2H_6 » (figure 13).

Figure 13. Exemple de représentation iconique de l'écriture symbolique « $2NH_3$ » (Dawidowitz *et al.*, 2010).

Nous avons classé ce type d'erreurs, sous le nom d'erreur de type 4, parmi les six types relevés dans notre test de 2012. Si cette erreur est fréquente dans les productions que nous avons traitées (entre 15 et 19 % d'élèves), elle ne constitue pas le type de représentation iconique incorrecte le plus souvent rencontrée. En effet, c'est la séparation du corps pur composé en ses corps purs simples constitutifs qui est l'erreur la plus repérée, tant en 2012 qu'en 2013 : environ un quart des élèves commettent cette erreur appartenant au type 1. Comment expliquer sa discrétion dans la littérature scientifique consacrée aux liens entre écriture symbolique et schéma particulaire ? L'interprétation additive des corps purs composés est bien présente dans les travaux de Keig et Rubba (1993) et de Laugier et Dumon (2004), mais elle n'est traitée qu'au niveau symbolique. Les élèves déclarent que le gaz carbonique (« CO_2 ») est composé de carbone (« C ») et de dioxygène (« O_2 »), mais ils ne réalisent pas de représentation iconique. La seule étude qui mentionne une représentation iconique relevant de l'interprétation additive est celle de Ben-Zvi *et al.* (1987). Une majorité d'élèves testés dans cette étude (15-16 ans) représentent la molécule de monoxyde de dichlore (« Cl_2O ») par une molécule de dichlore et un atome d'oxygène séparés. Or, dans des recherches ultérieures très comparables (Nurrenbern et Pickering, 1987 ; Mulford et Robinson, 2002 ; Wood et Breyfogle, 2006), aucun schéma particulaire représentant une interprétation additive n'est proposé aux élèves[11]. Bien entendu, le public-cible de notre étude est différent de celui de Ben-Zvi *et al.* : les étudiants en première année d'université sont peut-être moins enclins à raisonner suivant l'interprétation additive que les jeunes élèves de l'enseignement secondaire. Cependant, il nous semble possible que ce type d'étudiants soit quand même susceptible de suivre un raisonnement primitif tel que l'interprétation additive des corps purs composés.

Dans notre recherche, l'interprétation additive constitue un raisonnement difficile à inhiber. Si un quart des élèves commet ce type d'erreurs dans le premier post-test, ils sont encore 15 % à utiliser l'interprétation additive dans le deuxième post-test (8 élèves sur 55). Comme nous l'avons observé, il arrive que des élèves qui n'avaient pas commis l'erreur de type 1 au premier post-test produisent une représentation iconique incorrecte présentant ce type d'erreur après la séance de remédiation. Par contre, il est à noter que

[11] Voir chapitre 2, figure 3 pour les schémas particulaires proposés aux élèves. Dans le cas de la formation du trioxyde de soufre, un schéma particulaire, produit de l'interprétation additive, aurait été constitué de deux atomes de soufre séparés et de deux molécules composées de trois atomes d'oxygène.

l'erreur de type 4 (agrégation des réactifs ou des produits) chute sous les 10 % d'occurrence après la séance de remédiation (5 élèves sur 55), généralement pour des élèves qui éprouvent des difficultés depuis le début de la séquence de leçons.

9.8. CONCLUSIONS

Nous avons modifié notre séquence de leçons sur base des analyses a posteriori issues du test in situ réalisé en 2012. L'analyse des types de représentations iconiques incorrectes nous a permis de dégager six types d'erreur, parmi lesquels on trouve la représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés et l'agrégation des atomes des réactifs ou des produits en une « super-molécule ». En fonction de ces catégories, nous avons mis au point une séance de remédiation ayant pour but de travailler la tâche de conversion d'une écriture symbolique en une représentation iconique microscopique. Le premier post-test montre que nous avons reproduit en partie les résultats obtenus en 2012 concernant les significations des symboles. La possibilité d'exprimer un premier choix a permis d'affinier la hiérarchie des significations, et d'établir la structure du réseau sémantique des symboles dans l'esprit des élèves. La prise en compte de l'option dans l'analyse des données a conduit à distinguer deux profils de groupes d'élèves. En sciences générales, le groupe se compose d'apprenants aux représentations homogènes tournés vers les significations chimiques pertinentes, performants dans les tâches de conversion. Ils sont cependant sensibles aux expressions prototypiques et aux significations liées à des tâches ciblées, ce qui rend leur réseau conceptuel résistant au changement. Le groupe d'élèves en sciences de base réunit des élèves aux représentations diverses et peu performants dans les tâches de conversion. La fragilité de leur réseau conceptuel est malgré tout un avantage : il est possible de le modifier lors d'une séance de remédiation, ce que nous observons dans le deuxième post-test. Une séance de 40 minutes permet d'augmenter considérablement les performances des élèves si elle offre des parcours individualisés en fonction des erreurs identifiées lors du premier post-test.

Notre recherche s'inscrit dans la droite ligne de Dawidowitz *et al.* (2010, p. 163) quand elles écrivent avec une pointe d'ironie :

> It is therefore surprising that student-generated drawings of the submicro level are not used routinely as a teaching tool rather than simply as illustrations in textbooks and questions at the end of chapters.[12]

Nous pensons que l'introduction d'activités d'apprentissage utilisant des représentations iconiques microscopiques (statiques ou dynamiques, bidimensionnelles ou tridimensionnelles) en classe de sciences peut être bénéfique à la compréhension

[12] « Il est donc surprenant que des dessins relatifs au niveau sub-microscopiques, et générés par les élèves, ne soient pas utilisés plus fréquemment comme un outil d'enseignement plutôt qu'en illustrations simples dans les manuels ou en tant que questions à la fin de chapitres » (traduction libre).

profonde des concepts de chimie souvent cachés aux yeux des élèves dans cette notation « cabalistique » (Dagognet, 1969) propre aux chimistes. Cependant, pour les élèves, une exploration des entités au niveau microscopique semble délicate ; elle nécessite donc une exploitation critique et raisonnée de la part d'enseignants suffisamment formés pour ce type d'activités.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Difficultés principales des élèves

Pour conclure ce travail, revenons sur nos deux principales questions de recherche et voyons dans quelle mesure nous avons réussi à y répondre. La première s'énonçait ainsi : « Quelles sont les origines des difficultés éprouvées par les élèves lors de l'apprentissage et l'usage de la symbolique chimique ? » Avant d'enquêter sur les origines, nous avons relevé les six principales difficultés recensées dans la littérature scientifique :

1) Tous les symboles présents dans l'équation chimique sont associés à de multiples significations, relevant tant du champ de la discipline que de champs plus éloignés (usage dans la langue ordinaire, signification en mathématiques, etc.).
2) L'indice, situé derrière un symbole chimique dans une formule chimique, est fréquemment interprété selon deux points de vue : nombre d'atomes dans une molécule et/ou équivalent de la valence de l'atome partenaire. Par contre, l'idée d'un ratio dans un réseau ionique est souvent absente des représentations des élèves.
3) Le coefficient stœchiométrique est particulièrement polysémique. Le choix de la signification appropriée en fonction de la tâche constitue un obstacle important pour de jeunes apprenants.
4) La confusion entre indice et coefficient est très fréquemment citée dans les articles publiés sur le thème de la compréhension de la symbolique chimique. Cette confusion semble intimement liée à une distinction inopérante entre les concepts de molécule et d'atome.
5) Certains élèves présentent une interprétation additive des réactions chimiques : le corps pur composé est constitué de corps purs simples accolés, dont l'intégrité est préservée lors du processus réactionnel. L'idée de rupture de liaisons chimiques chez les réactifs est absente de ce type de raisonnement.
6) La tâche de conversion entre une information symbolique (par exemple, une formule chimique) et une représentation iconique microscopique (par exemple, une molécule représentée selon un modèle compact) est un exercice difficile pour un grand nombre d'apprenants.

Pistes d'investigation

Nous avons envisagé quatre pistes différentes dans notre investigation pour trouver les origines de ces difficultés :

1) Une piste *institutionnelle* impliquant une analyse des référentiels, des programmes, des outils d'accompagnement et des manuels scolaires.
2) Une piste *conceptuelle* qui nécessite d'explorer les théories des niveaux de savoir publiées dans la littérature scientifique.
3) Une piste *linguistique* soutenue par la caractérisation précise du système symbolique des chimistes et des relations qu'il entretient avec les autres systèmes sémiotiques dans l'enseignement-apprentissage de la chimie.
4) Une piste *épistémologique*, suivie en analysant les ressorts de la construction de la symbolique chimique dans l'histoire de la chimie.

Des modèles originaux

L'exploration des pistes conceptuelle et linguistique a mené à la construction de trois modèles d'analyse originaux, à même de clarifier les origines des difficultés éprouvées par les élèves :

- **Un modèle des niveaux de signification.** Les différentes théories des niveaux de savoir proposées dans la littérature scientifique se sont avérées inapplicables dans notre cas, sans une élucidation terminologique (qu'est-ce qu'un niveau ?) et un recentrage sur les symboles (quel lien entre les symboles et les concepts ?). Nous avons ainsi fait le choix de placer la visualisation (notamment symbolique) au centre du modèle et de la relier à ce que nous avons nommé des « niveaux de signification ». En empruntant à la fois à Talanquer (usage du terme « visualisation ») et à Taber (absence de niveau conceptuel symbolique relatif à la chimie), nous montrons que notre modèle des niveaux de significations s'inscrit dans la continuité des recherches récentes sur l'adaptation du « chemistry triplet » originel de Johnstone.
- **Une nouvelle taxonomie des systèmes sémiotiques dans l'enseignement-apprentissage de la chimie**. Il nous a également fallu clarifier les caractéristiques des systèmes sémiotiques utilisés dans l'enseignement-apprentissage de la chimie. Or, les modèles linguistiques énoncés dans la littérature scientifique sont soit trop larges (englobant les disciplines scientifiques dans leur ensemble), soit centrés sur quelques systèmes particuliers à la chimie (termes de nomenclature, registres iconiques emboîtés). Nous avons ainsi construit une nouvelle taxonomie des systèmes sémiotiques de l'oral et de l'écrit à l'œuvre dans le cours de chimie. Le système sémiotique relatif à la symbolique chimique y est classé comme une « langue artificielle symbolique » sous l'abréviation « LS ». Un tel modèle

linguistique permet de déterminer à quel système sémiotique est reliée une visualisation donnée.

- **Un triangle étendu de terminologie.** Enfin, nous avons intégré l'essence de notre modèle des significations (une visualisation potentiellement connectée à des concepts) au triangle des terminologues (désignation – concept – objet). Cette « fusion » a donné un triangle étendu dans lequel une désignation se voit reliée à la fois à un symbole, à un objet, ainsi qu'au(x) concept(s), éventuellement microscopiques et macroscopiques. Ce modèle présente l'intérêt de situer les relations potentielles qu'entretiennent, par exemple, la symbolique chimique (symbole d'un élément, formule chimique, équation chimique) et les désignations (termes de la nomenclature) ou concepts (substances, molécules, atomes) qu'elle représente.

Additionnés à nos recherches épistémologiques et institutionnelles, ces trois nouveaux outils d'analyse ont permis de cerner plus finement les origines des difficultés des élèves. Au-delà des observations et des constats qu'ils génèrent concernant la symbolique chimique, ces modèles peuvent constituer des apports substantiels pour les chercheurs en didactique des sciences, pour toute recherche portant sur l'analyse du rôle des langues et des codes dans l'enseignement-apprentissage des contenus disciplinaires.

Les résultats émergeant des différentes pistes traitées permettent d'expliquer les six difficultés énoncées plus haut.

Origines des difficultés

Dans le cadre des symboles

La multiplicité des significations associées à chaque symbole de l'équation chimique (difficulté 1) s'explique par différents facteurs, principalement épistémologiques (emprunts à d'autres disciplines) et conceptuels (niveaux de savoir, niveaux de signification).

Premièrement, il apparaît que certains choix posés lors de la construction historique de l'équation de réaction sont responsables d'une partie de cette charge sémantique. En effet, la création de la langue symbolique s'est avant tout effectuée **par emprunts à d'autres systèmes sémiotiques**. Berzelius, d'abord, choisit les lettres de l'alphabet latin comme symboles de base pour son écriture symbolique. Il opère de ce fait un rapprochement entre la langue symbolique des chimistes et les langues ordinaires, jetant les bases des analogies de l'alphabet telles que nous les avons décrites au chapitre 6. Les systèmes plus originaux de Dalton ou d'Hassenfratz et Adet n'ont pas rencontré de succès auprès des chimistes, alors qu'ils présentaient l'avantage d'être de véritables inventions, sans lien concret avec d'autres systèmes sémiotiques dans d'autres

disciplines. Lavoisier, puis Berzelius, ont également choisi d'emprunter des symboles et des termes issus des mathématiques. Les signes « + » et « = », le terme « équation », le chiffre en exposant puis en indice n'arrivent donc pas vierges de sens en chimie : ils portent en eux les significations opérationnelles d'une autre discipline. La volonté d'affaiblir quelque peu cet héritage des mathématiques (en introduisant, par exemple, les flèches de réaction à la place du signe « = ») n'a pas permis d'alléger fondamentalement la charge sémantique des symboles. Tout au plus est-il possible de construire progressivement un réseau connecté de significations, en fonction des programmes et des acquis des élèves, grâce à des activités d'apprentissage développées en ce sens.

Deuxièmement, au-delà des emprunts aux autres disciplines, la chimie se caractérise par **une division de son contenu en niveaux**, formalisée dans des théories dites des « niveaux de savoir ». L'analyse critique des différentes théories proposées dans la littérature nous a amené à proposer notre propre modèle des niveaux de signification, dans lequel nous intégrons des caractéristiques propres à la discipline « chimie ». Il comporte deux niveaux de conceptualisation : macroscopique et microscopique, auxquels est susceptible de renvoyer la symbolique chimique. Par exemple, le symbole chimique « Na » véhicule l'idée d'une substance au niveau macroscopique et d'un atome au niveau microscopique, ces concepts étant eux-mêmes reliés à des objets réels. En outre, le symbole « Na » est relié à un terme de la nomenclature (ici, la désignation « sodium »). Or, cette relation n'implique pas forcément un concept : elle relie avant tout un symbole dans la langue symbolique (LS) et une désignation dans la langue ordinaire modifiée pratiquée par les chimistes (LOm). Cette relation de conversion entre systèmes sémiotiques s'ajoute aux relations entre les symboles (ou désignations) et les concepts. Toutes les significations possibles de la désignation « sodium » sont projetées sur le symbole « Na », en plus des relations que ce symbole entretient dans son propre système (ordre d'écriture, majuscule et minuscule) et avec d'autres systèmes sémiotiques (par exemple, avec les représentations iconiques microscopiques).

Ce travail d'élucidation des relations entre symboles, désignations, concepts et objets a été réalisé pour les formules chimiques (corps moléculaires et corps ioniques), ainsi que pour le signe « + », la flèche de réaction ou le coefficient stœchiométrique, en utilisant l'un ou l'autre de nos modèles d'analyse. Nous révélons ainsi des réseaux sémantiques complexes pour des symboles pourtant considérés comme moins problématiques dans de précédentes études.

Dans le cadre de l'indice et du coefficient

Les difficultés liées à l'indice et au coefficient (difficultés 2, 3 et 4) sont liées à l'ensemble des pistes envisagées : épistémologiques, conceptuelles, linguistiques et institutionnelles.

L'évolution historique de la symbolique chimique apporte un éclairage sur la difficulté des élèves à distinguer le coefficient stœchiométrique et l'indice. Les premières représentations des formules chimiques de Berzelius présentent ainsi **des traces du processus compliqué qui a mené à la distinction des deux concepts**. En effet, une écriture comme « S + 2O » (« SO_2 » dans notre système moderne) montre un usage particulier : le chiffre « 2 » indique, à l'époque de Berzelius, qu'il faut deux volumes d'oxygène (par rapport à un volume de soufre) pour former le dioxyde de soufre. Le processus d'obtention (les volumes, les substances qui entrent en réaction) est donc inscrit dans l'écriture symbolique. Il y a, dans ce cas, assimilation de l'indice et du coefficient : le volume nécessaire à l'obtention d'un corps composé est inscrit, à la manière de notre indice contemporain, dans la formule du corps composé. Ceci est particulièrement vrai pour la molécule d'eau. Dans la formule chimique « H_2O », les indices sont identiques aux coefficients stœchiométriques pour chacun des réactifs. Mais cette situation, bien entendu, ne se vérifie pas dans toutes les réactions chimiques. Dans la réaction de combustion du carbone[1], par exemple, le fait que le dioxygène soit diatomique invalide l'assimilation de l'indice de l'oxygène dans « CO_2 » au coefficient stœchiométrique du dioxygène « O_2 » chez les réactifs. Notons également que le changement de position de l'indice par Liebig (de l'exposant à l'indice, en 1834) n'est pas anecdotique : il rend compte de la volonté de renforcer une signification chimique de l'indice au détriment d'une signification mathématique véhiculée par la position en exposant**.**

Les significations du coefficient stœchiométrique ont également varié au fur et à mesure que d'autres concepts ont été forgés par les chimistes. D'abord défini par Berzelius comme une quantité de volume de substance qui entre en réaction, le coefficient stœchiométrique, suite à la validation officielle de la distinction entre molécule et atome en 1860, est assimilé à une proportion moléculaire entre réactifs et produits dans le processus réactionnel (ou à un nombre de molécules, signification déjà proposée par Berzelius avant 1860, puis reprise dans l'enseignement de la chimie). Au XXème siècle, suite à l'émergence du concept de « mole », le coefficient stœchiométrique prend une signification supplémentaire : il incarne une proportion molaire entre réactifs et produits (ou un nombre de moles, dans l'enseignement de la chimie). La charge sémantique du coefficient s'est donc progressivement étoffée, en intégrant différents concepts chimiques situés aux niveaux macroscopique et microscopique.

Nous avons construit un réseau de significations pour le coefficient stœchiométrique et l'indice en utilisant notre modèle des niveaux de signification. Dans ce réseau, on retrouve les significations mises en évidence dans notre analyse épistémologique (niveaux macroscopique et microscopique) et des significations « symboliques » qui ne

[1] $C + O_2 \longrightarrow CO_2$

sont pas directement connectées aux concepts chimiques. Celles-ci ont été mises en évidence grâce au test diagnostique soumis à 130 élèves de grade 11, en Fédération Wallonie-Bruxelles, à qui il était demandé d'expliquer les significations qu'ils attribuent à certains symboles présents dans une équation chimique donnée (en l'occurrence, celle de combustion du sodium). Pour préciser l'origine de ces significations symboliques, **nous avons modélisé trois « boucles » particulières**, c'est-à-dire des conversions exclusives d'une visualisation de la langue symbolique vers un signe (ou un ensemble de signes) issu d'un autre système sémiotique. Les boucles modélisent le fait que les signes employés par les élèves ne sont pas toujours reliés aux concepts chimiques. Ils sont seulement impliqués dans la conversion d'un système à un autre, se rapprochant d'un processus de traduction automatisée et entraînée. C'est le type de système sémiotique convoqué qui détermine le type de boucles :

- La boucle « symbolique » modélise la conversion exclusive d'une information symbolique en un terme de la nomenclature des substances (par exemple, « Na » vers « sodium ») ou en un autre signe simple qui définit le symbole dans la discipline (par exemple, le chiffre 4 dans « 4Na » vers la désignation « coefficient »).
- La boucle « langagière » est proche de la boucle symbolique, en ce qu'elle implique la conversion exclusive d'une information symbolique en des signes appartenant à la langue ordinaire modifiée. Cependant, dans le cas de la boucle langagière, ce sont des signes relatifs à la fonction du concept qui sont utilisés. Nous avons appelé « expression prototypique » cette combinaison de signes qui, d'une certaine manière, remplace une désignation simple (« coefficient », « indice ») par une expression décrivant une fonction exercée dans une tâche (« indique le nombre de molécules », « indique le nombre d'atomes dans la molécule »).
- La boucle « iconique » implique, quant à elle, la conversion exclusive d'une information symbolique vers une représentation iconique microscopique. Par exemple, une formule chimique comme « H_2O » peut être convertie en la représentation iconique d'une molécule d'eau selon Lewis (H-O-H). Certains élèves peuvent réaliser cet exercice sans pour autant comprendre les concepts chimiques sous-jacents : électrons périphériques, valence, liaisons covalentes, etc.

Dans le cas du coefficient stœchiométrique et de l'indice, nous avons déterminé et modélisé des boucles symbolique et langagière[2].

[2] La boucle iconique ne s'applique pas directement au coefficient et à l'indice. Un lien indirect est possible si l'on se focalise sur le nombre d'entités représentées. Un coefficient « 2 » est traduit par

Ces boucles sont sans doute **mises en place et renforcées par des prescrits programmatiques**. En effet, nous avons montré, au chapitre 1, que les concepts à enseigner sont souvent associés à des tâches particulières qui font l'objet d'exercices répétés. Le coefficient stœchiométrique est ainsi défini dans le cadre de la pondération des équations chimiques, en tant que « coefficient » (boucle symbolique). Il est ensuite associé à un nombre de molécules dans les lectures littérales de l'équation chimique (boucle langagière). L'indice, lui, est défini comme un nombre d'atomes dans une molécule (boucle langagière) dans la séquence consacrée au dénombrement des symboles dans les formules chimiques. Il est même parfois abusivement assimilé à la valence de l'atome partenaire dans la molécule, lors de la construction des formules moléculaires par la méthode du chiasme. Les auteurs de programmes en FWB ont donc fait le choix de restreindre la charge sémantique des indices et coefficients à un nombre limité de significations utiles à certaines tâches particulières. Or, cette démarche peut constituer un problème si les tâches ne sont pas connectées entre elles. En l'absence de liens avec les concepts chimiques microscopique et macroscopique, le risque est grand que ces tâches de conversion ne fonctionnent qu'en vase clos, formant ainsi potentiellement les boucles symbolique, langagière et éventuellement iconique définies plus haut.

Dans le cadre de l'interprétation additive

L'interprétation additive (c'est-à-dire le fait de considérer les corps purs composés comme une juxtaposition de corps purs simples qui ont conservé leur intégrité chimique durant la réaction chimique – difficulté 5) présente des origines épistémologiques, conceptuelles et linguistiques.

Ce phénomène, tel que nous le définissons, doit, selon nous, être considéré comme une primitive phénoménologique, c'est-à-dire un raisonnement simple qui permet de construire rapidement une explication raisonnable face à un phénomène observé. **L'analyse de l'évolution historique de l'écriture symbolique appuie cette hypothèse**. En effet, on retrouve cette idée que tout ensemble complexe est constitué de plus petites entités substituables tant dans la réversibilité des processus chez les alchimistes que dans la théorie dualistique de Berzelius. Celle-ci va plus loin encore, car elle suppose que tout édifice chimique se compose de deux entités opposées, par leur signe d'électroaffinité, qui peuvent se combiner, mais aussi être séparées. L'interprétation additive est également présente en chimie organique, sous la forme de la substitution et de l'élimination de groupements particuliers dont l'intégrité n'est pas modifiée au cours du processus, comme la pièce d'un puzzle que l'on peut ajouter ou retirer à l'envi sans pour autant l'altérer.

« deux molécules » (selon la boucle langagière) et donc par la représentation iconique effective de deux molécules.

La nécessaire modification des structures des molécules qui entrent en réaction est également masquée par une série d'éléments de nature conceptuelle et linguistique qui renforcent l'interprétation additive. D'abord, l'expression de la loi de la conservation de la masse conduit potentiellement à une limitation de la transformation en jeu au cours du processus qui mène des réactifs aux produits : **la transformation des réactifs ne peut être trop importante si la masse doit être conservée** au bout du compte. L'interprétation additive fournit un compromis simple à cette dualité conceptuelle : les protagonistes s'associent en un ensemble complexe sans perdre leur intégrité, ce qui explique sans mal la conservation de la masse. Quand deux pièces d'un puzzle s'emboîtent, leur masse est évidemment conservée. Il n'est nul besoin d'envisager d'autres transformations lors du processus, au risque d'ébranler l'idée de conservation de la masse. Cet équilibre délicat se retrouve dans notre test diagnostique quand les élèves testés doivent identifier les réactifs ou les produits. Plus de 60 % des élèves intègrent le coefficient stœchiométrique dans l'identité des réactifs. Par contre, 14 % de la cohorte se prive volontairement des états de la matière et du coefficient pour se limiter aux seules formules chimiques (« Na » et « O_2 »). Mais, pour ces élèves, un nouvel écueil apparaît : sans les coefficients, les réactifs « Na » et « O_2 » ne peuvent avoir la même masse que le produit « Na_2O ». Quand il leur est demandé de préciser une différence entre réactifs et produits, ces élèves montrent une certaine cohérence en indiquant que la masse diffère entre les substances avant et après réaction chimique. On le voit : la conservation de la masse dans une réaction chimique peut concurrencer l'idée d'un réarrangement atomique plus complexe qu'une simple juxtaposition au cours de la réaction.

Par ailleurs, **l'écriture symbolique actuelle est susceptible, elle aussi, de renforcer l'interprétation additive**. La lettre « C » dans le symbole chimique du carbone est identique à la lettre « C » dans la formule chimique du gaz carbonique (« CO_2 »). Rien ne les distingue d'un point de vue sémantique : le carbone est plus que *conservé* ; il semble *inchangé* par le processus. Ce fait n'est d'ailleurs pas le fruit du hasard. Les chimistes du XIXème siècle se sont précisément emparés du système symbolique de Berzelius pour sa capacité à fonctionner comme un « outil de papier », véritable jeu de blocs virtuels permettant d'imaginer des structures à l'intérieur de la matière. Cette constance sémantique du symbole chimique, en tant que lettre emprunté à l'alphabet latin, est d'ailleurs issue de son système sémiotique originel : dans une langue naturelle, une lettre de l'alphabet ne change pas de signification d'un mot à un autre. L'écriture « CO_2 » constitue aussi un support important à l'interprétation additive : le dioxygène (« O_2 ») est collé au carbone (« C »). Une écriture telle que « OCO » rendrait compte de la nécessaire rupture de la molécule de dioxygène pour former la molécule de dioxyde de carbone, ainsi que de la structure de la molécule. Elle n'est cependant pas pratique pour désigner une composition atomique, ce qui explique sans doute que les

chimistes ne l'aient pas retenue[3]. Enfin, l'écriture de l'équation chimique peut aussi être responsable du maintien de l'interprétation additive dans l'esprit des élèves. L'écriture systématique de certaines équations de combustion de type « $C_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)}$ » ou « $S_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow SO_{2(g)}$ », avec le dioxygène inscrit en deuxième lieu, laisse entendre que les réactifs s'assemblent sans qu'une rupture de liaisons ne soit nécessaire chez les réactifs.

Dans le cadre d'une tâche de conversion

Les difficultés des élèves face à la tâche de conversion entre une information symbolique et une représentation iconique microscopique sont associées à des choix didactiques institués par les textes officiels, ainsi qu'à des origines épistémologiques, conceptuelles et linguistiques.

Nous avons observé que les représentations iconiques microscopiques ne sont apparues que très récemment dans les manuels scolaires et dans certains attendus programmatiques du cours de chimie de troisième année de l'enseignement secondaire en Belgique francophone. Or, il est fréquent d'utiliser ce type de représentations en amont et en aval de la troisième année de l'enseignement secondaire. En effet, en première année (grade 7), les élèves doivent réaliser des représentations moléculaires de corps purs et de mélanges en tenant compte des états de la matière. En cinquième année (grade 11), l'enseignement-apprentissage des liaisons chimiques et des représentations de Lewis permet de représenter plus précisément les structures des molécules et des réseaux ioniques. Entre les deux, les représentations iconiques microscopiques sont délaissées au profit d'un enseignement centré sur la symbolique chimique et son usage dans la résolution de problèmes stœchiométriques et l'élaboration d'un « organigramme » de la matière. Pour beaucoup de professeurs, l'exercice de conversion d'une écriture symbolique en une représentation iconique compacte (sans liaisons apparentes, à l'aide de boules) restait (et reste sans doute en partie) un exercice anodin, proche de tâches réalisées dans l'enseignement primaire.

Les études récentes en didactique de la chimie et nos analyses personnelles démontent cette opinion. Premièrement, **la conversion des indices, coefficients et symboles chimiques en une représentation iconique est une tâche complexe** qui nécessite la mise en œuvre de plusieurs procédures combinées. Or, ces procédures impliquent de faire le lien entre l'écriture symbolique (indice, coefficient, symbole chimique) et des concepts microscopiques chimiques (nombre de molécules, nombre d'atomes dans la molécule, proportion entre molécules). De nombreux élèves éprouvent des difficultés à réaliser un tel lien, d'une part parce que l'enseignement-apprentissage de l'écriture

[3] D'autres formules chimiques présentent un tel rappel de la structure moléculaire dans l'ordre de juxtaposition des lettres : c'est le cas de CH_3COOH ou de CH_3CH_2OH.

symbolique n'implique pas suffisamment de liens forts avec les concepts chimiques, d'autre part parce que les concepts d'atome et de molécule sont souvent confondus par les élèves à ce stade de leur apprentissage. Deuxièmement, il existe un obstacle de nature plus épistémologique à la réalisation effective de la tâche de conversion entre LS et RI[3] : **initialement, l'écriture symbolique des chimistes n'a pas été créée en connexion avec le monde microscopique**. Le système symbolique de Berzelius se veut indépendant de toute théorie sur la constitution réelle de la matière, y compris la théorie atomique. Il est par contre connecté au monde macroscopique dont il hérite des proportions de réaction mesurées expérimentalement et transcrites dans les formules chimiques. La conversion en une représentation iconique microscopique à partir d'une équation de réaction est donc réalisée a posteriori, sans que l'écriture symbolique ait été fondamentalement balisée dans ce sens. Le développement de la chimie organique et de la nécessité de représenter la structure des molécules a permis l'émergence de nouvelles notations symboliques (comme « CH_3COOH ») qui facilitent le travail de conversion. Cependant, les formules chimiques de la chimie minérale ne sont pas impliquées dans ce changement. Aujourd'hui, une écriture comme « H_2SO_4 » reste complexe à convertir en une représentation iconique microscopique, tant pour les élèves que pour les étudiants de l'enseignement supérieur[4].

Création de dispositifs didactiques originaux

L'analyse approfondie de l'origine de ces difficultés nous a conduit à créer une séquence de leçons et une séance de remédiation susceptibles de lever ou d'éviter certains obstacles, sans pour autant tenter de traiter la totalité des difficultés relevées. Le test in situ de ces dispositifs didactiques et l'analyse a posteriori des comportements des élèves ont permis de répondre à notre deuxième question de recherche : « Dans quelle mesure un dispositif didactique (séquence de leçons, séance de remédiation) est-il capable de lever certaines difficultés rencontrées par les apprenants face à l'interprétation et la construction de l'écriture symbolique des chimistes ? »

Construction de la séquence de leçons

Pour construire notre séquence de leçons, nous avons choisi de travailler selon trois axes :

- un apprentissage linguistique progressif de la langue symbolique des chimistes ;

[4] Une écriture comme « $SO_2(OH)_2$ » faciliterait sans doute la conversion en une représentation iconique microscopique, mais cette notation ne traduit pas le groupement sulfate et la capacité des acides à libérer un proton. L'écriture symbolique idéale n'existe que dans les rêves des didacticiens.

- une circulation entre niveaux de signification macroscopique, microscopique et symbolique ;
- une sélection de significations prioritaires à favoriser ou à défavoriser au cours de la séquence de leçons et la séance de remédiation. Ces significations prioritaires concernent les réactifs et les produits, le signe « + », la flèche de réaction, le coefficient stœchiométrique et le processus réactionnel.

Pour mettre en œuvre ces principes, nous avons imaginé une séquence s'étalant sur trois périodes de cours (50 minutes) et se déroulant systématiquement selon trois phases : une phase d'action (observations au niveau macroscopique – exploration du niveau microscopique), une phase de formulation (proposition d'une symbolique) et une phase de vérification (confrontation et institutionnalisation). L'originalité de la démarche réside dans l'utilisation de modèles compacts tridimensionnels en bois dissimulés dans des sacs opaques, et accessibles uniquement en aveugle pour les élèves. Un post-test soumis en fin de séquence a permis de sonder les significations que les élèves de notre cohorte attribuent aux symboles de l'équation chimique, et donc de l'effet de la séquence.

Le test in situ de la séquence de leçons a été réalisé en 2012 auprès de cinq classes de troisième année de l'enseignement général (110 élèves), puis en 2013 auprès de trois classes de troisième année de l'enseignement général (54 élèves) avec une séquence de leçons légèrement modifiée suite au test de 2012. Les deux tests ont été réalisés dans le même établissement scolaire.

Analyses a posteriori – validation interne

Tant en 2012 qu'en 2013, la séquence de leçons et la séance de remédiation ont respecté les contraintes imposées par notre professeur collaborant : durée limitée, matériel simple, maintien d'un bon climat de classe. Nos dispositifs didactiques sont donc validés du point de vue de leur ancrage concret, sur le terrain. **Mais ont-ils montré leur pertinence ?**

La circulation effective, dans notre séquence de leçons, entre niveaux de signification macroscopique, microscopique et symbolique n'a pas permis de construire un réseau de significations équilibré dans l'esprit de tous les élèves. Certaines significations de niveaux microscopique et symbolique sont plus fréquentes, au détriment de significations particulières.

L'enseignement-apprentissage progressif de la langue symbolique a été vérifié temporellement : les trois périodes ont graduellement abordé l'introduction des symboles principaux, le coefficient stœchiométrique et, enfin, la pondération des équations chimiques. Cependant, deux tâches semblent toujours poser de sérieux problèmes : la conversion d'une représentation iconique microscopique en une écriture

symbolique, et l'opération réciproque. Si les codes de la langue symbolique chimique sont bien intégrés (symboles chimiques, place de l'indice), tel n'est pas le cas de la connexion entre celle-ci et les autres systèmes sémiotiques.

Concernant le chantier des significations à favoriser ou à défavoriser, là aussi, le résultat est mitigé. Nous pouvons cependant relever au moins trois points forts qui nourrissent la validation interne de la séquence :

- Certaines significations pertinentes ont été renforcées : le « + » en tant que mise en contact et la flèche en tant que « réagissent pour former ». Ces deux significations ont la particularité de concurrencer efficacement des significations de nature plus mathématique.
- Le réseau sémantique construit par les élèves autour du coefficient stœchiométrique est complexe (même s'il est déséquilibré) : dans le post-test soumis après la séquence de leçons, il est souvent constitué d'au moins deux significations. Il nous semble important que les élèves disposent d'un éventail de significations pertinentes qu'ils pourront sélectionner en fonction du contexte. Une hiérarchie est mise en évidence par le post-test de 2013 avec une proposition de significations primaires, secondaires et tertiaires.
- Certaines confusions sont peu fréquentes : la flèche avec le signe « = » (11 % de la cohorte de 2012 ; 20 % de la cohorte de 2013[5]) ainsi que les termes « indice » et « coefficient » (entre 6 et 16 % des élèves selon la cohorte).

A contrario, cinq obstacles ne semblent pas affaiblis par notre séquence de leçons :

- Si les réactifs et les produits sont correctement positionnés par les élèves dans une équation chimique, la description de leurs points communs et de leurs différences constitue un problème pour la plupart d'entre eux, en particulier la question de la conservation (ou non) du nombre d'atomes chez les réactifs et chez les produits.
- Le « + » en tant qu'addition reste un choix de signification très fréquent (36 % de la cohorte globale de 2012) et très stable (entre 30 et 39 % selon les classes en 2012). La signification « mise en contact » vient donc enrichir la charge sémantique du signe « + » sans inhiber le recours à la signification mathématique. Il est à noter que, dans notre échantillon, celle-ci est surtout favorisée par les élèves en sciences de base.
- Pour 41 % des élèves, dans les tests de 2012 et 2013, la flèche de réaction indique les produits. Cette signification « courante » de la flèche s'additionne

[5] Cette fréquence à la hausse est à relativiser. D'une part, le post-test de 2013 favorise les combinaisons de réponses, qui augmentent les fréquences relatives de la quasi-totalité des items. D'autre part, si l'on se focalise sur les premiers choix des élèves, l'item associé à l'assimilation de la flèche au signe « = » n'est coché que par un seul élève (sur 54).

donc aux significations chimiques sans pour autant les concurrencer réellement. Son impact sur les conceptions des élèves semble en effet limité.

- La confusion entre atome et molécule reste fréquente : l'écriture « 4Na » indique 4 molécules de Na pour 41 % de la cohorte de 2012, et pour 56 % de la cohorte de 2013. En comparaison, 40 % des élèves en moyenne sur les deux années choisissent l'item « nombre d'atomes de Na ». La confusion est bien réelle mais elle n'amène pas forcément de difficultés dans la tâche de conversion entre systèmes sémiotiques. En effet, même si les élèves de l'option « sciences générales » sont plus nombreux (en termes de fréquence), dans cette question, à confondre atome et molécule, ils sont pourtant plus performants dans la tâche de conversion d'une écriture symbolique en une représentation iconique microscopique. Or, cette tâche implique la mise en œuvre de la distinction entre atome et molécule, entre indice et coefficient. Il s'agit donc d'être prudent : un diagnostic fiable doit se baser sur plusieurs tests croisés.
- Le processus réactionnel reste une énigme pour une grande majorité d'élèves. On relève ainsi l'emploi très fréquent de « mots-refuges » (les réactifs réagissent, se transforment, se mélangent) et de termes issus d'une autre partie du cours de chimie (les réactifs fusionnent, se dissolvent). Plus encore, pour certains élèves, la réaction chimique semble n'être qu'une formation de liaisons entre réactifs, sans rupture préalable des liaisons initiales.

L'analyse a posteriori de la séquence de leçons nous amène à des jugements contrastés. Les champs de significations entourant les symboles de l'équation chimique sont enrichis et hiérarchisés, mais ils sont aussi déséquilibrés en faveur de l'un ou l'autre niveau. Les règles de la langue symbolique des chimistes sont globalement assimilées, mais elles sont difficilement reliées aux concepts et aux autres systèmes sémiotiques. Certaines confusions sont affaiblies, mais d'autres sont stabilisées, voire renforcées par notre volonté d'enrichir les significations des symboles. Devant ces constats, il était nécessaire d'approfondir la tâche de conversion entre langue symbolique et registre iconique microscopique, qui nous a paru centrale dans l'intégration des concepts chimiques aux symboles de l'équation de réaction.

Construction d'une séance de remédiation

En 2013, nous avons ajouté une séance de remédiation de 40 minutes ayant pour but d'augmenter les performances des élèves dans une tâche de conversion (réciproque) de la langue symbolique chimique vers les représentations iconiques microscopiques. Cette séance est conçue comme un parcours personnalisé. Le parcours est délimité en fonction des types d'erreurs de représentation iconique commises par les élèves lors du

premier post-test, soumis à la fin de la séquence de leçons. Il est constitué d'exercices ciblés à résoudre dans un ordre donné.

Six types d'erreurs ont été recensés : représentation du corps pur composé en corps purs simples séparés (produit de l'interprétation additive), non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient stœchiométrique, non-utilisation de l'indice, agrégation des réactifs et/ou des produits, éclatement des réactifs et/ou des produits, représentation d'une autre réaction chimique. Nous avons également relevé quatre types de représentations iconiques correctes en fonction de la position des atomes constitutifs (linéaire, à plusieurs accroches, dispersé, alterné). Ces quatre types de représentation peuvent être associés à des représentations différentes de la réaction chimique, et donc constituer les bases d'un « tableau de progrès » (voir, plus loin, nos perspectives). **Mais notre séance de remédiation a-t-elle montré sa pertinence ?**

En l'espace de 40 minutes, nous avons engrangé des résultats très encourageants :

- Le taux de représentations iconiques correctes est passé de 37 % (post-test n°1) à 65 % (post-test n°2) ; en parallèle, le taux de représentations totalement incorrectes[6] tombe de 31 % à 4 %.
- L'effet est très marqué chez les élèves en sciences de base dont le taux de représentations correctes passe de 22 % à 53 %, quand le taux de représentations totalement incorrectes baisse de 44 % à 5 %.

Un type d'erreur de représentation iconique reste pourtant fréquent : l'erreur de type 1, relative à l'interprétation additive, affiche une occurrence de 15 % (8 élèves sur 55) lors du deuxième post-test, quelle que soit l'option. Ce type de représentation est même parfois généré alors que l'élève ne l'avait pas proposé lors du premier post-test, ce qui laisse entendre que l'interprétation additive agit bien comme un raisonnement primitif, difficile à inhiber et susceptible d'être mobilisé lors d'une tâche.

Bref, dans ce travail au long cours, nous avons tenté de conjuguer les analyses approfondies des sources de certaines difficultés rencontrées par les élèves, en abordant tant le point de vue théorique (analyses épistémologique, linguistique, conceptuelle et institutionnelle) que celui de la recherche in situ (construction, développement, test et évaluation de dispositifs didactiques). Les conclusions proposées ci-avant amènent logiquement des perspectives diverses et des implications importantes dans le champ de la recherche en didactique de la chimie, mais également dans le champ des formations initiales et continuées.

[6] Ni les réactifs ni les produits ne sont correctement représentés.

Perspectives

Une thèse n'est qu'une photographie, un instantané d'un travail de recherche à un moment donné de l'évolution d'un domaine. Il va de soi que tous les points de vue, toutes les facettes, toutes les pistes n'ont pas été abordés dans cet ouvrage. Les perspectives qui sont précisées ici ne sont pas exhaustives, mais elles sont liées à nos propres intérêts de chercheur et d'enseignant.

1) Des tableaux de progrès

La différenciation pédagogique est l'un des défis de l'enseignement du XXIème siècle. Comment, en effet, intégrer la nécessaire prise en compte de la diversité des profils et des parcours d'apprentissage des élèves, et un enseignement de masse tel que celui pratiqué dans la plupart des pays occidentaux ? Des méthodes pédagogiques comme la mise en place de « tableaux de progrès » fournissent des pistes de réflexion concrètes. Un tableau de progrès est une succession de tâches de complexité croissante, rendant compte de la maîtrise de savoir-faire et/ou de compétences et qui permet aux élèves de s'auto-évaluer, mais aussi à l'enseignant de juger de la progression des élèves dans sa classe. Le professeur peut dès lors adapter son enseignement en proposant des remédiations ciblées à un groupe d'élèves, ou un renforcement à un autre groupe d'élèves. Des tutorats entre pairs sont également envisageables sur cette base.

Notre étude a permis de mettre au jour une série de progressions, certaines étant plus théoriques, d'autres ayant été testées sur le terrain. Nous relevons ici quatre pistes intéressantes :

- Le premier tableau de progrès est une application directe de notre séance de remédiation. En effet, la tâche de conversion d'une écriture symbolique en une représentation iconique microscopique peut être travaillée de manière progressive (voir figure 1 pour une proposition concrète) : les élèves se focalisent, par étapes, sur le traitement de l'indice dans un corps pur simple, puis dans un corps pur composé ; ils poursuivent par l'interprétation du coefficient

stœchiométrique pour différents corps purs, et concluent par la représentation de réactifs, de produits et d'une équation complète.

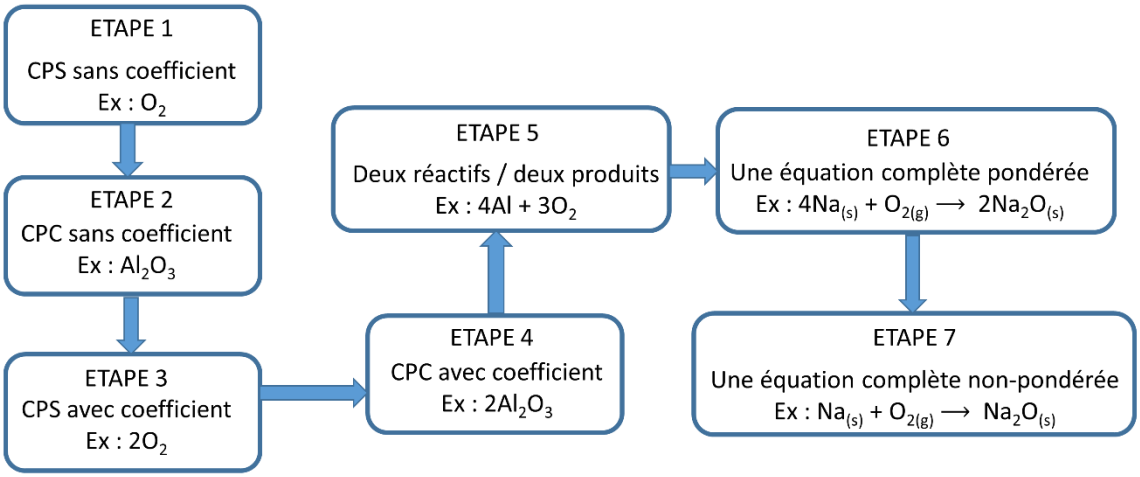


Figure 1. Tableau de progrès pour la tâche de conversion d'une écriture symbolique en une représentation iconique microscopique.

- Le deuxième tableau de progrès implique l'interprétation du coefficient stœchiométrique hors et en contexte. Il s'agirait de débuter par des cas simples pour lesquels l'énoncé indique explicitement la signification à appliquer (pondération d'une équation chimique avec définition du coefficient associée, représentation iconique microscopique de type mono-particulaire, représentation iconique microscopique de type multi-particulaire, résolution numérique d'un problème stœchiométrique avec quantité de matière). Ensuite, une tâche contextualisée permettrait de juger si les élèves sont capables de sélectionner la signification pertinente dans le contexte donné.
- Le troisième tableau de progrès serait centré sur l'évolution des conceptions du mécanisme de la réaction chimique, liée aux types de représentations microscopiques iconiques correctes que nous avons proposés (linéaire, à double accroche, dispersé et alterné). Dans le cas de la formation de l'oxyde d'aluminium, il serait possible de partir de l'interprétation additive, avec respect de l'ordre d'écriture des symboles dans la formule chimique (représentation linéaire). Ensuite, la représentation à plusieurs accroches se détache de la trame stricte de la formule chimique, tout en étant toujours un produit de l'interprétation additive. La représentation dispersée, qui implique une rupture de liaisons chez au moins un des deux réactifs et qui se distancie nettement de l'interprétation additive, constitue la troisième étape du tableau. Enfin, la représentation alternée ajoute la recherche de symétrie et la nécessité de rupture de liaisons chez les réactifs. Les élèves seraient soumis à un premier test, dont l'auto-évaluation donne la position sur le tableau de progrès. Par confrontation

avec les autres membres de la classe, les élèves doivent justifier leur premier choix et, au mieux, faire avancer leurs représentations sur la réaction chimique, ainsi que sur la manière dont les atomes s'agencent dans les molécules (figure 2). Il est bien entendu encore plus pertinent d'utiliser des corps moléculaires comme « N_2O_3 » dans ce type de tableau de progrès.

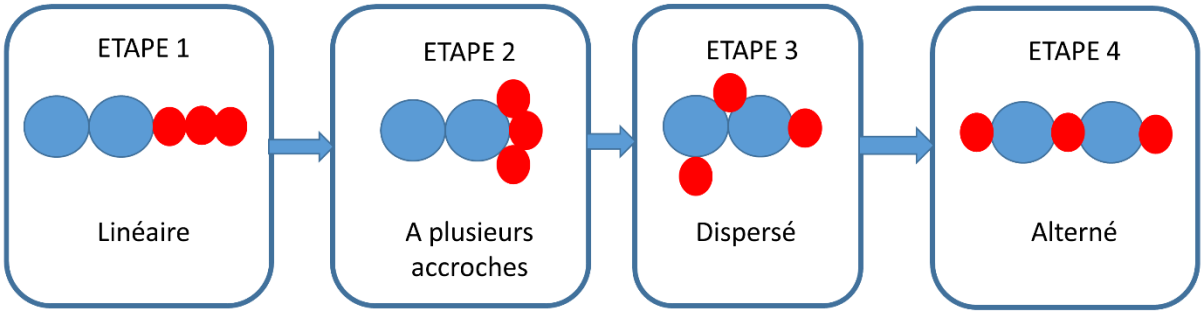


Figure 2. Tableau de progrès pour les types de représentations iconiques microscopiques de l'oxyde d'aluminium en fonction des représentations du mécanisme de la réaction chimique

- Le quatrième tableau de progrès serait lié à l'identification des réactifs et des produits. Comme nous l'avons montré au chapitre 7, les élèves s'inscrivent dans un processus de sélection-conversion, allant du recopiage intégral des symboles à gauche de la flèche (pour les réactifs) jusqu'à la conversion totale des informations symboliques (LS) dans la langue ordinaire modifiée (LOm). Les différents moments du processus peuvent constituer autant d'étapes dans un tableau de progrès suivant le même type de démarche qu'énoncé plus haut. Débutant par un test diagnostique initial, les élèves feraient évoluer leurs représentations au gré de débats socio-cognitifs, entre élèves ou entre les élèves et le professeur.

Ces tableaux de progrès peuvent être insérés dans une ingénierie didactique visant à estimer s'ils aident effectivement à rendre l'élève plus autonome dans son apprentissage, et à permettre aux professeurs de différencier leur enseignement en fonction du progrès de chacun de leurs élèves.

2) Forces et effets des boucles

La mise en évidence théorique des boucles symbolique, iconique et langagière constitue l'un des résultats majeurs de notre étude. Nos modélisations sont corroborées par les tests in situ : les boucles symbolique et langagière s'appliquent à une grande partie des signes de l'équation chimique. Cependant, nous sommes limités par la méthodologie de notre recherche. Le recours à des questionnaires écrits (parfois même à choix multiples) ne permet pas de sonder la force ou la fragilité des boucles. Il serait intéressant de réaliser une étude de cas, avec entretiens dirigés, pour jauger la capacité des élèves à

quitter une boucle et à accéder à des concepts chimiques véhiculés par les signes de l'équation de réaction. De plus, nous n'avons démontré l'impact des boucles que de manière superficielle. Même la traduction automatique du coefficient en un nombre de molécules (boucle langagière) peut être considéré comme efficace dans le cadre d'une démarche de pondération d'équations chimiques. Il s'agirait donc de vérifier si ces boucles constituent des freins à l'apprentissage ou si elles ne sont finalement que le produit d'un réseau sémantique en construction : les boucles sont-elles la conséquence temporaire d'un enseignement-apprentissage trop centré sur des tâches répétitives ? Une plus grande variété de tâches à réaliser permet-elle aux élèves de sortir des boucles et, ainsi, de se connecter aux concepts chimiques ? Les boucles engendrent-elles des difficultés lors de la réalisation d'autres tâches pour lesquelles la désignation ou l'expression prototypique associées à un symbole ne fournissent pas les informations nécessaires à la résolution ? Autant de questions qui nécessitent des études impliquant des entretiens guidés avec des élèves choisis.

3) Affiner le profil des élèves

La question du profilage des élèves est une question délicate dans l'enseignement. Il est en effet hasardeux d'étiqueter un élève lambda en fonction de critères déterminants quant au choix d'une filière donnée. Pourtant, dans le monde de l'enseignement supérieur de plus en plus compétitif, l'orientation des jeunes, et donc la définition de leur profil, ne peut être éludée. Dans notre test de 2013, nous avons comparé les représentations et les performances d'élèves en option « sciences générales » et d'élèves en option « sciences de base ». Le point de départ de notre interrogation était la question du coefficient : il est apparu dans le test de 2012 que les élèves en option scientifique testés considéraient fréquemment le coefficient comme un nombre de molécules, et ce même dans le cas du sodium. Cette application automatique d'une fonction à toute tâche a d'ailleurs également nourri la théorisation de la boucle langagière. De plus, par rapport aux élèves en sciences de base, les élèves en sciences générales présentaient des capacités bien supérieures de conversion entre langue symbolique et représentation iconique microscopique. Ce double constat nous a surpris et interrogé. De par la petite taille de l'échantillon testé, nous ne pouvons tirer de conclusions générales de notre comparaison : des recherches ultérieures auraient à traiter, de ce fait, d'une série de questions quant à la thématique du profilage des élèves.

- Pourquoi les élèves en sciences de base éprouvent-ils autant de difficultés à convertir des informations d'un système sémiotique à un autre ? Est-ce dû à une incompréhension des règles à l'intérieur des systèmes ou à une difficulté d'interprétation des symboles ? Des entretiens semi-directifs permettraient de rendre compte de la démarche employée par les élèves en sciences de base et de la comparer au raisonnement des élèves en sciences de base.

- La capacité des élèves en option scientifique à intégrer à long terme des modèles temporaires n'est-elle pas un obstacle dans l'enseignement des sciences ? En effet, celui-ci évolue par redéfinition fréquente de concepts parfois fondamentaux (atome, molécule, réaction chimique) en fonction de l'intégration d'autres concepts (particules subatomiques, liaisons chimiques, stabilité énergétique, etc.). Il apparaîtrait alors que le changement conceptuel, impliquant l'inhibition d'une représentation précédemment assimilée, soit plus complexe à mettre en œuvre chez les élèves d'option scientifique. Tester les premières représentations mobilisées par des experts (professeurs de chimie de l'enseignement supérieur) ou par des étudiants universitaires de diverses options permettrait de juger de leur capacité à choisir le modèle le plus pertinent en fonction de la tâche présentée.
- L'hétérogénéité du groupe d'élèves en sciences de base est également à souligner. En effet, ces élèves ont choisi des options parfois très différentes, aux caractéristiques s'éloignant ou se rapprochant de l'option scientifique. En quoi, par exemple, un enseignement artistique favoriserait-il la capacité à réaliser des représentations iconiques microscopiques ? De par leur apprentissage particulier des langues, des élèves en option latine seraient-ils plus aptes à comprendre les règles sous-tendant la langue symbolique des chimistes ? De nouveau, sans générer d'impératifs, ce profilage ne peut qu'aider à identifier des tendances et à adapter les pratiques enseignantes au public-type d'une option.

4) Sonder les représentations du mécanisme de la réaction chimique

Le processus réactionnel au niveau microscopique constitue une « boîte noire » pour une majorité d'élèves de troisième année (et de cinquième année, au vu de notre test diagnostique) de l'enseignement secondaire. Cependant, la description écrite ne suffit pas à accéder aux représentations des élèves, sans nul doute plus riches que ce que le vocabulaire scientifique des apprenants ne permet d'exprimer. Il serait donc intéressant de permettre l'expression de ces représentations via un autre médium que l'écrit. Les animations de type « slowmation »[7] nous semblent, dans ce cadre, être un outil de premier choix. En effet, tant la facilité d'utilisation des applications disponibles sur le marché que l'accès courant au matériel nécessaire rendent l'utilisation du slowmation a priori aisée dans les classes. Une méthodologie possible serait de mettre à disposition d'élèves de troisième année une série d'aimants représentant des atomes avec pour consigne de générer un film court rendant compte du processus d'une réaction chimique. Celle-ci serait communiquée aux élèves via une équation chimique.

[7] Le « slowmation » est une technique consistant à faire défiler à faible vitesse une série de photos d'objets, donnant ainsi l'impression de mouvement.

L'analyse des vidéos nous permettrait, dans un premier temps, de voir si les élèves sont capables de convertir des informations symboliques en des représentations iconiques, et de sonder, dans un deuxième temps, leurs représentations de la dynamique d'une réaction chimique. Nous pourrions ainsi vérifier si l'interprétation additive influence, comme nous le pensons, le mécanisme de la réaction chimique chez certains élèves, ou si les collisions et la rupture de liaisons font partie des représentations exprimées par des élèves de cet âge. Bien entendu, une étude longitudinale couvrant des élèves de la troisième à la sixième année permettrait de juger de l'intégration des concepts appris dans les représentations de la réaction chimique.

5) Introduction d'une transposition didactique de la symbolique chimique

La symbolique chimique est finalement peu marquée par des transpositions didactiques dans l'enseignement secondaire en Belgique francophone. Mise à part l'omission de certains symboles (certaines flèches de réaction, le signe « = »), la symbolique chimique est souvent enseignée telle qu'elle est utilisée par les chimistes de laboratoire. A contrario, nous avons vu que ce sont les concepts chimiques (molécule, réaction chimique) véhiculés par ces symboles qui sont fortement modifiés lors de l'enseignement-apprentissage. Certains chercheurs en didactique n'hésitent pas à soupçonner une frilosité chez les praticiens de terrain : pourquoi ne pas ajouter un peu de souplesse dans la symbolique chimique à enseigner afin de faciliter le lien avec les concepts chimiques et avec d'autres systèmes sémiotiques ?

Par exemple, il ne serait pas insensé de juxtaposer les symboles d'une formule chimique en fonction de l'ordre d'énonciation dans la langue ordinaire modifiée utilisée dans les classes. Ainsi, en Fédération Wallonie-Bruxelles, en France ou au Québec, le « chlorure d'hydrogène » s'écrirait « ClH » ; le sulfate de calcium s'écrirait « SO_4Ca ». Autre exemple : les formules chimiques correspondant aux corps ioniques pourraient être modifiées afin de montrer explicitement la présence des ions dans le corps. Par exemple, le chlorure de sodium s'écrirait « Na^+Cl^- ». Enfin, rien n'empêcherait les professeurs d'adopter des notations temporaires (parfois observées aujourd'hui dans les classes) comme des parenthèses systématiques ou l'indication explicite de l'indice « 1 ». L'argument central des opposants à ce type de changement est que nous perdrions l'universalité de la langue symbolique. Il serait juste de préciser que ladite universalité s'écrit entre guillemets : de nombreux pays n'appliquent ni les mêmes symboles, ni les mêmes nomenclatures dans leur langue véhiculaire. D'ailleurs, l'IUPAC rencontre de grandes difficultés dans sa mission d'uniformiser les conventions au niveau international, de par la profusion d'usages langagiers divergents.

Il nous semble intéressant, à tout le moins, de tester de telles modifications et de juger sur pièces : ces transpositions de la langue symbolique permettraient-elles de lever, chez

les apprenants, certaines confusions repérées dans la littérature scientifique et dont certaines ont été abordées dans notre étude ? Dans l'affirmative, pourquoi ne pas les proposer à la communauté des chimistes dans son ensemble ? Ce ne serait pas la première fois dans l'histoire de la chimie que des modifications réalisées à des fins didactiques percolent ensuite dans le langage des chimistes experts.

6) Tester l'analogie par comparaison de situations

Notre étude des « analogies de l'alphabet » mettant en correspondance la structure de la langue française et la structure de la matière a débouché sur une proposition d'activités permettant de distinguer (plutôt que d'associer) la langue symbolique des chimistes et les graphèmes de la langue française. Nous proposons d'opérer en quatre questions, relevant :

- les différences entre la lettre de l'alphabet « C » et le symbole chimique « C », du point de vue de leurs significations (concepts véhiculés) ;
- le caractère éminemment évolutif du système symbolique en chimie, par rapport à l'ensemble des symboles en langue française ;
- les règles de combinaisons possibles en chimie (impératifs énergétiques) et en langue française (impératifs phonologiques) ;
- les règles d'écriture en chimie (règles de Berzelius, etc.) et en langue française (étymologie, règles d'orthographe).

Nous postulons qu'un développement de l'analogie de l'alphabet en adossant plutôt qu'en associant les deux systèmes graphiques permettrait aux élèves de connecter la symbolique chimique aux concepts microscopiques et macroscopiques qu'elle représente, et d'empêcher la projection de règles d'écriture en langue française dans l'usage de la langue symbolique chimique.

Implications

… pour la recherche en didactique

Nous avons forgé de nouveaux modèles (taxonomie des systèmes sémiotiques, niveaux de signification, triangle étendu de terminologie) qui pourraient être utiles aux chercheurs en didactique de la chimie, mais aussi aux chercheurs en didactique des sciences de manière générale. En effet, la symbolique chimique s'exporte, par exemple, en biologie et en physique, tout en se combinant aux systèmes sémiotiques construits à l'intérieur de ces disciplines. Nos modèles peuvent rendre compte de relations importantes et de prévoir certaines difficultés inhérentes aux sciences.

De plus, nous avons postulé l'existence de boucles symbolique, iconique et langagière. Ces boucles sont susceptibles d'expliquer certains comportements observés en classe

de chimie. De nouveau, le concept de boucle peut être remobilisé dans d'autres disciplines scolaires mettant en jeu différents systèmes sémiotiques et des tâches de conversion.

Notre classification des types de représentations iconiques (correctes ou incorrectes) est, à notre connaissance, originale. Elle peut nourrir les réflexions des chercheurs en didactique de la chimie désireux d'explorer les ressorts de l'enseignement-apprentissage des représentations iconiques microscopiques dans l'enseignement secondaire.

Nous avons clarifié les réseaux sémantiques associés à chaque symbole de l'équation chimique telle qu'elle est abordée en troisième année de l'enseignement secondaire. Ces diverses significations sont autant de repères pour de futures études sur l'interprétation de la symbolique chimique par des apprenants.

Enfin, nous émettons aussi un commentaire plus général sur le danger de la surinterprétation des données en didactique. Notre travail sur la polysémie interroge l'exploitation de questionnaires écrits : est-on sûr de ce que les apprenants ont voulu exprimer en utilisant le terme « mélange », le terme « réaction », ou en utilisant un symbole chimique comme « Na » ? L'ensemble des commentaires émis dans cette étude est à considérer à l'aune de ce risque : nous restons les témoins mi-aveugles, mi-sourds de ce que les apprenants veulent bien nous transmettre.

… pour les formateurs

Nous pensons que notre travail peut intéresser les professeurs de l'enseignement secondaire, mais aussi les formateurs de professeurs en formation initiale et en formation continuée. À sa lecture, le formateur, dans un premier temps, prendra conscience de la charge sémantique (hiérarchisée et riche) des symboles qui se développe dans l'esprit des élèves, ainsi que des concurrences d'autres significations. Notre structuration en niveaux de signification permet de faciliter la compréhension et la prédiction des réseaux sémantiques potentiels créés par les élèves. Ensuite, nous espérons qu'une double nécessité sautera aux yeux du praticien de terrain : utiliser des représentations moléculaires iconiques pour révéler des dysfonctionnements, et entraîner les élèves à la conversion entre systèmes sémiotiques, sans sombrer dans la répétition de tâches vidées de sens.

Dans un troisième temps, les professeurs jugeront du poids de l'héritage épistémologique que nos élèves doivent assumer lors de leur apprentissage de la symbolique chimique. Il est possible qu'en réaction, certains praticiens envisagent un assouplissement « didactique » de la symbolique chimique face au flou épistémologique et conceptuel qu'elle peut générer chez certains élèves.

Dans un quatrième temps, le formateur en chimie sera marqué par les conséquences parfois importantes de choix programmatiques (désyncrétisation des concepts, transposition didactique, installation de boucles). Informés, nous l'espérons, des recherches actuelles en didactique, les auteurs de programmes, responsables de la transposition didactique externe, tiendront compte de nos remarques dans leur prochaine version des prescrits en chimie.

Dans un cinquième et dernier temps, les professionnels de la différenciation des apprentissages (c'est-à-dire tout professeur) seront nourris par une série de propositions pratiques, comme l'usage de tableaux de progrès ou l'exploitation de tests diagnostiques et de séances de remédiation orientées. Depuis quelques années, nous avons d'ailleurs nous-même commencé à rendre publiques les conclusions de cette étude via des formations continuées destinées aux enseignants de l'enseignement secondaire et via la formation initiale des enseignants dont nous avons la charge au département pédagogique de Champion de la Haute École de Namur-Liège-Luxembourg.

… pour les élèves

Les élèves ne sont en réalité pas la cible de ce travail, qui n'a pas été écrit à leur attention. Ils en sont pourtant les principaux concernés, puisque notre étude répond en fait à un objectif : tenter de se mettre à leur place et d'éclairer cette « boîte noire » qu'est l'élève en apprentissage, les comprendre afin qu'ils comprennent. Nous espérons que nos conclusions auront participé à cette quête universelle.

… pour l'auteur

Soyons honnête : nous sommes en fait le principal bénéficiaire de cette recherche. En profitant d'une formation interdisciplinaire (linguistique, histoire des sciences, ingénierie didactique, menuiserie), sociale (collaboration avec des professeurs de terrain, avec nos collègues de l'unité de recherche, avec des collègues d'autres facultés) et conceptuelle (utilisation et production de modèles originaux d'analyse), nous avons considérablement développé nos compétences en tant que chercheur, mais aussi en tant que formateur d'enseignants, en tant que chimiste, et plus encore en tant que professeur de chimie.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABRAHAM M., GRZYBOWSKI E., RENNER J. & MAREK E. (1992). Understandings and misunderstandings of eighth graders of five chemistry concepts found in textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 29, n°2, p. 105–120. https://doi.org/10.1002/tea.3660290203.

ABRAHAM M, WILLIAMSON V. & WESTBROOK S. (1994). A cross-age study of the understanding of five chemistry concepts. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 31, n°2, p. 147–165. https://doi.org/10.1002/tea.3660310206.

AL-KUNIFED A., GOOD R. & WANDERSEE J. (1993). *Investigation of high school chemistry students' concepts of chemical symbol, formula and equation: students' prescientific conceptions.* (ERIC Document, ED376020).

ALVAREZ S. (2012). Chemistry: a panoply of arrows. *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 51, n°3, p. 590-600. https://doi.org/10.1002/anie.201101767.

ANDRÉ J.-P., BUSANA A. & SCOUMANNE T. (2014). *Planète physique 1*. Waterloo: Plantyn.

ARASASINGHAM R., TAAGEPERA M., POTTER F., & LONJERS S. (2004). Using knowledge space theory to assess student understanding of stoichiometry. *Journal of Chemical Education*, vol. 81, n°10, p. 1517–1523**.** http://dx.doi.org/10.1021/ed081p1517**.**

ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 9, n°3, p. 281-308.

ATKINS P. & JONES L. (1998). *Chimie – Molécules, matière, métamorphoses*. Bruxelles: De Boeck.

BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris: Vrin.

BARKE H.-D., HAZARI A. & YITBAREK S. (2009). *Misconceptions in chemistry*. Berlin: Springer-Verlag.

BARKE H.-D., HARSCH G. & SCHMID S. (2012). *Essentials of chemical education*. Berlin: Springer-Verlag.

BARLET R. & PLOUIN D. (1994). L'équation-bilan en chimie. Un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, n°18, p. 27-55. https://doi.org/10.4267/2042/8597.

BATAILLE X., MAUHORAT M.-B. & VIGNERON M. (2015). Du « bon usage » de la flèche come symbole de la transformation chimique. *L'Actualité chimique,* n°399, p. 44-49.

BAUDRILLARD J. (1976). *L'échange symbolique et la mort*. Paris: Gallimard.

BECK I.L., McKEOWN M.G. & KUCAN L. (2002). *Bringing words to life: robust vocabulary instruction.* New York: Guilford Press.

BEGUIN J. (1615). *Tyrocinium Chymicum (Les Elemens de chymie)*. France: Paris.

BENSAUDE-VINCENT B. & STENGERS I. (1995). *Histoire de la chimie.* Paris: La Découverte.

BEN-ZVI R., EYLON B.-S. & SILBERSTEIN J. (1987). Students' visualisation of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, vol. 24, n°4, p. 117–120.

BEN-ZVI R., EYLON B.-S. & SILBERSTEIN J. (1988). Theories, principles and laws. *Education in Chemistry*, vol. 25, n°3, p. 89-92.

BERGMAN T. (1785). *A dissertation on elective attraction*. London: Murray. Traduction de l'édition originale de 1775.

BERNHOLT S., FISCHER I., HEUER S., TASKIN V., MARTENS J. & PARCHMANN I. (2012). Die chemische formelsprache – (un-)vermeidbare hürden auf dem weg zu einer verständnisentwicklung? [The chemical formula language - pitfalls not only for students?]. *Chemkon*, vol. 19, n°4, p. 171-178. https://doi.org/10.1002/ckon.201210183.

BERZELIUS J.J. (1813-1814). Essay on the cause of chemical proportions, and on some circumstances relating to them: together with a short and easy method of expressing them. *Annals of philosophy*, n° 2, p. 443-454.

BERZELIUS J.J. (1818-1819). *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*. Paris: Méquignon-Marvis.

BERZELIUS J. J. (1828). Bestandtheile der galle In *Jahres-bericht über die fortschritte der physischen wissenschaften*, 2e edition, 7thvolume. Tübingen: Heinrich Laupp.

BERZELIUS J.J. (1833). Betrachtungen über die zusammensetzung der organischen atome. *Anales de physique et de chimie*, n°28, p. 617-630.

BERZELIUS J.J. (1838). *Traité de chimie (volume 2).* Belgique: Bruxelles.

BIDLAKE J.P. (1858). *Bidlake's elementary chemistry: a text-book of elementary chemistry for the use of schools and junior students*. London: Allman and Son.

BODNER G.M. (1992). Why changing the curriculum may not be enough. *Journal of chemical education*, vol. 69, n°3, p. 186-190. http://dx.doi.org/10.1021/ed069p186**.**

BRAGG L. (1943). *The history of X-ray analysis*. London: Langmans.

BROUSSEAU G. (1998). *Théorie des situations didactiques : Didactique des mathématiques 1970-1990*. Grenoble: La Pensée Sauvage.

BROUSSEAU G. (2009). *Premières notes sur l'observation des pratiques de classes.* [en ligne] disponible sur http://python.espe-bretagne.fr/visa/wp-content/uploads/brousseau_2009_1.pdf.

BRUNOLD C. (1930). *Le problème de l'affinité chimique et l'atomistique*. Paris: Masson.

BUSCHEN J., DEGOSSERIE N., RONDELET M.-C., SCHWEININGER J. & VAN SULL P. (2015a). *Essentia 3e (cahier d'activités) – Sciences de base*. Waterloo: Plantyn.

BUSCHEN J., DEGOSSERIE N., RONDELET M.-C., SCHWEININGER J. & VAN SULL P. (2015b). *Essentia 3e – Référentiel – Biologie – chimie - physique.* Waterloo: Plantyn.

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*, vol. 17, n°3, p. 452-473. http://dx.doi.org/10.1039/C6RP00023A.

CARDELLINI R. (2012). Chemistry: why the subject is difficult? *Educación química*, n°23, p. 305-310.

CARTIER D. (2012). *L'écriture du monde.* Paris: Bourin Editeur.

CHERVEL A. (1988). L'histoire des disciplines scolaires. Réflexions sur un domaine de recherche. *Histoire de l'éducation*, n°38, p. 59-119. http://dx.doi.org/10.3406/hedu.1988.1593.

CHEVALLARD Y. (1982). *Pourquoi la transposition didactique ?* Communication au Séminaire de didactique et de pédagogie des mathématiques de l'IMAG, Université scientifique et médicale de Grenoble. Paru dans les *Actes* de l'année 1981-1982, p. 167-194.

CHEVALLARD Y. (1985/1991). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné* (2e éd. Revue et augmentée). Grenoble: La Pensée sauvage (lre éd., 1985).

CHEVALLARD Y. (2009). *La notion d'ingénierie didactique, un concept à refonder*. Cours donné dans le cadre de la 15e école d'été de didactique des mathématiques, Clermont-Ferrand, 16-23 août 2009, [en ligne] disponible sur http://yves.chevallard.free.fr.

CHISS J.-L., FILIOLET J. & MAINGUENEAU D. (2015). *Introduction à la linguistique française – tome 1*. Paris: Hachette supérieur.

CHITTLEBOROUGH G. & TREAGUST D.F. (2007). The modeling ability of non-major chemistry students and their understanding of the sub-microscopic level. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 8, n°3, p. 274-292. http://dx.doi.org/10.1039/B6RP90035F.

COKELEZ A. & DUMON A. (2005). Atom and molecule: upper secondary school French student's representations in long-term memory. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 6, n°3, p. 119-135. http://dx.doi.org/10.1039/B4RP90005G.

CONDILLAC E.B. (1798). *La langue des calculs, ouvrage posthume et élémentaire imprimé sur les manuscrits autographes de l'auteur*, Librairie Sandoz et Fischbacher, Saint-Denis: Brochin. 1ère édition, Paris: Charles Houel.

CROSLAND M.P. (1959). The use of diagrams as "chemical equations" in the lecture notes of William Cullen and Joseph Black. *Annals of science*, vol. 15, n°2, p. 75-90. http://dx.doi.org/10-.1080/00033795900200088.

CRUM BROWN A. (1864). On the theory of isomeric compounds. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, vol. 23, n°3, p. 707-719.

DAGOGNET F. (1969). *Tableaux et langages de la chimie – Essai sur la représentation*. Paris: Seuil.

DALTON J. (1808). *A new system of chemical philosophy*, 2 volumes: vol. 1, part 1. Manchester: S. Russell; part 2, Manchester: Russell & Allen, 1810; vol. 2, Manchester: Executers of S. Russell, 1827.

DAVID C. (2002). *Atomes ou molécules ?* [en ligne] disponible sur http://phys.free.fr/.

DAVIDOWITZ B. & CHITTLEBOROUGH G. (2009). Linking the macroscopic and sub-microscopic levels: diagrams, dans Gilbert, John and Treagust, David (dir.), *Multiple representations in chemical education* (p.169-191). Dordrecht: Springer.

DAVIDOWITZ B., CHITTLEBOROUGH G. & MURRAY E. (2010). Student-generated submicro diagrams: A useful tool for teaching and learning chemical equations and stoichiometry. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 11, n°3, p. 154–164. http://dx.doi.org/10.1039/C005464J.

DE BECKER G., NAVEZ M. & VAN STEYVOORT C. (2015). *Experts 3 chimie sciences générales*. Waterloo: Plantyn.

DE BERG K. (2012). A study of first-year chemistry students' understanding of solution concentration at the tertiary level. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 13, n°1, p. 8-16. http://dx.doi.org/10.1039/C1RP90056K.

DE JONG O. & VAN DRIEL J. (2004). Exploring the development of student teachers' PCK of the multiple meanings of chemistry topics. *International Journal of Science and Mathematics Education*, n°2, p. 477-491. http://dx.doi.org/10.1007/s10763-004-4197-x.

DEPECKER L. (2003). *Entre signe et concept*. Paris: Presses Sorbonne Nouvelle.

DiSESSA A. (1988). Knowledge in pieces, dans Forman, George & Pufall, Peter, *Constructivism in the computer age* (p. 49-70). Hillsdale: Erlbaum.

DUBOIS J., GIACOMO M., GUESPIN L., MARCELLESI C., MARCELLISI J.-B. & MÉVEL J.-P. (2012). *Le dictionnaire de linguistique et des sciences du langage*. Paris: Larousse.

DUMAS J.-B. A. & BOULLAY P. (1827). Mémoire sur la Formation de l'Ether sulfurique. *Annales de Chimie et de Physique*, n°36, p. 294-310.

DUMON A. & MZOUGHI-KHADRAOUI I. (2014). Teaching chemical change modelling to Tunisian students: an « expended chemistry triplet » for analysing teachers' discourse. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 15, n°1, p. 70-80. http://dx.doi.org/10.1039/C3RP00126A.

DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.

EASTES R.-E. (2010). L'alphabet de la chimie. *L'actualité chimique*, n°346, p. 3-4.

ECO U. (1988). *Le signe*. Bruxelles: Éditions Labor.

EDELINE F. (2009). Les fonctions sémiotique et heuristique des symboles chimiques: ou de l'icône au symbole et retour. *Protée*, vol. 37, n° 3, p. 45-66. http://dx.doi.org/10.7202/038804ar.

FABBRIZZI L. (2008). Communicating about matter with symbols: evolving from alchemy to chemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 85, n° 11, p. 1501-1511. http://dx.doi.org/10-.1021/ed085p1501.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2000). *Programme de sciences du premier degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2000/7362/012.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2009a). *Programme de sciences de base pour le deuxième degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2009/7362/3/18.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2009b). *Programme de sciences générales pour le deuxième degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2009/7362/3/09.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2014a). *Programme de sciences de base pour le deuxième degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2014/7362/3/22.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2014b). *Programme de sciences générales pour le deuxième degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2014/7362/3/23.

FESeC - Fédération de l'enseignement secondaire catholique (2016). *Programme de sciences générales pour le troisième degré*. Humanités générales et technologiques, Enseignement catholique secondaire, Bruxelles, D/2016/7362/3/12.

FILLON P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *Aster*, n°25, p. 113-141. http://dx.doi.org/10.4267/2042/8682.

FLAUBERT G. (1881). *Bouvard et Pécuchet*. Paris: Alphonse Lemerre.

FOULON, J.-P. & BATAILLE, X. (2016). Les flèches ont-elles du sens ? *l'Actualité chimique,* n°404, p. 34-37.

FOURCROY A.–F. & VAUQUELIN L.-N. (1797). A*nnales de chimie*, n°23, p. 194-195.

FOWNES G.A. (1847). *Manual of Elementary Chemistry, Theoretical and Practical*, 7th ed.; Philadelphia: Blanchard and Lee.

FRIEDEL A.W. & MALONEY D.P. (1992). An exploratory classroom-based investigation of student's difficulties with subscripts in chemical formulas. *Science Education*, vol. 76, n°1, p. 65-78. http://dx.doi.org/10.1002/sce.3730760106.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2001a). *Compétences terminales et savoirs requis en sciences*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2001b). *Programme de chimie du deuxième degré*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, 2nde édition, Bruxelles, 58/2000/240.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2013). *Socles de compétences*. Enseignement fondamental et premier degré de l'enseignement secondaire, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2013a). *Programme d'initiation scientifique du premier degré commun*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, 2nde édition, Bruxelles, 58/2000/240.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2013b). *Socles de compétences*. Enseignement fondamental et premier degré de l'enseignement secondaire, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2014). *Compétences terminales et savoirs requis en sciences de base et en sciences générales*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Administration générale de l'Enseignement et de la Recherche scientifique, Bruxelles.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2015a). *Programme d'études provisoire – Sciences générales (deuxième degré)*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Service général de l'Enseignement organisé par la Fédération Wallonie-Bruxelles, Bruxelles, 473P/2015/240.

FWB – Ministère de la Fédération Wallonie-Bruxelles (2015b). *Programme d'études provisoire – Sciences de base (deuxième degré)*. Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice, Humanités générales et technologiques, Service général de l'Enseignement organisé par la Fédération Wallonie-Bruxelles, Bruxelles, 472P/2015/240.

GABEL D. (1993). Use of the particle nature of matter in developing conceptual understanding. *Journal of chemical education*, vol. 70, n°3, p. 193-194. http://dx.doi.org/10.1021/ed070p193.

GABEL D. (1998). The complexity of chemistry and implications for teaching, dans Fraser, Barry & Tobin, Kenneth (dir.), *International handbook of science education* (p. 233-248). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

GABEL D. (1999). Improving teaching and learning through chemistry education research: a look to the future. *Journal of chemical education*, vol. 76, n°4, p. 548-554. http://dx.doi.org/10-.1021/ed076p548.

GENTNER D. (1983). Structure-mapping: a theoretical framework for analogy. *Cognitive science*, vol. 7, n°2, p. 155-170. http://dx.doi.org/10.1207/s15516709cog0702_3.

GENTNER D., LOEWENSTEIN J. & THOMPSON L. (2003). Learning and transfer: a general role for analogical encoding. *Journal of Educational Psychology*, vol. 95, n°2, p. 393-408. http://dx.doi.org/10.1037/0022-0663.95.2.393.

GEOFFROY, E.F. (1718). Table des différents rapports observés en Chimie entre différentes substances in *Abrégé de l'histoire et des mémoires de l'académie royale des sciences*, 1770, Guenau de Montbeliard, Tome I, Paris.

GERHARDT C. (1853). Recherche sur les acides organiques anhydres. *Annales de chimie et de physique*, vol. 3, n° 37, p. 285-342.

GIBSON G. (1975). *Mastering chemistry*. Philadelphia: Saunders Company.

GICK M.L. & HOLYOAK K.J. (1980). Analogical problem solving. *Cognitive psychology*, vol. 12, n°3, p. 306-355. http://dx.doi.org/10.1016/0010-0285(80)90013-4.

GILBERT J.K. & TREAGUST D. (2009). Towards a coherent model for macro, submicro and symbolic representations in chemical education, dans Gilbert, John & Treagust, David (dir.), *Multiple representations in chemical education* (p. 1-8). Dordrecht: Springer.

GLAZAR S.A., & DEVETAK I. (2002). Secondary school students' knowledge of stoichiometry. *Acta Chimica Slovenica*, n°49, p. 43-53.

GODTS P. (2016). Clarifications conceptuelles (UAA2 – SCBCHI). In FESeC, *Espace numérique – secteurs sciences*, Enseignement Catholique [en ligne] disponible sur http://enseignement.catholique.be/fesec/secteurs/sciences/?p=4814#more-4814.

GODTS P. (2017). Clarifications conceptuelles (UAA1 – SCBCHI). In FESeC, *Espace numérique – secteurs sciences*, Enseignement Catholique [en ligne] disponible sur http://enseignement.catholique.be/fesec/secteurs/sciences/?p=1203#more-1203.

GROSHOLZ E. R. & HOFFMAN R. (2000). How symbolic and iconic languages bridge the two worlds of the chemist: a case study from contemporary bioorganic chemistry, dans Bhushan, Nalini & Rosenfeld, Stuart (dir.), *Of Minds and Molecules: New Philosophical Perspectives on Chemistry* (p. 230-247). Oxford: Oxford University Press.

GUYTON de MORVEAU L.-B., MARET H. & DUHAMEL J.-P. (1786). *Encyclopédie méthodique – chimie, pharmacie et métallurgie (tome 1)*. Paris: Panckoucke.

GUYTON de MORVEAU L.-B., LAVOISIER A.-L., BERTHOLLET, C. & de FOURCROY A.F. (1787). *Méthode de nomenclature chimique*. Paris: Cuchet.

HAÏPAM G. (2016). *Didactique de la poésie au premier cycle*. Paris: Connaissances et savoirs.

HILL J.W., PETRUCCI R.H., MCCREARY T.W. & PERRY S.S. (2008). *Chimie générale*. Québec: Editions du Renouveau Pédagogique.

HINRICHS G. (1874). *The principles of chemistry and molecular mechanics*. New York: Westermann et co.

HINTON M.E. & NAKHLEH M.B. (1999). Student's microscopic, macroscopic and symbolic representations of chemical reactions. *Chemical Educator*, vol. 4, n°5, p. 158-167. http://dx.doi.org/10.1007/s00897990325a.

HOFSTADTER D. & SANDER E. (2013). *L'analogie, cœur de la pensée.* Paris: Odile Jacob.

HOUART M. (2009). *Etude de la communication pédagogique à l'université à travers les notes et les acquis des étudiants à l'issue du cours magistral* (mémoire de thèse). Namur: PUN.

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry (2007). *Quantities, Units and Symbols in Physical Chemistry* (3rd ed), IUPAC-RSC Publishing [en ligne] www.iupac.org/fileadmin/user_upload/publications/e-resources/ONLINE-IUPAC-GB3-2ndPrinting-Online-Sep2012.pdf

IUPAC – International Union of Pure and Applied Chemistry (2014). *Compendium of Chemical Terminology-Gold Book*. Version 2.3.3. [en ligne] http://goldbook.iupac.org/pdf/goldbook.pdf

JACOB C. (2001). Analysis and synthesis. *International Journal for Philosophy of Chemistry*, n°1, p. 31-50.

JENSEN W.B. (2005). The symbolism of chemical equations. *Journal of Chemical Education*, vol. 82, n°10, p. 1461. http://dx.doi.org/10.1021/ed082p1461.

JOHNSON P. (1996). What is a substance? *Education in chemistry*, n°33, p. 41-42.

JOHNSON P. (2000). Developing students' understanding of chemical change: what should we be teaching? *Chemistry education research and practice in Europe*, vol. 1, n°1, p. 77-90. http://dx.doi.org/10.1039/A9RP90008J.

JOHNSTONE A.H. (1982). Macro- and microchemistry. [Notes and correspondence], *School Science Review*, vol. 64, n°227, p. 377-379.

JOHNSTONE A.H. (1984). New stars for the teacher to steer by? *Journal of Chemical Education*, vol. 61, n°10, p. 847-849. http://dx.doi.org/10.1021/ed061p847.

JOHNSTONE A.H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, n°7, p. 75-83. http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x.

JOHNSTONE A.H. (1993). The development of chemistry teaching: a changing response to a changing demand. *Journal of Chemical Education*, vol. 70, n°9, p. 701-705. http://dx.doi.org/10-.1021/ed070p701.

JOHNSTONE A.H. (2000). Teaching of chemistry – logical or psychological ? *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, vol. 1, n°1, p. 9-15. http://dx.doi.org/10.1039/A9RP90001B.

JOHNSTONE A.H. (2006). Chemical education research in Glasgow in perspective. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 7, n°2, p. 49-63. http://dx.doi.org/10.1039/B5RP90021B.

JOHSUA S. (1996). Le concept de transposition didactique n'est-il propre qu'au mathématiques ?, in Raisky, Claude & Caillot, Michel (dir.), *Au-delà des didactiques, le didactique. Débats autour de concepts fédérateurs* (p. 61-73). Bruxelles: De Boeck.

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*, vol. 30, n°8, p. 883-903. http://dx.doi.org/10.1002/tea.3660300807.

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*, vol. 10, n°1, p. 24-34. http://dx.doi.org/10.1039/B901457H.

KERN A.L., WOOD N.B., ROEHRIG G.H. & NYACHWAYA J. (2010). A qualitative report of the ways high school chemistry students attempt to represent a chemical reaction at the atomic/molecular level. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 11, n°3, p. 165-172. http://dx.doi.org/10-.1039/C005465H.

KHANFOUR-ARMALÉ R. & LE MARÉCHAL J.-F. (2008). Construire une catégorie grâce à une analogie : cas du concept d'élément chimique. *Didaskalia*, n°32, p. 4-41. http://dx.doi.org/-10.4267/2042/23982.

KHANFOUR-ARMALÉ R. & LE MARÉCHAL J.-F. (2009). Représentations moléculaires et registres sémiotiques. *Aster*, n°48, p. 63-88. http://dx.doi.org/10.4267/2042/30421.

KLEIN U. (2001). Paper tools in experimental cultures. *Studies in History and Philosophy of Science*, vol. 32, n°2, p. 265-302. http://dx.doi.org/10.1016/S0039-3681(01)00010-3.

KLEIN U. (2001). The creative power of paper tools in early nineteenth century chemistry dans Klein, Ursula (dir.), *Tools and Modes of Representation in the Laboratory Sciences*. Dordrecht: Kluwer academic Publishers.

KLEIN U. (2002). Berzelian formulas as paper tools in early nineteenth-century chemistry. *Foundations of chemistry*, vol. 3, p. 7-32.

KNIGHT D. (2003). Exalting understanding without depressing imagination. *HYLE*, vol. 9, n°2, p. 171-189.

KOPPENOL W.H., CORISH J., GARCIA-MARTINEZ J., MEIJA J. & REEDIJK J. (2016). How to name new chemical elements (IUPAC Recommendations 2016). *Pure and Applied Chemistry*, vol. 88, n°44, p. 401-405 [en ligne] disponible sur http://dx.doi.org/10.1515/pac-2015-0802.

LAKSHMINARAYANAN A. (2010). Arrows in chemistry. *Resonance - Journal of Science Education*, vol. 15, n°1, p. 51-63.

LARCHER C., CHOMAT A. & LINEATTE C. (1994). D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège. *Aster*, n°18, p. 119-139. http://dx.doi.org/10-.4267/2042/8602.

LASZLO P. (1993). *La parole des choses*. Paris: Hermann, éditeur des sciences et des arts.

LAUGIER A. & DUMON A. (2000). Travaux pratiques en chimie et représentation de la réaction chimique par l'équation-bilan dans les registres macroscopique et microscopique : une étude en classe de seconde (15-16 ans). *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, vol. 1, n°1, p. 61-75. http://dx.doi.org/10.1039/A9RP90007A.

LAUGIER A. & DUMON A. (2003). Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique: quelles convergences? *Didaskalia*, n°22, p. 69-97. http://dx.doi.org/10-.4267/2042/23921.

LAUGIER A. & DUMON A. (2004a). L'équation de réaction : un nœud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education Research and Practice in Europe*, vol. 5, n°1, p. 51-68. http://dx.doi.org/10.1039/B3RP90030D.

LAUGIER A. & DUMON A. (2004b). L'équation de réaction : approche historique et didactique de la modélisation de la transformation chimique. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 98, p. 1131-1144.

LAURENT A. (1848). Sur la chlorocyanilide et quelques autres anilides. *Annales de chimie et de physique*, vol. 3, n°22, p. 97-116.

LAVOISIER A.-L. (1782). Considérations générales sur la dissolution des métaux dans les acides. *Mémoires de l'Académie des sciences*. Tome X. Paris: Librairie Bachelier.

LAVOISIER A.-L. (1789). *Traité élémentaire de chimie*. Paris: Cuchet Librairie, reproduction de l'édition originale, Culture et Civilisation, Bruxelles, 1965, Librairie Blanchard, Paris.

LAZARD G. (2006). Qu'est-ce qu'une langue ? *Bulletin de la société de linguistique de Paris.* fasc. 1, p. 1-28. http://dx.doi.org/10.2143/BSL.101.1.2019820.

LE MARÉCHAL J. F. (1999). Design of chemistry labwork activities aiming at teaching basic chemical concepts, dans Méheut, Martine & Rebmann, Gérard (dir.), *Theory, Methodology and Results of Research in Science Education* (p. 68-81). 4th ESERA Summer School.

LE MARÉCHAL J. F. & BÉCU-ROBINAULT K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga. *Aster*, n°43, p. 81-108. http://dx.doi.org/10.4267/2042/16803.

LEE A. (1833). *Chemical diagrams, accompanied by a concise description of each decomposition*. Londres: Cox.

LEMKE J.L. (1998).*Teaching all the languages of science: words, symbols, images and actions.* [En ligne] disponible sur http://academic.brooklyn.cuny.edu/education/jlemke/papers/Barcelon.htm.

LERAT P. (1994) *Les langues spécialisées*. Paris: PUF.

LIEBIG J. (1834). Ueber die constitution des aethers und seiner verbindungen. *Annales de Pharmacie*, n°9, p. 1-39.

LIPPINCOTT W. (1979). Why students hate chemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 56, n°1, p. 1. http://dx.doi.org/10.1021/ed056p1.

LIU Y. & TABER S. (2016). Analysing symbolic expressions in secondary school chemistry: their functions and implications for pedagogy. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 17, n°3, p. 439-451. http://dx.doi.org/10.1039/C6RP00013D.

LOSCHMIDT J. (1861). *Chemishe Studien I*. Vienne: Carl Gerold's Sohn.

MARAIS F. & COMBRICK S. (2009). Approach to dealing with the difficulties undergraduate chemistry students experience with stoichiometry. *South African Journal of Chemistry*, n°62, p. 88-96.

MARAIS P. & JORDAAN F. (2000). Are we taking symbolic language for granted? *Journal of Chemical Education*, vol. 77, n°10, p. 1355–1357. http://dx.doi.org/10.1021/ed077p1355.

MARKIC S. & CHILDS P. (2016). Language and the teaching and learning of chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 17, n°3, p. 434-438. http://dx.doi.org/10.1039/C6RP90006B.

MARKOW P.G. (1988). Teaching chemistry like the foreign language it is. *Journal of chemical education*, vol. 65, n°4, p. 346-347. http://dx.doi.org/10.1021/ed065p346.

MARSHALL H. (1902). Vorschlag, betreffend den gebrauch modifizierter gleichheitszeichen in der chemischen zeichensprache (« Proposition relative à l'utilisation du signe égal modifié dans la langue des signes chimiques »). *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 1902, vol. 41, n°1, p. 103-107. http://dx.doi.org/10.1515/zpch-1902-4113.

MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne: Peter Lang.

MARTINAND J.-L. (1996). Introduction à la modélisation. *Actes du séminaire des didactiques des disciplines technologiques*. Cachan 1994-1995, p. 126-138.

MARTINAND J.-L. (2002) Apprendre à modéliser, dans Toussaint, Rodolphe (dir.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences: recherches et pratiques* (p. 47-68). Outremont: Logiques.

MATTHYS N., FEYS M. & SUYS B. (2011). *Sciences 3e – Sciences de base.* Bruxelles: De Boeck.

McQUARRIE C., McQUARRIE D. & ROCK P. (1992). *Chimie générale*. Bruxelles: De Boeck.

MÉLOT L. & AZAZ S. (2016). *Experts 1ère année Biologie/Physique*. Waterloo: Plantyn.

MENDELEIEV D. (1871). La loi périodique des éléments chimiques, trad. franç. *Le moniteur scientifique*, 1879, n°21, p. 691-737.

MERTEN (de) P. (2013). *Dictionnaire de chimie.* Louvain-La-Neuve: De Boeck.

MESSAOUDI L. (2010). Langue spécialisée ou technolecte : quelles relations ? *Méta : journal des traducteurs*, n°55, p. 127-135.

MESTRALLET R. (1980). *Communication, linguistique et sémiologie : contribution à l'étude de la sémiologie, étude sémiologique des signes de la chimie*. Universitat Autonoma de Barcelona, 2 vol.

MULFORD D.R. & ROBINSON W.R. (2002). An inventory for alternate conceptions among first-semester general chemistry students. *Journal of Chemical Education*, vol. 79, n°6, p. 739-744. http://dx.doi.org/10.1021/ed079p739.

MZOUGHI-KHADRAOUI I., DUMON A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en didactiques des sciences et des technologies*, n°6, p. 89-118. http://dx.doi.org/10.4000/rdst.107.

NAKHLEH M.B. & KRAJCIK J.S. (1994). Influence of levels of information as presented by different technologies on students' understanding of acid, base, and pH concepts. *Journal of research in science teaching*, vol. 31, n°10, p. 1077-1096. http://dx.doi.org/10.1002/tea.3660311004.

NEMETH J.M. (2006). Translating a linguistic understanding of chemistry to outcome achievement and interdisciplinary relevance in the introductory classroom. *Journal of Chemical Education*, vol. 83, n°4, p. 592-594. http://dx.doi.org/10.1021/ed083p592.

NURRENBERN S. & PICKERING M. (1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n°6, p. 508-510. http://dx.doi.org/10-.1021/ed064p508.

PAUN E. (2006). Transposition didactique: un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l'éducation*, vol. 22, n°2, p. 3-13. http://dx.doi.org/10.3917/cdle.022.0003.

PEIRCE C.S. (1978). *Écrits sur le signe* (trad. G. Deledalle). Paris: Le Seuil.

PERRENOUD P. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques: des savoirs aux compétences. *Revue des sciences de l'éducation*, vol. 24, n°3, p. 487-514. http://dx.doi.org/10-.7202/031969ar.

PIRSON P., BORDET H., CASTIN D. & SNAUWAERT P. (2009). *Chimie 3e/4e*. Louvain-La-Neuve: De Boeck.

PIRSON P., BORDET H., CASTIN D. & SNAUWAERT P. (2015). *Chimie 3e*. Louvain-La-Neuve: De Boeck.

PODOLEFSKY N.S. & FINKELSTEIN N.D. (2006). Use of analogy in learning physics: the role of representations. *Physical Review special topics – Physics Education Research*, vol. 2, n°2, p. 1-10. http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.2.020101.

PRIÉTO L.J. (1968). La sémiologie, dans Martinet, André (dir.), *Le langage* (p. 93-144). Paris: Gallimard.

PYBURN D., PAZICNI S., BENASSI V. & TAPPIN E. (2013). Assessing the relation between language comprehension and performance in general chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 14, n°4, p. 524-541. http://dx.doi.org/10.1039/C3RP00014A.

REUTER Y., COHEN-AZRIA C., DAUNAY B., DELCAMBRE I. & LAHANIER-REUTER D. (2013). *Dictionnaire des concepts fondamentaux des didactiques (3ème édition)*. Bruxelles: De Boeck.

ROUNDY W.H. (1989). What is an element? *Journal of chemical education*, vol. 66, n°9, p. 729-730. http://dx.doi.org/10.1021/ed066p729.

SANDER E. (2000). *L'analogie, du naïf au créatif*. Paris: L'Harmattan.

SANGER M. (2000). Using particulate drawings to determine and improve students' conceptions of pure substances and mixtures. *Journal of Chemical Education*, vol. 77, n°6, p. 762-766. http://dx.doi.org/10.1021/ed077p762.

SANGER M. (2005). Evaluating students' conceptual understanding of balanced equations and stoichiometric ratios using a particulate drawing. *Journal of Chemical Education*, vol. 82, n°1, p. 131-134. http://dx.doi.org/10.1021/ed082p131.

SAUSSURE (de) F. (1915). *Cours de linguistique générale*. Paris: Payot.

SAVOY L.G. & STEEPLES B. (1994). Concept hierarchies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, n°75, p. 97-103.

SAWREY B.A. (1990). Concept learning versus problem solving: Revisited. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n°3, p. 253-254. http://dx.doi.org/10.1021/ed067p253.

SIOUFFI G. & VAN RAEMDOCK D. (2012). *100 fiches pour comprendre la linguistique*. Paris: Bréal.

SMITH K.J. & METZ P.A. (1996). Evaluating student understanding of solution chemistry through microscopic representations. *Journal of Chemical Education*, vol. 73, n°3, p. 233-235. http://dx.doi.org/10.1021/ed073p233.

SNOW C. (2008). What is the vocabulary of science? dans Rosbery, Ann & Beth, Warren, (dir.), *Teaching science to english language learners: building on students' strengths* (p. 71-83). Arlington,VA: National Science Teachers Association.

SONG Y. & CARHEDEN S. (2014). Dual meaning vocabulary (DMV) words in learning chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 15, n°2, p. 128-141. http://dx.doi.org/10-.1039/C3RP00128H.

STRAUSS M. (1986). Symbolism, science and developing minds. *Journal of College Science Teaching*, n°15, p. 190-195.

TABER K.S. & COLL R. (2002). Bonding dans Gilbert, John, de Jong, Onno, Justi, Rosaria, Treagust, David & van Driel, Jan (dir.), *Chemical Education: Towards Research-based Practice* (p. 213-234). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

TABER K.S. (2009). Learning at the symbolic level, dans Gilbert, John & Treagust, David (dir.), *Multiple representation in chemical education* (p. 75-108). Dordrecht: Springer.

TABER K.S. & GARCIA-FRANCO A. (2010). Learning processes in chemistry: drawing upon cognitive resources to learn about the particulate structure of matter. *The Journal of the Learning Sciences*, vol. 19, n°1, p. 99-142.

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*, vol. 14, n°2, p. 156-168. http://dx.doi.org/10.1039/C3RP00012E.

TABER K.S. (2015). Exploring the language(s) of chemical education. *Chemistry Education Research and Practice*, vol. 16, n°2, p. 193-197. http://dx.doi.org/10.1039/C5RP90003D.

TALANQUER, V. (2011). Macro, submicro, and symbolic: the many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, vol. 33, n°2, p. 179-195. http://dx.doi.org/10-.1080/09500690903386435.

TASKIN V. & BERNHOLT S. (2014). Students' understanding of chemical formulae: a review of empirical research. *International Journal of Science Education*, vol. 36, n°1, p. 157-185. http://dx.doi.org/10.1080/09500693.2012.744492.

THÉNARD L. J. (1827). *Traité de Chimie élémentaire, théorique et pratique*, 5ème édition, vol.II. Paris: Crochard.

THIMS L. (2007). *Human Chemistry (volume two).* Morrisville: Lulu.

TIBERGHIEN A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, vol. 22, n°6, p. 423-444. http://dx.doi.org/10-.1007/BF00897977.

TIBERGHIEN A. & VINCE J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, n°10, p. 153-176.

TREAGUST D.F., CHITTLEBOROUGH G.D. & MAMIALA T.L. (2003). The role of sub-microscopic and symbolic representations in chemical explanations. *International Journal of Science Education*, vol. 25, n°11, p. 1353-1369. http://dx.doi.org/10.1080/0950069032000070306.

TRO N.J. (2015). *Principes de chimie – une approche moléculaire.* Montreuil: Pearson France.

VANT'HOFF M.J.H. (1884). *Étude de dynamique chimique*. Amsterdam: Muller.

VENEL, G.-F. (1753). Article « Chimie », dans *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers (tome III).* Paris: Briasson, David, Le Breton, Durand.

VERRET M. (1975). *Le temps des études*. Paris: Honoré Champion.

WALTER G. (1984). Analogies de méthodes entre la linguistique et la chimie. *La linguistique,* n°20, p. 23-40.

WELLINGTON J. (2000). *Teaching and learning secondary science: contemporary issues and practical approaches*. New York: Routledge.

WELLINGTON J. & OSBORNE J. (2001). *Language and literacy in science education*. Philadelphia, PA: Open University Press.

WOOD C. & BREYFOGLE B. (2006). Interactive demonstrations for mole ratios and limiting reagents. *Journal of Chemical Education*, vol. 83, n°5, p. 741. http://dx.doi.org/10.1021/ed083p741.

WOUTERS J. (2014). *Concentré de chimie.* Namur: PUN.

YARROCH W.L. (1985). Students' understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching,* vol. 22, n°5, p. 449-459. http://dx.doi.org/10.1002/tea.3660220507.

ZALI A. & BERTHIER A. (sous la direction de) (1997). *L'aventure des écritures. Naissances.* Paris: BNF.

Publications de l'auteur

DEHON J. & SNAUWAERT P. (2011). *Vers une nouvelle approche de l'apprentissage de l'équation de réaction*, communication présentée aux deuxièmes journées d'étude S-TEAM, Grenoble. [En ligne] disponible sur https://pure.fundp.ac.be/ws/portalfiles/portal/13256633.

DEHON J. & SNAUWAERT P. (2014). *Représenter une équation de réaction au niveau moléculaire : un exercice trop complexe* ? 8es rencontres scientifiques de l'Ardist (Marseille, 12-13-14 mars 2014), Marseille: ESPE de l'Université d'Aix-Marseille (Éd.), Skholê, vol. 18, n° 1, p. 153-162.

DEHON J. & SNAUWAERT P. (2015a). L'équation de réaction : une équation à plusieurs inconnues – Étude de productions d'élèves de 16-17 ans en Belgique francophone. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, n° 12, p. 209-235. http://dx.doi.org/10.4000/rdst.1174.

DEHON J. & SNAUWAERT P. (2015b). Quelle est la place de l'équation de réaction dans les théories des niveaux de savoir en chimie ? dans Evrard, Thierry & Amory, Brigitte (dir.), *Les modèles : des incontournables pour enseigner les sciences !* (p. 177-192). Bruxelles: De Boeck.

DEHON J. & SNAUWAERT P. (2018). L'analogie entre la langue française et la chimie: analyse linguistique et didactique. *Éducation et didactique*. Article accepté le 10 février 2017.

-ANNEXES-

TABLES DES ANNEXES

ANNEXE A : Présentations de quelques scientifiques cités dans le chapitre 5……..412

ANNEXE B : Test diagnostique pour les élèves de grade 11……..414

ANNEXE C : Résultats du test diagnostique (5ème) – tableaux de données……..... 415

ANNEXE D : Séquence de leçons – version de l'élève……...455

ANNEXE E : Séquence de leçons – version du professeur……468

ANNEXE F : Post-test n°1 de 2012……... 485

ANNEXE G : Résultats du post-test en 2012 et en 2013 – tableaux de données……487

ANNEXE H : Séance d'exercices de remédiation……. 556

ANNEXE I : Post-test n°2 de 2013 (représentation iconique)…….....559

ANNEXE J : Post-test n°1 de 2013……... 560

ANNEXE A

Présentations de quelques scientifiques cités dans le chapitre 5

ADET Pierre-Auguste (1763-1834), diplomate et scientifique français.

BEGUIN Jean (1550-1620), apothicaire et chimiste français, est considéré comme l'un des chimistes majeurs ayant œuvré à la transition de l'alchimie vers la chimie moderne. *Les éléments de chymie* (1615) est l'un des premiers traités de chimie accessibles pour un lecteur non-initié.

BERGMAN Torbern (1735-1784), chimiste suédois, est également connu pour avoir généralisé l'emploi des indicateurs colorés et caractérisé les propriétés acides du gaz carbonique.

BERTHOLLET Claude (1748-1822), chimiste français, est surtout célèbre pour son élucidation de l'action de masse, permettant de modifier les équilibres chimiques, dans le cas des réactions chimiques menant à la formation de composés insolubles ou gazeux.

BERZELIUS Jöns Jacob (1779-1848), chimiste suédois, maître incontesté de la chimie minérale du XIXème siècle, est également l'inventeur des termes « isomérie » et « catalyse ». Il fut malgré tout l'un des derniers chimistes de son époque à reconnaître que le dichlore était un corps simple, sa théorie dualistique empêchant la combinaison de particules de charges (ou d'électroaffinité) identiques.

BOERHAAVE Hermann (1668-1738), médecin et chimiste hollandais, était considéré comme « atomiste » et comme un grand expérimentateur réalisant des expériences de chimie nuit et jour (« chemiam dies noctesque exercuit »). Il fut notamment le découvreur de la différence de réactivité entre acides organiques et inorganiques, ainsi que de la distinction entre les mélanges mécaniques immuables (« phénomène physique » dans notre enseignement) et les mélanges donnant naissance à des corps nouveaux (« phénomène chimique » dans notre enseignement).

CULLEN William (1710-1790), médecin britannique, s'intéressa particulièrement au rôle du système nerveux dans les dysfonctionnements de l'organisme humain.

DALTON John (1766-1784), chimiste anglais, réalise la synthèse des idées de Newton et de Lavoisier dans sa théorie des gaz, qui donnera la loi des pressions partielles qui porte son nom. Il jette simultanément les bases de l'hygrométrie. Il élabore sa théorie atomique en 1803 et dresse la première table de masses atomiques en prenant comme référence l'hydrogène.

FOURCROY (de) Antoine François (1755-1809), chimiste français, est souvent associé à Nicolas Louis Vauquelin, laborantin qui réalisa un grand nombre d'expérimentations nouvelles sous l'égide de son mentor. On leur doit notamment la création du superphosphate de chaux (engrais) et l'élucidation de la composition des calculs rénaux.

GEOFFROY Etienne François (1672-1731), médecin et pharmacien, reconnut le caractère basique des oxydes métalliques. Il nomma « rapport » l'affinité entre substances, précisant que « toutes les fois que deux substances qui ont quelque disposition à se joindre l'une avec l'autre, se trouvent ensemble ; s'il en survient une troisième qui ait plus de rapport avec l'une des deux, elle s'y unit en faisant lâcher prise à l'autre » (Geoffroy, 1718).

GUYTON DE MORVEAU Louis (1737-1816), juriste, chimiste, industriel français, publie notamment en 1782 un mémoire sur les dénominations chimiques qui sera à la base de la *Méthode*. Il se rangea assez tardivement aux thèses anti-phlogistiques de Lavoisier, arguant qu'« il est plus à l'honneur d'être le dernier dans le chemin de la vérité que le premier dans la route de l'erreur » (Guyton de Morveau *et al.*, 1786, p. 630).

HASSENFRATZ Jean Henry (1755-1827), chimiste français, co-fondateur de l'École Polytechnique française en 1794.

LAVOISIER (de) Antoine-Laurent (1743-1794). Les superlatifs manquent pour décrire Lavoisier : Père de la chimie, inventeur de la nomenclature moderne, héraut de l'expérimentation, premier grand communicateur, éradicateur du phlogistique, etc. Même si la réalité historique le situe quelque peu en-dessous de sa renommée, Lavoisier peut se targuer d'avoir établi de façon définitive la composition de l'air, ainsi que les propriétés réactionnelles de l'oxygène. Le *Traité Elémentaire de chimie* (1789) est considéré comme le premier traité de chimie moderne.

LIEBIG (von) Justus (1803-1873), chimiste allemand, co-découvreur avec Wohler du benzaldéhyde et de l'acide benzoïque, est l'un des grands artisans de la théorie des radicaux en chimie organique. Il est également à l'origine d'une des premières définitions des acides en 1839.

ANNEXE B

Test diagnostique pour les élèves de grade 11 (2011)

Pendant le cours, nous avons observé les réactions de combustion du carbone et du magnésium et nous les avons représentées par une équation de réaction. Le sodium (Na) réalise aussi une réaction de combustion en présence de dioxygène (O_2). Cette réaction chimique est représentée selon l'équation de réaction suivante :

$$\mathbf{4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}}$$

a) Quels sont les réactifs ?
……
……

b) Quels sont les produits ?
……
……

c) Que signifie le « + » à gauche de la flèche ?
……
……
……

d) Que signifie la flèche ?
……
……
……

e) Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ?
……
……
……

f) Que signifie le chiffre 2 dans $Na_{\underline{2}}O$?
……
……
……

g) Pourquoi écrit-on les symboles (s) et (g) dans cette réaction ?
……
……
……

h) Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs <u>pendant</u> la réaction chimique ?
……

ANNEXE C

Résultats du test diagnostique (5ème) – tableaux de données

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

Q1 : QUELS SONT LES RÉACTIFS ?

<u>École A</u> : 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**8**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)}$	**4**
Na et O_2	**7**
$Na + O_2$	**2**
4Na et O_2	**2**
$4Na + O_2$	**4**
Sodium et dioxygène	**4**
Na et O_2 (sodium et dioxygène)	**3**
Na et O_2 (sodium et oxygène)	**1**
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$ (sodium et dioxygène)	**1**
$Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**1**
Sodium et oxygène	**1**
Tout ce qui se trouve à gauche ($4Na + O_2$)	**1**
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$ (4 moles de sodium solide et une mole de dioxygène gazeux)	**1**
Sodium Na solide et dioxygène (O) gazeux	**1**
4Na solide et O_2 gazeux (4 moles d'azote et le dioxygène)	**1**
Na et O (sodium et oxygène)	**1**
Na et O	**1**
4 molécules de sodium Na et 1 molécule d'oxygène O	**1**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)}$ (sodium et dioxyde)	**1**
Na^+ et O_2 (sodium et oxygène)	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**6**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)}$	**12**
$4Na$ et O_2	**4**
$4Na + O_2$	**1**
Na et O_2	**3**
Sodium solide et dioxygène gazeux	**1**
Sodium Na et dioxygène O_2 ($4Na_{(s)} + O_{2(g)}$)	**1**
$4Na + O_{2(g)}$	**1**
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$ (qui formeront le produit par addition)	**1**
Éléments qui se trouvent à gauche de la flèche ($4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$)	**1**
Eléments lors d'une réaction qui changent la structure (équation) chimique	**1**
Na et O	**3**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	**1**
Na et O (sodium et oxygène)	**1**
2 atomes au début de l'équation chimique	**1**
$O_{2\,(g)}$	**1**

<u>École B</u> : 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**2**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)}$	**3**
Na et O_2	**5**
4Na et O_2	**3**
$4Na + O_2$	**1**
Na et O_2 (sodium et oxygène)	**1**
$4Na_{(s)}$ et O_2	**1**
$2Na_2O_{(s)}$	**1**
Na et O (sodium et oxygène)	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**6**
$4Na_{(s)} + O_{2(g)}$	**8**
Na et O_2	**1**
4Na et O_2	**3**
Na et O_2 (sodium et dioxygène)	**2**
$Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**1**
Sodium Na et dioxygène O_2 ($4Na + O_2$)	**1**
$2Na_2O_{(s)}$	**3**
4 molécules de Na et 1 molécule d'O_2	**1**

BILAN TOTAL

✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Symboles + coefficient + état dont $4Na_{(s)} + O_{2(g)}$ dont $4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	49 27 22	38 % 21 % 17 %
Symboles + coefficient dont 4Na et O_2 dont 4Na + O_2	18 12 6	14 % 9 % 5 %
Symboles dont Na et O_2 dont Na + O_2	18 16 2	14 % 12 % 2 %
Symboles + nomenclature	7	5 %
Nomenclature seule	5	4 %
Symboles + coefficient + état + nomenclature	3	2 %
Symboles + état	2	1,5 %
À gauche de la flèche	2	1,5 %
Symboles + nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + coefficient + gauche de la flèche	1	0,8 %
Symboles + coefficient + état + gauche de la flèche	1	0,8 %
Nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + nomenclature + coefficient	1	0,8 %
Réponses incorrectes	21	16 %

✓ **Par signes présents**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Présence des symboles Na et O_2	107	82 %
Présence du terme « et »	85	65 %
Présence du coefficient « 4 »	83	64 %
Présence des états de la matière (symbole et/ou nom)	65	50 %
Présence du signe « + »	41	31 %
Présence de la nomenclature (sodium et (di)oxygène)	25	19 %

BILAN PAR ÉTABLISSEMENTS :

✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Symboles + coefficient + état	25 %	28 %	46 %	54 %
Symboles	19 %	28 %	8 %	4 %
Symboles + coefficient	13 %	22 %	13 %	12 %
Réponses incorrectes	15 %	11 %	21 %	15 %
Nomenclature	11 %	0 %	0 %	0 %

✓ **Par signes présents**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	(C)
Présence des symboles Na - O_2	78 %	89 %	79 %	88 %
Présence du signe « + »	25 %	22 %	41 %	35 %
Présence du signe « et » (ou « esperluette »)	76 %	72 %	54 %	57 %
Présence du coefficient 4	51 %	55 %	72 %	80 %
Présence de l'état de la matière	38 %	39 %	64 %	57 %
Présence des noms (sodium / oxygène)	36 %	11 %	8 %	11 %
Réponses incorrectes	15 %	11 %	20 %	15 %

Q2 : QUELS SONT LES PRODUITS ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$2Na_2O_{(s)}$	**14**
Na_2O	**13**
$2Na_2O$	**5**
Oxyde de sodium	**3**
$Na_2O_{(s)}$	**1**
Sodium et dioxygène qui ont réagi ensemble (Na_2O)	**1**
2 moles de Na_2O solide	**1**
Na_2O (oxyde de sodium)	**1**
2 molécules d'oxyde de sodium (Na_2O)	**1**
Oxyde de sodium (Na_2O)	**1**
Tout ce qui est à droite ($2Na_2O$)	**1**
Dioxyde de sodium	**1**
Monoxyde de sodium (solide)	**1**
NaO	**1**
$2Na_2O_2$	**1**
$2N_2O$	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$2Na_2O_{(s)}$	**15**
$2Na_2O$	**9**
Na_2O	**3**
$2Na_2O_{(s)}$ – produit d'une addition de deux réactifs	**1**
Eléments à droite de la flèche : $2Na_2O_{(s)}$	**1**
4 $Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**2**
Solide et gazeux	**1**
Les atomes de sodium	**1**
4 et 2	**1**
$2Na_2O_2$	**1**
Résultat de la réaction entre les deux atomes	**1**
Mélange des réactifs	**1**
Eléments qu'on a besoin pour une réaction chimique	**1**
Sodium dioxygène $2Na_2O_{(s)}$	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$2Na_2O_{(s)}$	**4**
Na_2O	**4**
$2Na_2O$	**2**
Na_2O (oxyde de sodium)	**1**
Na_2 et O	**2**
$2Na_2$ et O	**2**
$2Na_2$ et 2O ($2Na_2O_{(s)}$)	**1**
4Na et O_2	**1**
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
$2Na_2O_{(s)}$	**12**
$2Na_2O$	**5**
Na_2O	**2**
$Na_2O_{(s)}$	**1**
2 molécules de Na_2O	**1**
Oxyde de sodium (Na_2O)	**1**
$4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**2**
$2Na_2O_{2(s)}$	**1**
4Na et O_2	**1**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Symboles + coefficient + état (« $2Na_2O_{(s)}$ »)	45	35 %
Symboles (« Na_2O »)	22	17 %
Symboles + coefficient (« $2Na_2O$ »)	21	16 %
Symboles + nomenclature	5	4 %
Nomenclature seule	4	3 %
Symboles + état	2	1,5 %
Symboles + coefficient + état + droite de la flèche	1	0,8 %
Symboles + droite de la flèche	1	0,8 %
Nomenclature + état	1	0,8 %
Symboles + droite de la flèche	1	0,8 %
Réponses incorrectes	27	21 %

- ✓ **Par signes présents**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Présence des symboles Na et O_2	103	79 %
Présence du coefficient « 2 »	80	62 %
Présence des états de la matière (symbole et/ou nom)	58	45 %
Présence de la nomenclature (oxyde de sodium)	12	9 %

BILAN PAR ÉTABLISSEMENTS

✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Na_2O + coeff + état	30 %	22 %	38 %	46 %
Na_2O + coeff	11 %	11 %	23 %	19 %
Na_2O	28 %	22 %	8 %	8 %
Réponses incorrectes	11 %	39 %	26 %	15 %
Nomenclature (oxyde de…)	9 %	0 %	0 %	0 %

✓ **Par signes présents**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Utilisation des symboles Na_2O	83 %	67 %	77 %	85 %
Utilisation du coefficient 2	51 %	50 %	72 %	73 %
Utilisation de l'état de la matière	36 %	33 %	49 %	62 %
Utilisation des noms	17 %	6 %	5 %	4 %
Réponses incorrectes	11 %	39 %	26 %	15 %

Q3 : QUE SIGNIFIE LE SIGNE “+” ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d’élèves
« et »	**3**
« accompagné de »	**2**
Les deux réactifs sont mis en présence l’un de l’autre (réaction entre 4 $Na_{(s)}$ avec 1 $O_{2(g)}$ / réaction s’effectue)	**2**
Mise en contact de deux réactifs / on doit mettre en contact les deux réactifs	**2**
en contact avec	**1**
On met Na en présence de O_2	**1**
On met Na et O_2 ensemble	**1**
Mettre les deux ensemble pour les faire réagir ($4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$)	**1**
Quand on met de l’oxygène avec du sodium	**1**
« avec » (que c’est associé)	**2**
Les deux réactifs sont mis en présence l’un de l’autre	**1**
« en présence de »	**1**
« avec », « mis en commun avec »	**1**
Ajout – « ajouté à »	**2**
On ajoute du O_2 au Na	**1**
On ajoute du O_2 au 4Na	**1**
Ajout d’un réactif dans l’équation et dans l’expérience chimique	**1**
On ajoute, on place les deux réactifs ensemble	**1**
Que la molécule/atome/composé après le « + » réagit avec la molécule /atome/composé avant le « + » / de part et d’autre du « + »	**3**
« réagit avec »	**3**
On fait réagir Na avec O_2 / réagissent ensemble	**2**
On fait réagir 4 $Na_{(s)}$ avec le $O_{2(g)}$ / réagissent ensemble	**2**
Le sodium réagit avec le dioxygène	**1**
On fait réagir un atome avec un autre	**1**
On fait réagir ensemble du Na et de l’O	**1**
On fait réagir les deux réactifs	**1**
Mélange de deux substances (Na et O_2)	**1**
Mélange 4 atomes de Na à du dioxygène	**1**
Mélange plusieurs réactifs pour obtenir des produits	**1**
Les deux réactifs sont mis ensemble (mélangés)	**1**
Addition des deux réactifs (afin de créer le produit)	**2**
On additionne $4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**1**
Pas de réponse	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Plus joli que « avec »	**1**
On ajoute du O_2	**1**
Ajout	**1**
Ajoute un réactif à un autre	**1**
On ajoute pour compléter la réaction	**1**
Ajouter ou combiner les deux réactifs (pour obtenir le produit)	**1**
Ajout de ce qui est à gauche du « + » de ce qui se trouve à droite du « + »	**1**
« réagit avec »	**3**
On fait réagir 4 $Na_{(s)}$ avec le $O_{2(g)}$ / réagissent ensemble	**2**
Assembler 4 molécules de sodium avec 2 molécules d'oxygène	**1**
Assembler le 4 Na avec le O_2	**1**
Assemblage des deux réactifs	**1**
On fait réagir un atome avec un autre	**1**
Symbole d'une liaison entre les deux réactifs	**1**
Mélanger / additionner à…	**2**
Mélange des deux réactifs	**1**
Mélange $4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$	**1**
Mélange le Na et le O	**1**
Mélange plusieurs réactifs pour obtenir des produits	**1**
Association de deux éléments / mélange	**1**
Addition des deux réactifs (afin de créer le produit)	**6**
Addition	**2**
On additionne Na et O_2	**1**
Addition de deux réactifs sous forme de calcul	**1**
Addition des deux molécules	**1**
Ajout d'un atome à un autre, une somme	**1**
Fusion des deux réactifs	**1**
Que $4Na_{(s)}$ et $O_{2(g)}$ va donner 2 $Na_2O_{(s)}$ vu que $4Na_{(s)}$ donne $2Na_2$ et $O_{2(g)}$ donne $2O_{(s)}$	**1**
Pas de réponse	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Mettre $4Na_{(s)}$ avec $O_{2(g)}$)	**2**
Les deux réactifs sont pris ensemble	**1**
On ajoute de l' O_2 à 4Na	**2**
Association du sodium et de l'oxygène	**1**
On fait réagir Na avec O_2 / réagissent ensemble	**1**
réaction du Na et de l'O	**1**
Mettre O_2 en réaction avec Na	**1**
On fait réagir les deux réactifs	**1**
Mélange de deux constituants de chaque côté du signe	**1**
Mélange 4 Na et O_2	**1**
Ils sont mélangés	**1**
Montrer ce qu'on mélange lors de la réaction	**1**
On additionne, ils sont mis ensemble	**1**
Addition des deux réactifs	**1**
Somme des réactifs	**1**
Addition d'éléments chimiques	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
« et »	**11**
On ajoute	**1**
« réagit avec »	**3**
On fait réagir Na avec O_2 / réagissent ensemble	**1**
Les réactifs réagissent ensemble / on les mélange	**1**
4 atomes de sodium réagit avec…	**1**
On fait réagir 4 $Na_{(s)}$ avec le $O_{2(g)}$ / réagissent ensemble	**1**
4 moles de sodium réagit avec du dioxygène	**1**
Les deux réactifs sont additionnés - $4Na_{(s)}$ va être mélangé avec du $O_{2(g)}$	**1**
Addition	**1**
Addition des deux réactifs	**1**
Addition de ce qui se trouve de part et d'autre du « + »	**1**
Addition, traduite par un « et »	**1**
« réagit avec » ou « et »	**1**

<u>Bilan TOTAL</u>

- ✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative	Fréquence relative dans la catégorie
« et »	14	11 %	41 %
« addition des deux réactifs »	10	8 %	43 %
« réagit avec »	9	7 %	24 %
« ajouté à »	5	4 %	33 %
« mélange 4Na et O_2 »	4	3 %	25 %

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Réaction / réagit avec	38	29 %
Ensemble des réactifs / avec / et / mis en contact	34	26 %
Addition / somme	23	18 %
Mélange	16	12 %
Ajout	15	11 %
Pas de réponse	2	2 %
Réponses incorrectes	2	2 %

BILAN PAR ÉTABLISSEMENTS

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Réaction / réagit avec	30 %	28 %	26 %	35 %
Ensemble des réactifs / avec / et / mis en contact	40 %	17 %	2 %	42 %
Addition / somme	6 %	22 %	30 %	15 %
Mélange	9 %	22 %	18 %	4 %
Ajout	13 %	11 %	15 %	4 %

Q4 : QUE SIGNIFIE LA FLÈCHE DE RÉACTION ?

<u>École A:</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
On fait réagir les deux réactifs afin de créer le produit	**2**
Réaction	**1**
C'est la réaction après que l'on a mis les deux réactifs en commun – signifie « donne »	**1**
« (Qui) réagissent pour donner »	**13**
Réagissent pour former	**5**
Réagissent pour produire	**1**
Pour former après réaction	**1**
Obtention des produits suite à la réaction des réactifs	**1**
Donne après la réaction	**1**
Pour donner	**4**
Pour former	**1**
Forment – ont formé	**3**
donnent	**3**
Agit pour donner du	**1**
Engendrent	**1**
Donneront mis ensemble	**1**
Va entraîner	**1**
Montre ce que deviennent les réactifs	**1**
Indique ce qu'il reste en fin de réaction	**1**
Égal – montre ce qu'on obtient de la réaction	**1**
Sens de la réaction – « pour donner »	**1**
Réaction complète – les réactifs disparaissent pour donner le produit	**1**
Réaction complète	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Signifie la réaction et les produits de réaction	**1**
Réaction que va produire les deux réactifs	**1**
Signifie l'assemblage des atomes pour former une molécule	**1**
Donne la réaction	**1**
On transforme les réactifs en produits	**1**
Signifie l'étape de transition, l'addition des deux réactifs pour obtenir le produit	**1**
Signifie qu'il y a réaction ou un changement d'état	**1**
La transformation des réactifs en un seul produit	**1**
Passage de l'état réactif à l'état produit	**1**
« (Qui) réagissent pour donner »	**1**
Réagissent pour former	**1**
pour former	**1**
donnent – nous donnent	**3**
Produit du	**2**
ce qui donne	**1**
Se transforment – devient	**1**
Que l'addition des réactifs donne	**1**
Que l'ajout des réactifs donne	**1**
Les réactifs se dissolvent et donnent le produit	**1**
Signifie qu'on a mis ensemble les deux réactifs	**1**
La solution	**1**
Montre le produit de réaction	**2**
Est – montre ce qu'on obtient en faisant réagir les deux réactifs	**2**
Signifie qu'on peut avoir un résultat dans une équation	**1**
Signifie le résultat de l'équation pondérée	**1**
Résultat de la réaction entre les réactifs	**1**
Ce que donnera la réaction – la flèche peut aussi indiquer si la réaction se passera en milieu gazeux ou aqueux	**1**
Dit ce que donne la réaction	**1**
Sépare les réactifs et produit pour montrer ce qu'on obtient – similaire au signe égal	**1**
Comme un signe égal - « ce qui donne »	**2**
Que le produit va être transformé de gauche à droite	**1**
Pas de réponse	1

<u>École B :</u> 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Il s'est produit une réaction après qu'on ait mis les deux réactifs ensemble	**2**
Signifie la réaction	**1**
Une réaction se produit	**1**
Signifie « a pour réaction »	**1**
Une réaction	**1**
Réaction pour devenir	**1**
Résultat	**1**
Ce que deviennent les réactifs après la réaction	**1**
Ce que donne la réaction	**1**
ce que deviennent les réactifs	**1**
Le résultat qui s'est produit	**1**
Résultat de la mise en commun des deux composés	**1**
Résultat de la réaction – traduit aussi en français par « donne »	**1**
Ce que l'on obtient comme résultat – on ne sait pas revenir en arrière (sinon double flèche)	**1**
Sépare les réactifs des produits – indique que la réaction a lieu dans un sens	**1**
La réaction se fait dans un seul sens	**1**
Ça donne – égal	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Réagissent pour former	**9**
« (Qui) réagissent pour donner »	**7**
Réagissent pour produire	**1**
Réagissent pour former (dépend de combien de réactifs nous avons)	**1**
S'associent pour former	**1**
Pour donner	**3**
pour former	**2**
Produit	**1**
Forment	**1**
Mélange des deux réactifs donne une autre substance, le produit	**1**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par combinaisons strictes**

Réponses – combinaisons strictes	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former »	21	16 %
« Réagissent pour donner »	15	12 %
« Pour donner »	7	5 %
« Forment »	6	5 %
« Donnent »	6	5 %
« Pour former »	4	3 %
« La réaction »	3	2 %
« Montre le produit de réaction »	2	2 %

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former/donner/autre » dont « réagissent pour former » « réagissent pour donner » autre réponse	49 21 15 13	38 % 16 % 12 % 10 %
« Devient / forme / donne /… » dont « forment » « donnent » autre réponse	22 6 6 10	17 % 5 % 5 % 7 %
Réaction / transformation	20	15 %
Indique les produits / le résultat de la réaction	19	15 %
« pour former / pour donner »	11	8 %
Indique le sens de la réaction	4	3 %
Égal / « équivaut »	4	3 %
Pas de réponse	1	0,8 %

BILAN PAR ÉTABLISSEMENTS

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
« Réagissent pour donner/former/autre »	47 %	6 %	5 %	73 %
« Devient / forme / donne / … »	32 %	0 %	28 %	23 %
Réaction / transformation	9 %	33 %	23 %	0 %
Indique les produits / le résultat de la réaction	6 %	44 %	23 %	0 %
Égal / « équivaut »	2 %	6 %	5 %	0 %

Q5 : QUE SIGNIFIE LE 4 DANS « 4 Na » ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Coefficient – indique qu'il y a 4 moles de Na	**1**
Qu'il y a 4 moles d'azote – c'est son coefficient	**1**
On prend 4 moles de Na	**2**
Il y a 4 moles de Na	**3**
Il y a 4 moles de sodium	**1**
Il y a 4 moles de sodium dans l'équation	**1**
Nombre de moles de Na	**1**
4 moles	**1**
Signifie 4 moles de sodium – c'est la pondération pour que le membre de gauche soit égal à celui de droite	**1**
Nombre de moles pour pondérer la réaction	**1**
Coefficient de l'équation pondérée car selon Lavoisier il y a autant de composant d'un côté que de l'autre	**1**
Pondération – 4 molécules de Na doivent réagir	**1**
C'est la pondération	**1**
Pondération afin d'avoir le même nombre d'atomes de chaque côté	**1**
4 molécules de sodium	**1**
4 molécules de Na	**1**
Le nombre de molécules de sodium	**1**
Il y a 4 molécules de Na	**3**
C'est le nombre de molécules de Na	**1**
Il faut 4 molécules de Na	**1**
On prend 4 fois une molécule de Na	**1**
Que la proportion est de 4 Na pour 1 O_2 afin de former 2 Na_2O	**1**
Dans cette réaction, pour une mole de O_2, on a besoin de 4 moles de Na	**1**
Que l'on prend 4 atomes de sodium pour 1 atome de dioxygène	**1**
Nombre d'unité (atome ou mole) de sodium devant réagir avec une unité de dioxygène pour une réaction complète	**1**
C'est le coefficient – il détermine la proportion de Na (le nombre de moles) par rapport à 1 mole de O_2	**1**
Il faut 4 moles de Na pour faire réagir 1 mole de O	**1**
Il y a 4 atomes de sodium	**1**
Nombre d'atomes de sodium dans la solution	**1**
Il y a 4 atomes de Na	**1**
Nombre d'atomes de sodium	**1**
Nombre de moles de sodium pour faire la réaction	**1**

Nécessaire d'avoir 4 moles de sodium pour réaliser cette réaction	**1**
On fait réagir 4 moles de sodium	**1**
Il faut 4 moles de Na pour effectuer la réaction	**1**
Nombre de molécules de sodium avec laquelle on fait la réaction	**1**
4 Na réagissent	**1**
Nombre de moles de Na dans la réaction	**1**
Coefficient	**3**
Pas de réponse	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Représente 4 moles de Na	**1**
Egaliser l'équation entre réactifs et produits	**1**
Le nombre de molécules de Na pour équilibrer la réaction	**1**
Il y a 4 Na pour équilibrer	**1**
Il y a 4 molécules de sodium	**1**
4 molécules de Na	**3**
Il y a 4 molécules de Na	**7**
La molécule Na est reprise 4 fois	**1**
Nombre de molécule de Na	**2**
Il y a 4 atomes de sodium	**2**
Nombre d'atomes qui sera coupé en deux	**1**
Il y a 4 atomes de Na	**1**
Coefficient stœchiométrique – on prend 4 atomes de sodium Na	**1**
Nombre d'atomes Na	**1**
Nombre d'atomes de sodium	**1**
Il y a 4 molécules de Na qui réagissent	**1**
Na est repris 4 fois	**1**
4 Na	**4**
Nombre de sodium	**2**
Il y en a quatre	**2**
Nombre de Na	**1**
Pas de réponse	**2**

<u>École B :</u> 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Multiplie le tout en 4 moles de Na	**1**
Pondération de l'équation, cela équilibre le nombre d'atomes	**1**
On prend 4 atomes de Na pour la réaction (afin qu'elle soit équilibrée)	**1**
Chiffres qu'on a mis pour égaliser l'équation	**1**
On prend 4 molécules de Na (sodium)	**1**
On prend 4 molécules de Na	**1**
Il y a 4 molécules de Na	**2**
Le nombre de fois que l'on prend la molécule Na	**1**
Nombre de molécule de sodium	**1**
Il y a 4 atomes de sodium	**1**
Nombre d'atomes de Na	**2**
Le nombre de Na qu'il y a – 4 Na (4 atomes)	**1**
Il y a 4 atomes de Na	**2**
Quantité d'atomes Na dans la réaction	**1**
Il y a 4 Na	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
4 moles de sodium	**1**
4 moles de Na	**1**
4 moles	**1**
Le nombre d'atomes qu'il y a dans cette molécule pour permettre de pondérer l'équation	**1**
Le nombre d'atomes Na pour rétablir l'équilibre dans l'équation	**1**
Il faut 4 atomes de Na pour faire du $2Na_2O$	**1**
C'est la pondération – le nombre de molécules de Na qu'il faut mettre avec O_2 pour former 2 molécules de Na_2O	**1**
Il y a 4 molécules de sodium	**2**
Il y a 4 molécules de Na	**2**
4 molécules de Na	**2**
Nombre de molécule qu'il y a dans le Na	**1**
Nombre de molécules – c'est l'indice	**1**
« molécule »	**1**
Il y a 4 atomes de sodium	**2**
Il y a 4 atomes de sodium Na	**1**
Le nombre d'atomes de sodium	**1**
Il y a 4 atomes de Na	**1**
Nombre d'atome de Na	**1**
Nombre d'atome	**1**
Il y a 4 atomes de Na dans le produit	**1**
Nombre de Na dans la réaction	**1**
C'est le nombre de fois que la molécule ou atome se trouve dedans	**1**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Nombre de molécules	43	33 %
Nombre d'atomes	33	24 %
Nombre de moles	27	21 %
Pondération	17	13 %
Nombre (de Na, de sodium)	11	8 %
Nécessaire à la réaction	11	8 %
Proportion	8	6 %
Coefficient	5	4 %

BILAN PAR ETABLISSEMENTS

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Nombre de molécules	23 %	33 %	41 %	38 %
Nombre d'atomes	15 %	44 %	18 %	42 %
Nombre de moles	47 %	5 %	3 %	12 %
Nombre (de Na, de sodium)	0 %	5 %	26 %	0 %
Pondération	13 %	17 %	8 %	19 %
Proportion	13 %	0 %	0 %	0 %
Coefficient	11 %	0 %	0 %	0 %

Q6 : QUE SIGNIFIE LE 2 DANS « Na_2O » ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
C'est la valence de l'oxygène	**4**
La valence de O	**1**
C'est l'indice, la valence de l'oxygène	**1**
C'est l'indice. Il faut 2 Na pour 1 O	**2**
La molécule est composée de 2 atomes de Na et d'un atome O	**2**
Il faut 2 atomes de Na pour 1 atome de O	**2**
Il y a deux molécules de Na pour une de O	**2**
Que le O est attaché à 2 atomes de Na mis ensemble	**1**
Il faut 2 Na pour 1 O	**1**
Il y a deux atomes de Na accrochés à 1 atome de O	**1**
Il y a 2 Na qui se lient avec 1 O	**1**
La molécule ne peut exister que s'il y a deux atomes de sodium pour se coller à l'oxygène	**1**
Détermine le nombre d'atomes Na pour 1 atome d'oxygène	**1**
Que O est lié à 2 atomes Na	**1**
Il faut 2 atomes de Na dans la molécule Na_2O car Na est de valence 1 alors que O est de valence 2	**2**
O et Na, pour que cela soit vrai ensemble, doit être équilibré selon les valences (Na en a une moitié moins puissante que le O)	**1**
Avec la valence, cela veut dire que pour une molécule de O, il y a deux molécules de Na avec le O	**1**
Il faut 2 atomes Na pour former une molécule d'oxyde de sodium selon la valence de O	**1**
Elle exprime la différence de valence entre l'oxygène et le sodium	**1**
Comme le O est valence II et Na est valence I, on croise pour avoir les proportions	**1**
C'est un indice, pour dire qu'il faut deux Na (valence I) pour associer à un O (valence II)	**1**
Indice. 2 atomes de Na et 1 oxygène (se trouve suivant la valence de O)	**1**
Il y a 2 atomes de Na dans la molécule	**3**
Il y a 2 atomes de sodium	**1**
Il y a deux molécules de Na	**1**
Nombre de sodium	**1**
C'est le nombre de Na dans la molécule de Na_2O	**1**
Dans la molécule Na_2O, il y a deux atomes Na	**1**
Il y a deux Na	**1**
Indice	**5**

Le 2 est l'indice de O	**1**
Coefficient	**1**
Il y a 4 azotes pour 2 oxygène dans cette molécule	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
La valence de l'O	**3**
C'est la valence	**2**
Le nombre de sodium pour avoir l'équation égale	**1**
Il y a déjà 2 molécules de Na au départ et sans multiplication	**1**
Il y a deux Na	**4**
C'est le nombre d'atomes Na dans la molécule de Na_2O	**3**
Nombre de molécules de Na	**2**
Il y a 2 atomes de sodium	**1**
Le nombre de sodium qu'il y a	**1**
2 molécules de Na dans Na_2O	**1**
Il y a 2 Na (sodium) et le 2 ne va pas sur le O (oxygène)	**1**
Dans le groupement, il y a deux Na	**1**
Il y a 2 Na, le deux ne porte que sur le Na alors que dans $2Na_2O$, le 2 porte sur tout Na_2O	**1**
Na est pris deux fois	**1**
Indice	**2**
Il y a 2 atomes de Na, ce chiffre est appelé indice	**2**
Nombre de molécules	**2**
Le nombre de Na_2O pour avoir le même nombre que 4 Na	**1**
Nombre de réaction de Na avec O	**1**
Division de la molécule de Na	**1**
La valence de Na	**1**
Représente le 2 de O_2 qui a réagit avec le 4 Na	**1**
Il peut faire deux fois plus de liaisons	**1**
Il s'agit d'un coefficient stœchiométrique ; il signifie que l'on prend 2 fois la molécule de Na_2O	**1**
Pas de réponse	**3**

<u>École B</u> : 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
C'est la valence de l'oxygène qui a été croisée avec la valence de Na	**1**
C'est l'indice, la valence de l'oxygène	**1**
La valence de O à la base mais on a pondéré l'équation. Elle sera donc placée à Na pour équilibrer	**1**
Il y a deux atomes de Na pour un de O	**2**
On prend deux molécules de Na mais une seule de O	**2**
On doit multiplier par 2 le nombre d'atomes de sodium	**1**
Il y a deux atomes de Na	**2**
Quantité de Na dans la molécule Na_2O	**1**
Le Na est pris deux fois	**1**
2 molécules de Na	**1**
Il y a 2 atomes de Na dans la molécule	**1**
On prend deux atomes de sodium	**1**
Nombre de Na	**1**
Il y a simplement deux fois	**1**
Pas de réponse	**1**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Comme Na est valence I et O valence II on met un 2 à Na pour égaliser	**1**
Le nombre de… cela vient des valences entre Na et O	**1**
Il faut deux atomes de Na pour pouvoir se lier avec O	**1**
Il y a deux atomes de sodium pour un atome d'oxygène	**1**
2 Na pour 1 O	**1**
2 molécules de Na pour 1 de O	**1**
Le nombre d'atomes de Na pour se lier avec le O	**1**
C'est l'indice – pour un atome d'oxygène, il y a deux atomes de Na qui y sont liés	**1**
Nombre d'atomes de sodium pour équilibrer la molécule	**1**
Il y a 2 atomes de sodium dans la molécule Na_2O	**3**
Il y a deux atomes de sodium	**2**
Nombre de Na présent dans la molécule	**1**
Nombre de moles de sodium	**1**
Il y a deux molécules de Na	**1**
Nombre d'atomes Na	**1**
Indice	**2**
C'est le coefficient – c'est le nombre d'atomes	**1**
Que deux molécules sont formées	**1**
C'est le coefficient – il montre que pour 1 élément d'oxygène est rattaché deux éléments de sodium	**1**
Dioxygène de sodium	**1**
Nombre d'atomes dans l'oxygène. De plus, il s'agit de valence	**1**
Ça forme une molécule de 2 atomes de sodium	**1**

BILAN TOTAL

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Nombre de sodium (molécules ou atomes) dans la « molécule » d'oxyde de sodium	50	38 %
Nombre de sodium (molécules ou atomes) en rapport avec l'oxygène (2 pour 1)	34	26 %
Lié à la valence de l'oxygène	25	19 %
Utilisation du terme « indice »	19	15 %
Réponses incorrectes	19	15 %

✓ **Par entités convoquées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
deux atomes de Na	31	24 %
deux Na	20	15 %
deux molécules de Na	13	10 %
deux atomes de sodium	12	9 %
deux sodium	3	2 %
deux moles de sodium	1	1 %

BILAN PAR ÉTABLISSEMENTS

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Nombre de sodium (molécules ou atomes) dans la « molécule » d'oxyde de sodium	19 %	50 %	51 %	50 %
Nombre de sodium (molécules ou atomes) en rapport avec l'oxygène (2 pour 1)	51 %	22 %	0 %	23 %
Lié à la valence de l'oxygène	32 %	17 %	13 %	8 %
Utilisation du terme « indice »	21 %	11 %	10 %	12 %
Réponses incorrectes	6 %	6 %	23 %	23 %

Q7 : POURQUOI ÉCRIT-ON LES SYMBOLES (s) ET (g) DANS CETTE ÉQUATION ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Pour connaître l'état des molécules (s->solide, g->gazeux)	**1**
Cela précise si l'atome (ou molécule) est solide (s) ou gazeux (g)	**1**
Car on prélève 4 atomes de Na solide et du dioxygène gazeux pour obtenir 2 molécules de Na_2O	**1**
L'état de l'atome, si il est solide ou gazeux	**1**
Pour dire si les molécules sont solides ou gazeuses	**1**
(s) pour solide ; (g) pour gazeux ; pour voir la « forme » des atomes et des molécules	**1**
s->Solide et g->gazeux ; C'est pour connaître l'état des réactifs et des produits	**1**
Pour préciser l'état des réactifs et des produits	**1**
Pour préciser si les réactifs et les produits sont solides ou gazeux	**1**
Pour donner l'état de la matière des composés de départ et ceux produits	**1**
Pour savoir si les réactifs ou produits sont solides (s) ou gazeux (g) (liquide (l) ou acqueux (aq))	**1**
Pour dire que les réactifs sont solides et gazeux, on nous montre leur état	**1**
Afin de faire savoir l'état des produits et des réactifs (s pour solide, g pour gazeux)	**1**
Pour nous montrer l'état des réactifs : solide et gazeux	**1**
Pour indiquer dans quel état se trouve le réactifs, le corps (solide, liquide, gazeux)	**1**
Pour savoir si les réactifs et produits sont solides ou gazeux et pour pouvoir écrire correctement la formule […] / […]	**1**
Pour savoir si l'état du produit s = solide ; g = gazeux	**1**
Pour montrer qu'en début de réaction, les réactifs sont sous forme solide et qu'à la fin ils deviennent gazeux	**1**
Car on veut montrer que d'un réactif solide (s) et d'un gazeux (g), on obtient un produit solide (s)	**1**
Pour montrer dans quelle forme sont les réactifs et produits, gaz, solide, liquide	**1**
Pour préciser que le sodium est sous forme solide et le dioxygène gazeux	**1**
Na est solide -> s ; O est gazeux -> g	**1**
s = solide ; g= gazeux Ils nous renseignent sur la nature des réactifs	**1**
Pour précise si le corps est à l'état gazeux (g) ou solide (s)	**1**
Pour avoir des informations sur l'état des corps (solide, gazeux, …)	**1**
Pour dire que le corps est à l'état solide ou à l'état gazeux	**1**

Pour spécifier si l'élément est solide ou gazeux	**1**
Pour informer de l'état solide (s) ou gazeux (g) des composés	**1**
Pour signaler si le composant est solide ou gazeux	**1**
Pour donner le type de composé que l'on a : solide, liquide ou gaz	**1**
Le (s) signifie que le groupement est solide ; le (g) signifie que le groupement est gazeux	**1**
(s) solide , (g) gazeux – états de la matière	**1**
(s) veut dire solide et (g) signifie « à l'état gazeux »	**1**
Solide ou gazeux pour dire de quel « état » ils sont	**1**
s représente l'état solide et g représente l'état gazeux	**1**
Pour symboliser ce qui est solide (s) ou gazeux (g)	**1**
s = solide ; g = gazeux	**4**
(s) pour solide et (g) pour gazeux	**1**
Solide et gazeux	**1**
(s) = solide ; (g) = gaz ; c'est une indication	**1**
Pour indiquer qu'on a un solide et un gaz	**1**
Pour préciser si ils sont solides ou gazeux	**1**
Car c'est l'équation d'une réaction chimique	**1**
Pas de réponse	**1**

<u>École B :</u> 5èmes option sciences de base – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Pour savoir si l'atome est solide ou gazeux	1
Pour préciser si les atomes sont solides ou gazeux	1
Pour indiquer l'état des molécules ici (s) étant solide et (g) étant gazeux	1
Solide et gazeux, c'est donc l'état des atomes	1
Pour savoir si les réactifs sont solides ou gazeux	1
Pour distinguer les solides des gaz et savoir l'état de la matière du produit	1
Pour savoir la forme de les réactifs – si c'est une solide, ou un gaz ou une liquide	1
Pour pouvoir distinguer leur forme, ici solide ou gazeux	1
Pour nous dire sous quelle forme sont le Na et O_2 – solide, liquide ou gazeux	1
(s) signifie solide : 4 Na est donc à l'état solide ; (g) signifie gazeux, O_2 est donc à l'état gazeux	1
Pour nous indiquer le milieu, ici (g) gazeux et (s) solide	1
On les écrit pour montrer que les éléments sont à l'état de solide (s) ou de gaz (g)	1
Car il y a des éléments qui sont différents d'autres sont solides d'autres sont gazeux	1
Pour dire si l'élément est solide (s) ou gazeux (g)	1
Pour définir quelle type de substances sont ou l'état dont elles sont avant et après la réaction	1
Pour indiquer l'état	1
Pour savoir la matière	1
Pour indiquer quel état c'est - solide, gazeux ou liquide	1
On précise les états : (s) solide, (g) gazeux, (l) liquide	1
Car c'est à l'état solide (s) et gazeux (g)	1
Pour les s -> cela signifie état solide ; pour les g -> cela signifie état gazeux	1
Afin de préciser quel est leur état solide ou gazeux	1
Pour préciser son état – solide, gazeux	1
Pour informer de leur état : liquide (s) et solide (g)	1
Pour savoir qui est solide et qui est le gaz	1
s = solide ; g = gazeux	2
(s) pour solide et (g) pour gaz	2
Parce que le (s) ou le (g) désigne si c'est une solide ou un gaz	1
Pour dire solide (s) et gazeux (g)	3
(s) signifie solide et (g) signifie gazeux	1

Pour indiquer s'il s'agit d'un solide (s) ou d'un gaz (g)	1
(s) signifie qu'on a affaire à un solide ; (g) signifie qu'on a affaire à un gaz	1
Car (s) signifie solide et (g) gaz	1
Car il y a du solide et du gaz	1
Pas de réponse	1

<u>École B :</u> 5èmes option sciences générales -18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Pour expliquer la forme du composé, le Na est un solide et le O_2 est un gaz	1
Le Na est solide et le O_2 est gazeux, c'est pour savoir sous quelle forme ils sont	1
Car à la base, Na est solide, et O gazeux, c'est pour voir ce que donnent ces deux-ci.	1
Parce que le Na est solide et le O_2 est gazeux	1
Pour savoir l'état du composé, si il est solide ou gazeux	1
Pour savoir dans quelles conditions l'équation est faite	1
C'est pour indiquer si l'élément est à l'état solide (s) ou gazeux (g)	1
Pour indiquer le milieu du composé (solide, gazeux)	1
Pour informer dans quel milieu on se trouve	1
s car le composé est solide ; g car le composé est gazeux	1
s = état solide ; g = état gazeux	1
Le « s » est pour solide	1
(s) veut dire qu'on a un solide et (g) veut dire qu'on a un gaz	1
(s) pour solide et (g) pour gaz	1
g = gaz ; s = solide	1
Pour préciser que l'un est solide et l'autre gazeux	1
Pas de réponse	2

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Pour dire l'état des molécules (solide, gaz, liquide)	1
Pour savoir si l'atome est solide, gazeux ou liquide	1
C'est l'état de matière des molécules ou atomes	1
Pour montrer dans quel état on met ses molécules (s)->solide ; (g) -> gazeux	1
Pour indiquer sous quelle forme se trouvent les molécules	1
Pour dire si les molécule sont solides ou gazeuses	1
Car un des réactifs est solide et l'autre est gazeux	1
Pour montrer que le produit 4 Na et le réactif $2Na_2O$ sont solides alors que le O_2 est gazeux	1
Pour préciser que le Na est solide et que l'oxygène, lui, est gazeux (par exemple)	1
Pour dire que c'est un réaction solide et gazeuse	1
Pour monter l'état des éléments	1
Pour nous dire leur substance car la réaction peut varier en fonction si c'est un gaz, liquide ou solide	1
s – veut dire que la substance est à l'état solide ; g – veut dire que la substance est à l'état gazeux	1
Pour préciser l'état de la matière (s) pour solide (g) pour gazeux	1
Pour dire que c'est sous forme solide ou gazeuse	1
Pour donner leur état : (s) pour solide ; (g) pour gazeux	1
Pour définir leur état physique : (s) = solide ; (g) = gazeux (l) =liquide (aq) = en présence d'eau / aqueux	1
Pour spécifier l'état de la matière	1
Pour dire si c'est un solide pour (s) ou un gaz pour (g)	1
Pour savoir si c'est un solide, un gaz ou un liquide	1
Pour montrer que c'est un solide et un gaz car c'est une combustion	1
Ça veut dire que c'est solide ou gazeux, ça va nous servir pour le delta ngaz	1
solide (s), gazeux (g)	2
s pour solide et g pour gaz	1
Car il est important de savoir les changements d'état (s= solide ; g = gaz)	1

Bilan TOTAL

- ✓ **Par précision de l'état**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Solide / gazeux	114	88 %
Pas de précision de l'état	16	12 %

- ✓ **Par types d'objets**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Réactifs / produits	20	15 %
Molécules / atomes	16	12 %
Na / sodium / oxygène	12	9 %
Elément	6	5 %
Composé	6	5 %
Corps	4	3 %

- ✓ **Par termes utilisés (état, forme, etc.)**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Etat	45	35 %
Forme	11	8 %
Milieu	2	2 %
Substance	1	1 %

Q8 : SELON TOI, QUE SE PASSE-T-IL CHEZ LES RÉACTIFS <u>PENDANT</u> LA RÉACTION CHIMIQUE ?

<u>École A :</u> 5èmes option sciences– 47 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Elles s'assemblent	**2**
Ils réagissent ensemble, ils se combinent	**2**
Les deux réactifs s'assemblent	**1**
Ils s'assemblent autrement	**1**
Leurs molécules se mélangent, se réarrangent pour former celle du produit	**1**
Ils se lient ensemble	**1**
Ils se combinent	**1**
Ils s'associent	**1**
Les réactifs réagissent ensemble pour donner un produit, ils fusionnent	**1**
Ils continuent de réagir entre eux et ils disparaissent peu à peu	**1**
Ils se transforment pour donner un nouveau corps, ils se lient	**1**
Ils se transforment en produits	**2**
Ils se transforment au contact l'un de l'autre et « se mélangent »	**1**
Ils sont transformés en produits car selon la loi de Lavoisier, rien ne se gagne, rien ne se perd, tout est transformation	**1**
Les réactifs se transforment petit à petit en produits	**1**
Ils se transforment	**1**
La structure des molécules change	**1**
Ils se mélangent	**2**
Ils se mélangent et forment un nouveau composé	**1**
Ils « se mélangeront » ou non en fonction de la spontanéité de la réaction	**1**
Les composés se mélangent et forment un nouveau composé ensemble	**1**
Ils se mélangent pour former du Na_2O solide	**1**
Ils réagissent entre eux pour former un ou plusieurs composés	**2**
Ils réagissent l'un avec l'autre	**2**
Ils réagissent ensemble	**2**
Ils réagissent pour donner le produit	**1**
Les réactifs entrent en contact pour former les produits	**1**
Les molécules se détachent et se réassemblent différemment	**1**
Tous les atomes se cassent pour former de nouvelles molécules	**1**
Les liaisons entre les atomes sont brisées pour en former d'autres	**1**
Ils réagissent ensemble et des liaisons se font entre les atomes	**1**
Les molécules d'O_2 se détachent et vont se fixer avec des atomes Na pour former Na_2O	**1**

Ils se divisent et reforment d'autres combinaisons	**1**
Le Na passe à l'état gazeux et se colle à O	**1**
Ils se mettent ensemble pour former Na_2O car Na est + et O est – donc ils sont attirés.	**1**
Pas de réponse	**5**

<u>École B :</u> 5èmes option L/ Sc.Soc / Arts – 39 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Ils fusionnent	**2**
Ils se modifient pendant la réaction, donc les deux réactifs se mettent ensemble pour créer un produit	**1**
Les deux réactifs se fusionnent l'un avec l'autre, ils se mélangent l'un dans l'autre	**1**
Ils vont s'assembler	**1**
Ils se modifient	**1**
Le sodium et l'oxygène réagissent ensemble. Ils se mélangent, se modifient	**1**
Il y a une collision qui les assemble et qui crée un autre atome	**1**
Je pense que Na est instable, qu'il a donc au moins un électron libre et que O va donc mettre fin à cette instabilité en s'y accrochant	**1**
Ils s'équilibrent pour qu'ils deviennent stables	**1**
Les réactifs vont tenter de trouver un juste milieu en se complétant l'un l'autre	**1**
Ils se transforment	**2**
Ils se transforment et s'adaptent entre eux pour créer un produit résultant de leur mélange	**2**
La structure des réactifs change	**1**
Ils se mélangent et des échanges ont lieu	**1**
Ils se mélangent pour former le produit	**1**
Ils se mélangent, se dissolvent	**1**
Ils se mélangent	**1**
« Rien ne se perd, tout se transforme » Les 2 réactifs vont se mélanger et former une solution	**1**
Ils se mélangent (les structures respectives des atomes se mélangent) afin de former d'autres éléments chimiques	**1**
Pendant la réaction chimique, les réactifs se dissolvent	**1**
Ils se dissocient	**1**
Ils réagissent entre eux	**1**

Ils réagissent selon la couleur, si cela est effervescent, si ça fume	**1**
Il y a une réaction de combustion, les réactifs sont chauffés pour faire une réaction de combustion	**1**
Leurs liaisons disparaissent et de nouvelles apparaissent	**1**
Ils forment des paires et ses paires s'unissent pour former de nouveaux produits	**1**
Ils se reproduisent et font des bébés	**1**
Les réactifs s'assemblent aux produits et ne font plus qu'un. Ils se dissocient.	**1**
Pas de réponse	**9**

<u>École B :</u> 5èmes option sciences – 18 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Ils s'assemblent pour créer une molécule	**1**
Ils s'assemblent	**1**
Ils fusionnent, se mettent en commun pour former un composé	**1**
Ils s'additionnent en faisant une réaction pour donner un produit et changer de composition	**1**
Ils se lient entre eux et forment une molécule unique et plus grande ensemble	**1**
Il y a réaction et les réactifs changent de nature	**1**
Ils se mélangent et deviennent des produits	**1**
Ils se mélangent et forment une solution	**1**
Ils interagissent au niveau électronique pour que les réactifs forment le produit	**1**
Il y a une réaction entre les réactifs et il va devenir solide	**1**
Elle va produire une autre réaction	**1**
Ils forment un solide	**1**
Pas de réponse	**6**

<u>École C :</u> 5èmes option sciences – 26 élèves

Réponses	Nombre d'élèves
Ils se lient ensemble	**1**
Ils s'associent	**1**
Ils se fusionnent	**1**
Ils se lient	**1**
Ils s'associent pour former un nouvel ensemble	**1**
Ils mettent en commun leurs électrons célibataires	**1**
Ils perdent ou gagnent des ions pour former des liaisons	**1**
Il y a des échanges d'ions et donc se mélangent	**1**
De nouvelles liaisons se forment	**1**
Une transformation des produits se fait pour réaliser un autre produit	**1**
Ils se transforment en se mélangeant	**1**
Ils se transforment	**1**
Ils se mélangent, se transforment	**1**
Ils se mélangent et s'associent pour ensuite former le produit	**1**
Les réactifs se mélangent pour former de nouvelles molécules	**1**
Les réactifs se mélangent – pour moi, ils se liquéfieront	**1**
Ils se mélangent, sont mélangés à la fin de la réaction	**1**
Ils se mélangent	**1**
Ils se mélangent et réagissent pour donner du 2 $Na_2O(s)$	**1**
Il y a un apport de O_2 vu la combustion c-à-d que ça brûle	**1**
Il y a une combustion	**1**
On fait une combustion du Na	**1**
Ils réagissent pour former un nouveau produit	**1**
Ils réagissent ensemble	**1**
Ils réagissent entre eux et donc ils mettent ensemble pour former un/des produits	**1**
Pas de réponse	**1**

Bilan TOTAL

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme « s'assembler », « se réarranger », « se lier », etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	34	26 %
« Se mélanger » (idée principale)	29	22 %
Pas de réponse	21	16 %
« Réagissent entre eux » (sans indication du processus réactionnel)	16	12 %
« Se transforment » (sans indication d'une référence au mécanisme du processus réactionnel)	11	8,5 %
Référence explicite à la rupture et/ou formation de liaisons chimiques (au niveau microscopique)	11	8,5 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (combustion, formation d'un solide)	9	7 %

BILAN PAR ETABLISSEMENTS

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	A	B (S)	B (n-S)	C
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme « s'assembler », « se réarranger », « se lier », etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	30 %	28 %	23 %	23 %
Pas de réponse	11 %	33 %	23 %	4 %
« Réagissent entre eux » (sans indication du processus réactionnel)	15 %	17 %	8 %	12 %
« Se transforment » (sans indication d'une référence au comment du processus réactionnel)	13 %	0 %	5 %	12 %
« Se mélanger » (idée principale)	17 %	11 %	26 %	35 %
Référence explicite à la rupture et/ou formation de liaisons chimiques (au niveau microscopique)	13 %	6 %	5 %	15 %

ANNEXE D

Séquence de leçons – version de l'élève

Activité n°1 : Combustion du magnésium

A. Expérience de la combustion du carbone

1° Principe de l'expérience

Le carbone est un composé très important, utilisé en chimie mais aussi quotidiennement par tous les élèves. En effet, on retrouve le carbone (sous sa forme graphite) dans les mines de crayons. Il est aussi très recherché sous sa forme la plus précieuse : le diamant. Le graphite et le diamant sont composés quasi à 100 % de carbone. De plus, on retrouve le carbone dans des molécules comme le gaz carbonique, le gaz naturel, les hydrocarbures (essence, pétrole) quand il est lié à d'autres atomes.

Nous allons réaliser la combustion partielle d'un morceau de carbone pur (ici, du charbon) dans un bocal contenant de l'eau de chaux.

2° Matériel

-
-
-

3° Mode opératoire

-
-
-

4° Observations

On observe :

-
-
-

5° Interprétation

La combustion du carbone implique :

-
-
-

6° Généralisation

Comment transmettre ces informations à des personnes n'ayant pas vu la réaction ?

TON AVIS :

B. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

Placez-vous par groupe de deux élèves.

Vous avez devant vous deux sacs : un sac « réactifs » et un sac « produits » contenant des modèles d'atomes et de molécules. Sans regarder à l'intérieur, plongez la main dans les sacs et touchez les modèles. Réalisez alors un dessin représentant les modèles contenus dans chaque sac.

REACTIFS PRODUITS

Si la grosse boule représente …… et la boule moyenne …….., proposez une écriture symbolique pour chaque modèle que vous avez dessiné.

REACTIFS PRODUITS

……
……
……

REACTIFS PRODUITS

Comment « écrire » ce qui se passe dans une réaction chimique ?

TA PROPOSITION :

C. Equation de réaction de la combustion du carbone

Ce qui se passe dans une réaction chimique est écrit sous la forme d'une équation appelée « équation de réaction ». Attention ! Une équation de réaction n'est PAS une équation mathématique ! L'écriture d'une équation de réaction obéit à quatre règles essentielles :

1- L'équation de réaction s'écrit …….. Les réactifs s'écrivent …… car ce sont les composés AVANT la réaction chimique, les produits s'écrivent …….. car ce sont les composés APRES la réaction chimique. L'ordre d'écriture des deux réactifs n'a pas d'importance.

2- Pour signifier le fait que les réactifs se transforment en produits, une ……. est ajoutée entre les réactifs et les produits. Elle a une signification différente du signe égal ! En effet, les réactifs ne sont pas « égaux » aux produits. Il y a modification des liens entre atomes pendant la réaction chimique : des atomes se séparent dans les réactifs et ils se relient ensuite selon une autre combinaison pour donner les produits. La flèche peut être lue ……. dans une équation de réaction.

3- Quand on observe plusieurs réactifs ou plusieurs produits dans une réaction chimique, un …….est ajouté entre les réactifs ou entre les produits. Il indique ainsi que ces composés sont « ensemble », qu'ils sont mis en contact. Le « + » peut être remplacé par un ……. dans la lecture de l'équation de réaction.

4- On observe qu'une égalité peut quand même être mise en évidence entre réactifs et produits. En effet, on retrouve TOUJOURS ……. ……..

Nous verrons plus tard dans le cours comment régler le cas où cette égalité n'est pas vérifiée.

Remarque : Il est possible de préciser **l'état de la matière** sous lequel se présente les réactifs et les produits en écrivant les symboles (g) pour gazeux, (l) pour liquide et (s) pour solide en indice de la molécule. Dans ce cas, l'équation de réaction devient donc :

Retrouve-t-on toutes les observations de départ dans l'équation de réaction ?

Dans l'équation de réaction, on trouve :

-

-

-

-

Dans l'équation de réaction, on ne trouve pas :

-

-

-

L'équation de réaction est un <u>modèle</u> de la réaction chimique. Elle ne contient que quelques informations choisies.

Comment peut-on lire une équation de réaction ?

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

Il existe de nombreuses lectures possibles !

Mais, le plus souvent, cette équation de réaction se lit :

« ……
…….. »

Et comme nous avons vu que, dans la réalité, il n'y a pas qu'un atome de carbone qui réagit, on peut aussi lire cette équation de réaction comme ceci :

« Cent atomes de carbone et cent molécules de dioxygène réagissent pour former cent molécules de gaz carbonique ».

Ou encore :

« Mille atomes de carbone et mille molécules de dioxygène réagissent pour former mille molécules de gaz carbonique ».

Toutes ces lectures sont correctes tant que ……

…….

Activité n°2 : Combustion du magnésium

A. Expérience de la combustion du magnésium

1° Principe de l'expérience

L'expérience de combustion du magnésium est très facile à réaliser : elle consiste simplement à allumer un morceau de ruban de magnésium métallique à l'aide d'une source de chaleur.

2° Matériel

- Un ruban de magnésium
- Une source de chaleur
- Une plaque de verre/une hotte/une fenêtre
- Une pince en bois

3° Mode opératoire

- Couper un morceau de ruban de magnésium et maintenir à l'aide de la pince en bois.
- Enflammer le morceau de ruban de magnésium à l'aide d'un briquet, et ce derrière la plaque de verre afin d'absorber un maximum de rayons UV.
- Observer

4° Observations

On observe :

-
-
-
-

5° Interprétation

……
……
……

6° Généralisation

……
……
……

B. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

Placez-vous par groupe de deux élèves.

Vous avez devant vous deux sacs : un sac « réactifs » et un sac « produits » contenant des modèles d'atomes et de molécules. Sans regarder à l'intérieur, plongez la main dans les sacs et touchez les modèles. Réalisez alors un dessin représentant les modèles contenus dans chaque sac.

REACTIFS PRODUITS

Si la grosse boule représente …….. et la boule moyenne …….., proposez une écriture symbolique pour chaque modèle que vous avez dessiné.

REACTIFS PRODUITS

……
……
……

REACTIFS PRODUITS

C. Equation de réaction de la combustion du magnésium

Nous pouvons appliquer les 4 règles à la combustion du magnésium :

1- Ecriture des réactifs et des produits.

La particularité de cette réaction est qu'elle implique 2 atomes de Mg chez les réactifs et deux molécules de MgO chez les produits. Dans le cas où nous avons plusieurs composés identiques, mais qui ne sont pas reliés, on indique le nombre de composés par un chiffre <u>devant</u> la molécule : …….
Ce chiffre précise le nombre <u>minimum</u> de molécules ou d'atomes impliqués dans la réaction chimique. Comme, dans la réalité, il n'y a jamais un seul atome qui réagit, le coefficient indique surtout une PROPORTION : ……..
……..
Ne pas confondre indice (nombre d'atomes dans une molécule) et coefficient stœchiométrique (nombre de molécules ou d'atomes impliqués dans une réaction) !

2- Introduction de la flèche de réaction

3- Introduction du « + ».

4- Comptez le nombre d'atomes de chaque espèce de part et d'autre de la flèche :

……
……
Remarquons que c'est l'introduction des coefficients stœchiométriques qui a permis de vérifier cette égalité.

<u>Remarque :</u> Précision des états de la matière :

Activité n°3 : Electrolyse de l'eau

A. Expérience de l'électrolyse de l'eau

Elle a déjà été réalisée en classe précédemment.

B. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

Placez-vous par groupe de deux élèves.

Vous avez devant vous deux sacs : un sac « réactifs » et un sac « produits » contenant des modèles d'atomes et de molécules. Sans regarder à l'intérieur, plongez la main dans les sacs et touchez les modèles. Réalisez alors un dessin représentant les modèles contenus dans chaque sac.

REACTIFS

PRODUITS

Si la boule moyenne représente ……. et la petite boule ……., proposez une écriture symbolique pour chaque modèle que vous avez dessiné.

REACTIFS

PRODUITS

REACTIFS

PRODUITS

C. Equation de réaction de l'électrolyse de l'eau

Nous pouvons appliquer les 4 règles à l'électrolyse de l'eau :

1- Ecriture des réactifs et des produits. La particularité de cette réaction est que H_2O est le seul réactif de la réaction chimique ! Par ailleurs, on observe cette fois deux produits différents : le dioxygène et le dihydrogène.

2- Introduction de la flèche de réaction

3- Introduction du « + ».

4- Comptez le nombre d'atomes de chaque espèce de part et d'autre de la flèche :

REACTIFS	PRODUITS

On ne trouve pas le même nombre d'atomes de chaque espèce de part et d'autre de la flèche de réaction. Dessinez, sous l'équation de réaction, les réactifs et les produits selon le modèle en boules :

$$H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$$

……
…….

Comment peut-on pondérer une équation de réaction ?

La seule solution est de changer les coefficients stœchiométriques ! Donc, de modifier le nombre minimum de molécules ou d'atomes impliqués dans la réaction.

S'il manque un oxygène (une boule moyenne) chez les réactifs, nous devons ajouter ……

$$H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$$

REACTIFS	PRODUITS

Mais cette fois, il manque deux atomes d'hydrogène chez les produits. Il faut donc ajouter ……

$$H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$$

REACTIFS	PRODUITS

On trouve désormais le même nombre d'atomes de chaque espèce à gauche et à droite ! L'équation est pondérée !

Cette technique de pondération des équations de réaction est essentielle en chimie. N'hésitez pas à dessiner les atomes et molécules pour vous aider.

EN BREF

Comment transmettre des informations à des personnes n'ayant pas vu la réaction ?

En choisissant un langage commun, universel et donc compréhensible par tous. Ce langage suit les règles suivantes :

- Les réactifs sont les composés au début de la réaction.

  Ex : le charbon est un réactif.

- Les produits sont les composés à la fin de la réaction.

  Ex : le gaz carbonique est un produit.

- Les réactifs et produits sont représentés par les atomes et les molécules qui les constituent :

  Ex : le charbon est constitué d'atomes de carbone.

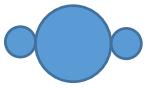
- Les atomes sont représentés par des symboles atomiques.

  Ex : l'atome de carbone est représenté par C.

- Les molécules sont représentées par les symboles atomiques des atomes qui les constituent. Le nombre d'atomes de chaque espèce présents dans la molécule est donné par l'indice.

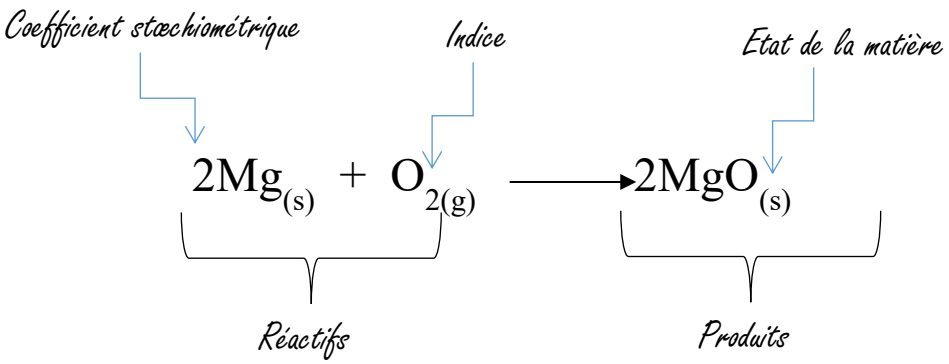
  Ex : la molécule de dioxyde de carbone est représentée par CO_2 (un atome de carbone lié à deux atomes d'oxygène)

Les atomes et molécules sont également représentés via les modèles en boule :

- La molécule d'eau peut être représentée par 

Comment écrire ce qu'il se passe dans une réaction chimique ?

En écrivant une équation de réaction. Cette équation de réaction obéit aux règles suivantes :



- Les réactifs s'écrivent à gauche. Ils sont représentés par les formules chimiques des molécules ou atomes qui les constituent.

- Les produits s'écrivent à droite. Ils sont représentés par les formules chimiques des molécules ou atomes qui les constituent.

- Un « + » est écrit entre les molécules ou atomes des réactifs si la réaction implique plusieurs réactifs différents. Le « + » signifie « mis en contact de », « avec », « et », etc.
- Une flèche est ajoutée entre les réactifs et les produits. Elle représente la réaction chimique en elle-même. Elle peut être lue « réagissent pour former ».
- On trouve le même nombre d'atomes de chaque élément chez les réactifs et chez les produits. On dit que l'équation est pondérée.
- Les chiffres devant les molécules ou atomes sont appelés coefficients stœchiométriques. Ils donnent le nombre minimum d'atomes ou molécules impliqués dans la réaction chimique. Plus généralement, ils indiquent la proportion de réaction entre réactifs et entre réactifs et produits.
- Dans certains cas, les états de la matière sont indiqués en indice des molécules ou atomes.

Retrouve-t-on toutes les observations de départ dans l'équation de réaction ?

Non. L'équation de réaction est un modèle de la réaction chimique. Elle ne contient que quelques informations choisies (réactifs, produits, proportion, état de la matière).

Comment peut-on lire une équation de réaction ?

Soit l'exemple suivant :

$$2Mg + O_2 \longrightarrow 2MgO$$

« 2X atomes de magnésium *et* X molécules de dioxygène *réagissent pour former* 2X molécules d'oxyde de magnésium ».

Souvent, l'équation de réaction est lue pour X = 1 (nombre minimum).

« 2 atomes de magnésium *et* 1 molécule de dioxygène *réagissent pour former* 2 molécules d'oxyde de magnésium ».

Comment peut-on pondérer une équation de réaction ?

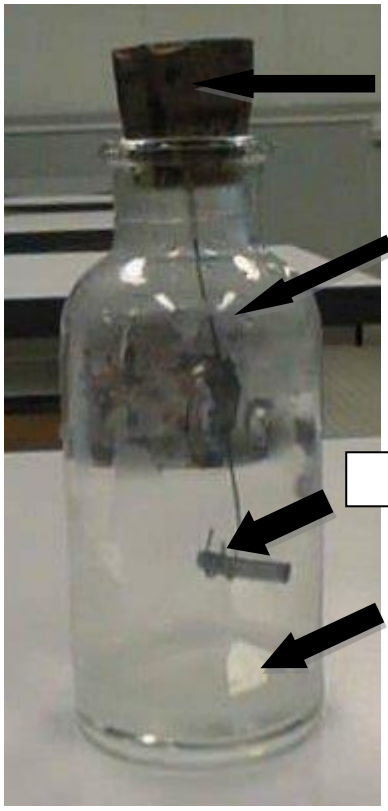
En modifiant les coefficients stœchiométriques des réactifs et produits. Il est interdit de changer les indices ou d'introduire de nouveaux composés.

Ex :

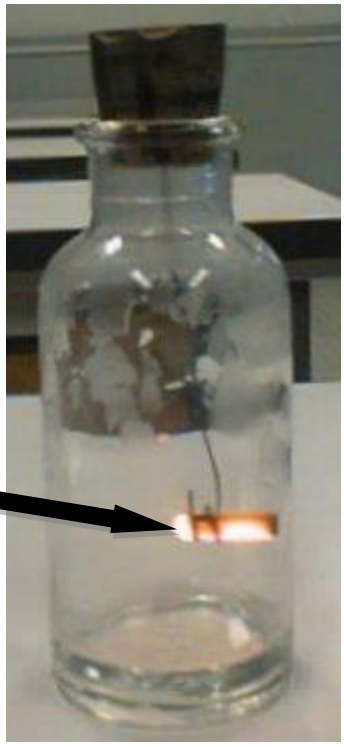
$Na + O_2$	$\longrightarrow$	Na_2O	équation non-pondérée
$4Na + O_2$	$\longrightarrow$	$2Na_2O$	équation pondérée

Combustion du carbone :

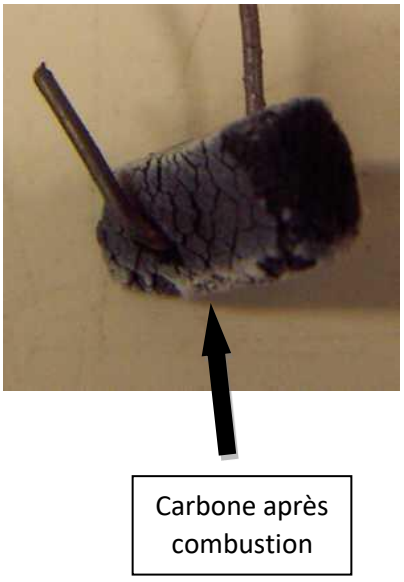
Etape 1 : Avant combustion



Etape 2 : Pendant combustion



Etape 3: Après combustion



ANNEXE E

Séquence de leçons – version du professeur

Axe de recherche :

Dans cet axe de recherche, nous allons introduire l'utilisation de modèles moléculaires « en aveugle » dans le module visant à l'appropriation de l'équation de réaction dans le cours de chimie de la 3ème année du secondaire.

Les modèles moléculaires seront utilisés entre la démonstration expérimentale de la réaction chimique (dimension macroscopique) et sa traduction en équation de réaction (dimension symbolique), soulignant ainsi la dimension microscopique, molécules et atomes, habituellement négligées dans les séquences de leçon actuellement présentées aux élèves (voir figure 1). Leur exploitation consiste en une exploration de deux sacs opaques représentant d'une part les réactifs et d'autre part les produits, et ce uniquement à l'aide du toucher. L'élève réalise alors lui-même le dessin de ce qu'il a touché, ce qui permet une assimilation plus profonde des modèles moléculaire utilisés.

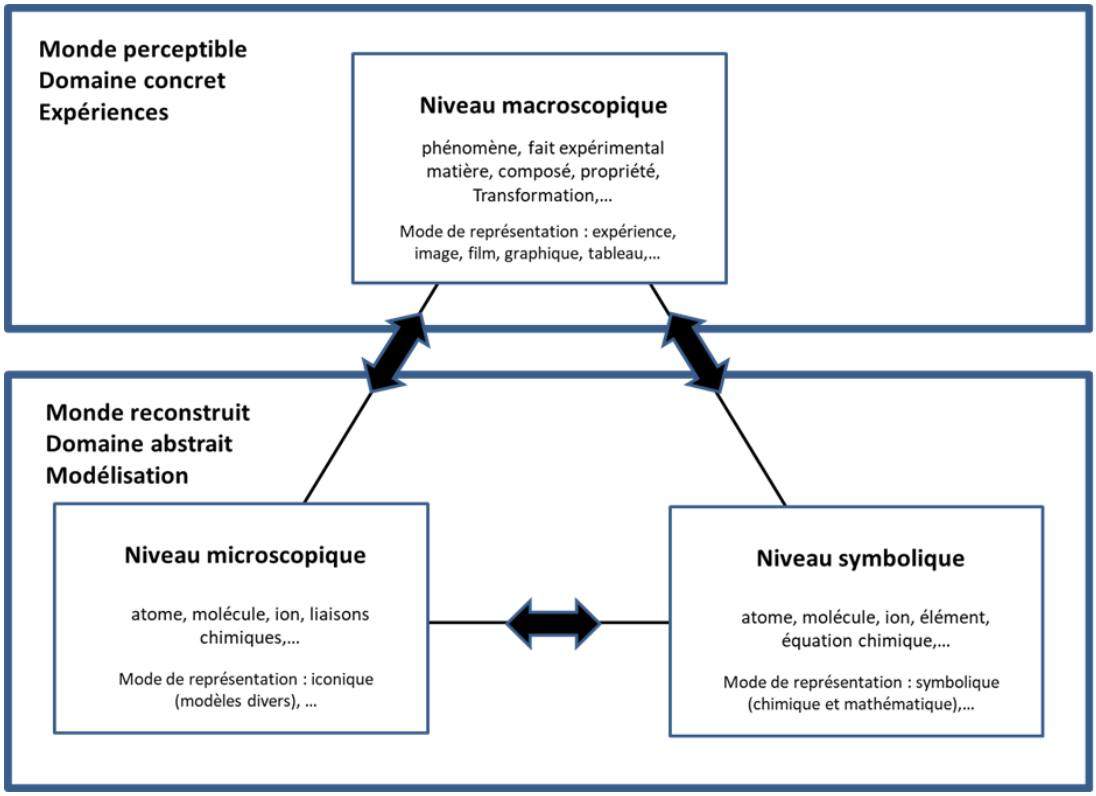


Figure 2 : Modèle théorique des trois niveaux de savoir appliqué à la chimie, de leurs modes de représentation et de leurs connexions.

Les modèles moléculaires proposés sont des plus simples en ce qu'ils ne sont constitués que de sphères liées, aux liaisons non-apparentes (voir figure 2).

Figure 2 : Images de l'outil didactique (modèles moléculaires et sacs opaques) dans le cadre de la réaction de combustion du carbone

Objectifs

- L'élève construit son savoir par lui-même via ses sens (ici, le toucher) sur base des informations qu'il tire de la démonstration expérimentale et des indications judicieuses du professeur. L'élève n'est plus ce vase vide que le professeur remplit de concepts sans apport actif. Cette démarche est encouragée dans la plupart des livres de didactique des sciences et s'inscrit résolument dans une pédagogie par compétences pour donner du sens aux apprentissages. La simplicité de la méthode garantit également son aspect universel et son application dans toutes les écoles quelques soient ses moyens financiers.

- Les dimensions macroscopiques, microscopiques et symboliques de la réaction chimique sont inégalement maîtrisées par les élèves au début de l'étude de la chimie en troisième année du secondaire. Il est en effet difficile d'accepter la réduction de la réalité réactionnelle complexe à une simple équation constituée de quelques lettres et quelques chiffres. Inversement, les conventions de l'équation de réaction comprises, il est parfois ardu de développer les informations contenues dans l'équation jusqu'à retrouver la réalité réactionnelle observée. Les atomes et molécules isolés demeurant invisibles, il est donc nécessaire de passer par une étape intermédiaire entre la réalité macroscopique (réaction) et la symbolique (équation). L'utilisation de modèles moléculaires « en aveugle » afin de caractériser les atomes et molécules impliquées, et donc d'explorer la dimension microscopique des réactions chimiques, peut constituer une aide substantielle à une compréhension plus fine de la réaction chimique et de sa représentation symbolique.

- Par ailleurs, le passage direct de la réaction à l'équation symbolique vide la réaction chimique de sa dimension mécanistique. Il est en effet important que l'élève ne perde pas de vue que la réaction chimique comprend la rupture de liaisons dans les molécules de départ et la formation de liaisons dans les molécules finales. L'utilisation des modèles moléculaires « en aveugle » constitués de sphères reliées entre elles sans faire apparaître les liaisons (pour les corps purs simples et composés) et de sphères isolées (pour les corps purs élémentaires) induit et souligne cette réalité mécanistique.

Séquence de leçon

Activité n°1 : Equation de réaction de la combustion du carbone

1. Expérience de la combustion du carbone

Principe de l'expérience

Nous allons réaliser la combustion partielle d'un morceau de carbone pur dans un bocal contenant de l'eau de chaux. Cette expérience permettra de mettre en évidence la disparition progressive du réactif, l'apparition progressive du produit (via le trouble de l'eau de chaux), l'identification du produit formé (en l'occurrence le gaz carbonique) et la caractérisation des facteurs nécessaires à une combustion.

Matériel

- Morceau de carbone (fusain)
- Briquet/bec bunsen
- Bouchon/Support
- Fil en métal
- Bocal avec bouchon
- Eau de chaux

Note pour le professeur : Le matériel est ici développé à titre indicatif. Il dépend bien entendu des instruments de laboratoire disponibles dans chaque école, l'essentiel étant d'opérer en deux étapes séparées afin de souligner la disparition du réactif et l'apparition du produit.

Mode opératoire

- Verser 20 ml d'eau de chaux dans le bocal.
- Initier la combustion du carbone à l'aide du briquet.
- Introduire le carbone dans le bocal en veillant à garantir l'étanchéité.
- Attendre une dizaine de secondes.
- Agiter calmement la solution d'eau de chaux.
- Observer.

Observations

On observe :
- L'absence de flamme pendant la combustion.
- Le carbone devient rouge.
- L'eau de chaux se trouble.
- Le carbone disparaît progressivement.

Note pour le professeur : L'eau de chaux se trouble en présence de gaz carbonique. En effet, elle contient de l'hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ qui réagit avec le dioxyde de carbone pour former de l'eau et du calcaire $CaCO_3$ qui trouble la solution.

$Ca(OH)_2 + CO_2 \longrightarrow CaCO_3 + H_2O$

Pour mettre en évidence le trouble de la solution d'eau de chaux, il est conseillé de conserver une solution témoin, isolée du gaz carbonique.

Interprétation

La combustion du carbone implique :

- Une mise à feu (par le briquet)
- La disparition totale ou partielle d'un réactif (le carbone)
- La présence d'air, et donc d'oxygène
- L'apparition d'un produit (ici, le gaz carbonique)

Généralisation

Le carbone (sous forme de charbon), en présence de l'oxygène de l'air, se transforme en gaz carbonique. Cette réaction nécessite une mise à feu et libère de la chaleur.

Comment transmettre ces informations à des personnes n'ayant pas vu la réaction ?

Note pour le professeur : Les élèves vont probablement proposer un texte qui décrit la réaction chimique. Dans ce cas, le professeur soulignera qu'il existe d'autres langues que la langue française et que certaines personnes ne comprendront pas le texte. Il est donc nécessaire de passer par un langage universel, celui choisi pour écrire les équations chimiques !

De plus, pour mieux décrire la réaction, les chimistes vont vouloir déterminer plus précisément ce qui constitue les composants impliqués dans la combustion du carbone : de quoi est constitué le charbon ? De quoi est constitué l'oxygène de l'air ? De quoi est constitué le gaz carbonique ?

2. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

Après la démonstration expérimentale de combustion, le professeur distribue un sac « réactifs » et un sac « produits » aux élèves réunis en groupes de trois ou de deux.

Les élèves plongent une main dans chaque sac et dessinent ce qu'ils croient toucher. Les sacs visités, les élèves tentent de représenter les réactifs et les produits sur papier (sphères de différentes tailles).

Par la suite, pour nommer les atomes impliqués, les élèves associent à chaque sphère un symbole chimique avec l'aide de leur professeur. Le professeur associe le carbone C à la grosse boule alors que la petite boule est associée à l'oxygène O. Mais comment écrire la molécule complexe qu'est le gaz carbonique (2 atomes de carbone et 1 atome d'oxygène) ? Il faut alors leur laisser un peu de temps pour proposer une symbolique.

Note pour le professeur : Certains élèves vont probablement adopter des symboliques « hybrides » : des lettres comprises dans les sphères ou des assemblages de type « OCO » / « OO ». Il est préférable de ne pas rejeter toutes ces représentations mais d'insister sur le fait qu'il faut choisir une représentation commune. C'est à ce moment que le professeur insiste sur la notion de modèle en tant que choix, et en tant que représentation avec ses limites (perte de la proportion des tailles, perte de la géométrie). Le professeur conclut que les scientifiques ont choisi d'écrire « C », « O_2 » et « CO_2 » en enlevant les sphères et en introduisant des indices pour donner le nombre d'atomes dans chaque molécule.

On obtient alors « C » et « O_2 » chez les réactifs et « CO_2 » chez les produits. Le professeur en profite pour rappeler la notion d'indice : chiffre entier positif situé en bas à droite d'un atome dans une molécule et qui indique le nombre d'atomes de cette espèce dans la molécule. Attention, l'absence d'indice équivaut au chiffre 1 ! Ainsi dans CO_2, on trouve 1 atome de carbone et 2 atomes d'oxygène. Il souligne aussi que, dans les molécules simples, l'oxygène est indiqué en fin de molécule, après le métal ou le non-métal avec lequel il est associé (voir l'exemple de CO_2).

Comment « écrire » ce qu'il se passe dans une réaction chimique ?

3. Equation de réaction de la combustion du carbone

L'écriture d'une équation de réaction obéit à quatre règles essentielles :

1- L'équation de réaction s'écrit horizontalement (pas de représentation en tableau !). Les réactifs s'écrivent à gauche car ce sont les composés AVANT la réaction chimique, les produits s'écrivent à droite car ce sont les composés APRES la réaction chimique. L'ordre d'écriture des deux réactifs n'a pas d'importance.

$$C \qquad O_2 \qquad\qquad CO_2$$

2- Pour signifier le fait que les réactifs se transforment en produits, une flèche de réaction est ajoutée entre les réactifs et les produits. La flèche de réaction a une signification différente du signe égal ! En effet, les réactifs ne sont pas « égaux » aux produits. Il y a modification de l'agencement des atomes pendant la réaction chimique : des atomes se séparent dans les réactifs et ils se relient ensuite selon une autre combinaison pour donner les produits. La flèche peut être lue « réagissent pour former » dans une équation de réaction.

$$C \qquad O_2 \qquad \longrightarrow \qquad CO_2$$

3- Quand on observe plusieurs réactifs ou plusieurs produits dans une réaction chimique, un signe « + » est ajouté entre les réactifs ou entre les produits. Il indique ainsi que ces composés sont « ensemble », qu'ils sont mis en contact. Le « + » peut être remplacé par un « et » dans la lecture de l'équation de réaction.

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

4- On observe qu'une égalité peut quand même être mise en évidence entre réactifs et produits. En effet, on retrouve TOUJOURS le même nombre d'atomes de chaque élément de part et d'autre de la flèche (dans ce cas, 1 atome de carbone et 2 atomes d'oxygène). Nous verrons plus tard dans le cours comment régler le cas où cette égalité n'est pas vérifiée.

Remarque : Il est possible de préciser l'état de la matière sous lequel se présente les réactifs et les produits en écrivant les symboles (g) pour gazeux, (l) pour liquide et (s) pour solide en indice de la molécule. Dans ce cas, l'équation de réaction devient donc :

$$C_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow CO_{2(g)}$$

Retrouve-t-on toutes les observations de départ dans l'équation de réaction ?

Dans l'équation de réaction, on trouve :

- Les réactifs et les produits (états initial et final).
- Les atomes et molécules constituant les réactifs et les produits.
- Les rapports entre les réactifs dans la réaction chimique (un atome de carbone pour une molécule de dioxygène).
- Eventuellement, les états de la matière.

Dans l'équation de réaction, on ne trouve pas :

- Le nombre réel d'atomes et de molécules de réactifs et produits.
- D'informations sur l'énergie (chaleur, flamme, amorce).
- L'évolution quantitative de la réaction (disparition progressive du réactif, formation progressive du produit).

L'équation de réaction est un modèle de la réaction chimique. Elle ne contient que quelques informations choisies.

<u>Note pour le professeur</u> : Normalement, les élèves vont rendre compte de l'absence de référence à l'énergie (flamme, amorce, chaleur) ainsi qu'à des aspects expérimentaux (eau de chaux, matériel). Il est rare qu'ils rendent compte de l'absence de termes quantitatifs (nombre réel de molécules et d'atomes, disparition progressive du réactif). C'est au professeur de les guider vers ces observations via un questionnement de type : « N'y avait-il qu'un atome de carbone pendant l'expérience ? » ou « Remarque-t-on que le carbone ne disparaît pas totalement ? »

Comment peut-on lire une équation de réaction ?

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2$$

Il existe de nombreuses lectures possibles !

Mais, le plus souvent, cette équation de réaction se lit :

« Un atome de carbone et une molécule de dioxygène réagissent pour former une molécule de gaz carbonique ».

Et comme nous avons vu que, dans la réalité, il n'y a pas qu'un atome de carbone qui réagit, on peut aussi lire cette équation de réaction comme ceci :

« Cent atomes de carbone et cent molécules de dioxygène réagissent pour former cent molécules de gaz carbonique ».

Ou encore :

« Mille atomes de carbone et mille molécules de dioxygène réagissent pour former mille molécules de gaz carbonique ».

Toutes ces lectures sont correctes tant que vous respectez le rapport entre les réactifs (1 « C » pour un 1 « O_2 ») et entre réactifs et produits (1 « C » et 1 « O_2 » se transforme en un 1 « CO_2 »)

Activité n°2 : Equation de réaction de la combustion du magnésium

1. Expérience de la combustion du magnésium

Principe de l'expérience

L'expérience de combustion du magnésium est très facile à réaliser : elle consiste simplement à allumer un morceau de ruban de magnésium métallique à l'aide d'une source de chaleur.

Note pour le professeur : *La combustion du magnésium est accompagnée d'un flash lumineux et de l'émission de rayons UV. Pour protéger les élèves, une simple plaque de verre, qui absorbe les rayons UV, fera l'affaire.*

Matériel

- Un ruban de magnésium
- Une source de chaleur
- Une plaque de verre/une hotte/une fenêtre
- Une pince en bois

3° Mode opératoire

- Couper un morceau de ruban de magnésium et maintenir à l'aide de la pince en bois.
- Enflammer le morceau de ruban de magnésium à l'aide d'un briquet, et ce derrière la plaque de verre afin d'absorber un maximum de rayons UV.
- Observer.

4° Observations

On observe :

- Une lumière blanche éblouissante (flash lumineux)
- Des fumées blanches
- Un peu de cendres de couleur grise sur le ruban
- Une émission de chaleur

5° Interprétation

Dans le cas de la combustion du magnésium, le combustible est le magnésium en présence de dioxygène. Comme dans toute combustion, une mise à feu est nécessaire. De la lumière est émise et on observe l'apparition d'un produit : l'oxyde de magnésium (aussi appelé magnésie).

6° Généralisation

Du magnésium, en présence de dioxygène, se transforme en oxyde de magnésium. Cette réaction nécessite une mise à feu et libère de la lumière.

2. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

La démarche est identique à celle pratiquée dans l'activité n°1. Après que les élèves aient dessiné les modèles moléculaires, le professeur associe le magnésium Mg à la grosse boule alors que la petite boule est associée à l'oxygène O.

Note pour le professeur : Les élèves vont probablement représenter de différentes façons le fait que certaines molécules ou atomes se retrouvent en deux exemplaires chez les réactifs ou les produits. De nouveau, il ne faut pas rejeter en bloc toutes les propositions mais expliciter le modèle qui a été choisi (voir coefficient stœchiométrique).

Les élèves ont normalement déterminé deux atomes de Mg et une molécule de O_2 chez les réactifs. Chez les produits, on trouve deux molécules de MgO.

Note pour le professeur : Si le professeur a déjà vu la nomenclature (ou simplement les oxydes), il peut insister sur la structure générale des oxydes en MO ou M'O. Il peut aussi faire remarquer que la combustion d'un non-métal (le carbone) a produit un oxyde non-métallique (CO_2) et que la combustion d'un métal (le magnésium) a produit un oxyde métallique (MgO).

3. Équation de réaction de la combustion du magnésium

Nous pouvons appliquer les 4 règles à la combustion du magnésium :

1- Ecriture des réactifs et des produits. La particularité de cette réaction est qu'elle implique 2 atomes de Mg chez les réactifs et deux molécules de MgO chez les produits. Dans le cas où nous avons plusieurs composés identiques, mais qui ne sont pas reliés, on indique le nombre de composés par un chiffre <u>devant</u> la molécule : le coefficient stœchiométrique.

$$2Mg \quad O_2 \qquad\qquad 2MgO$$

Ce chiffre précise le nombre <u>minimum</u> de molécules ou d'atomes impliqués dans la réaction chimique. Comme, dans la réalité, il n'y a jamais un seul atome qui réagit, le coefficient indique également une PROPORTION : pour réagir avec X molécules de O_2, il faudra 2X atomes de magnésium.
Ne pas confondre indice (nombre d'atomes dans une molécule) et coefficient stœchiométrique (nombre minimum de molécules ou d'atomes impliqués dans une réaction ou proportion de réaction) !

2- Introduction de la flèche de réaction

$$2Mg \quad O_2 \quad \longrightarrow \quad 2MgO$$

3- Introduction du « + ».

$$2Mg + O_2 \quad \longrightarrow \quad 2MgO$$

4- On trouve toujours le même nombre d'atomes de chaque élément de part et d'autre de la flèche de réaction (dans ce cas, 2 atomes de magnésium et 2 atomes d'oxygène). Remarquons que c'est l'introduction des coefficients stœchiométriques qui a permis de vérifier cette égalité.

<u>Remarque :</u> Précision des états de la matière :

$$2Mg_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2MgO_{(s)}$$

Activité n°3 : Equation de réaction de l'électrolyse de l'eau

1. Expérience de l'électrolyse de l'eau (voir annexe)

Note pour le professeur : Il est probable que les élèves aient déjà vu l'expérience d'électrolyse de l'eau précédemment dans le cours. Le professeur peut insister sur le fait que, contrairement aux deux réactions de combustion, l'électrolyse de l'eau ne produit pas de chaleur. De plus, il faut fournir de l'énergie (en l'occurrence, de l'énergie électrique) pour que la réaction s'opère.

2. Constitution des composés - Utilisation des modèles moléculaires

La démarche est similaire à celle pratiquée dans les activités n°1 et n°2. Néanmoins, nous avons volontairement enlevé une molécule d'eau chez les réactifs et une molécule de dihydrogène chez les produits afin d'amener à la démarche de pondération.

Les modèles moléculaires associés la molécule d'eau sont constitués de boules moyennes et de petites boules, l'hydrogène étant plus petit que l'oxygène. Après que les élèves aient dessiné les modèles moléculaires, le professeur associe l'oxygène O à la boule moyenne alors que la petite boule est associée à l'hydrogène H.

Note pour le professeur : Dans ce cas, il n'y a qu'un seul réactif, en l'occurrence l'eau, ce qui risque de perturber les élèves. De plus, la molécule d'eau est présente en un seul exemplaire dans le sac « réactifs » ce qui doit a priori entrer en contradiction avec leur conceptualisation de la réaction chimique.

Les élèves ont normalement déterminé une molécule de H_2O chez les réactifs. Chez les produits, on trouve une molécule de H_2 et une molécule de O_2.

3. Equation de réaction de l'électrolyse de l'eau

Nous pouvons appliquer les 4 règles à l'électrolyse de l'eau :

1- Ecriture des réactifs et des produits. La particularité de cette réaction est que H_2O est le seul réactif de la réaction chimique ! Par ailleurs, on observe cette fois deux produits différents : le dioxygène et le dihydrogène.

$$H_2O \qquad O_2 \qquad H_2$$

2- Introduction de la flèche de réaction

$$H_2O \longrightarrow O_2 \qquad H_2$$

3- Introduction du « + ».

$$H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$$

<u>Note pour le professeur</u> : Il est possible que la question de la pondération soit posée par les élèves plus tôt dans la démarche. Le professeur ne peut pas éluder la question mais doit directement profiter du moment pour introduire la démarche de pondération.

4- On ne trouve pas le même nombre d'atomes de chaque élément de part et d'autre de la flèche de réaction (dans ce cas, 2 atomes d'hydrogène et 1 atome d'oxygène chez les réactifs contre deux atomes d'hydrogène et deux atomes d'oxygène chez les produits). Réalisons un tableau représentant le nombre d'atomes de chaque élément chez les réactifs et les produits :

$H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$

REACTIFS	PRODUITS
2 x H	2 x H
1 x O	2 x O

Il manque un atome d'oxygène chez les réactifs. On dit que l'équation de réaction n'est pas PONDEREE.

Comment peut-on pondérer une équation de réaction ?

<u>Note pour le professeur</u> : De nouveau, il est ici du ressort du professeur d'écouter les propositions des élèves et de les tester le cas échéant. Quelques cas d'écoles :

« il suffit d'ajouter un oxygène seul à gauche » : non car l'oxygène seul n'existe pas. De plus, on ne peut ajouter des nouveaux composés (autre que l'eau, le dihydrogène et le dioxygène) dans l'équation de réaction.

« Il suffit de faire H_2O_2 » : non car il est interdit de modifier la structure des molécules, c'est-à-dire de changer les indices. H_2O reste H_2O.

« On enlève un O chez les produits » : idem que précédemment. O_2 reste O_2.

La seule solution est de changer les coefficients stoechiométriques ! Donc, de modifier le nombre minimum de molécules ou d'atomes impliqués dans la réaction.

S'il manque un oxygène (une boule moyenne) chez les réactifs, nous devons ajouter une molécule d'eau entière chez les réactifs :

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + H_2$$

REACTIFS	PRODUITS
4 x H	2 x H
2 x O	2 x O

Mais cette fois, il manque deux atomes d'hydrogène chez les produits. Il faut donc ajouter une molécule de H_2 chez les produits.

$$2H_2O \longrightarrow O_2 + 2H_2$$

REACTIFS	PRODUITS
4 x H	4 x H
2 x O	2 x O

On trouve désormais le même nombre d'atomes de chaque élément à gauche et à droite ! L'équation est pondérée !

Cette technique de pondération des équations de réaction est essentielle en chimie. N'hésitez pas à dessiner les atomes et molécules pour vous aider.

EN BREF

Comment transmettre des informations à des personnes n'ayant pas vu la réaction ?

En choisissant un langage commun, universel et donc compréhensible par tous. Ce langage suit les règles suivantes :

- Les réactifs sont les composés au début de la réaction.

  Ex : le charbon est un réactif.

- Les produits sont les composés à la fin de la réaction.

  Ex : le gaz carbonique est un produit.

- Les réactifs et produits sont représentés par les atomes et les molécules qui les constituent :

  Ex : le charbon est constitué d'atomes de carbone.

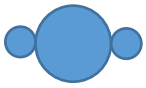
- Les atomes sont représentés par des symboles atomiques.

  Ex : l'atome de carbone est représenté par C.

- Les molécules sont représentées par les symboles atomiques des atomes qui les constituent. Le nombre d'atomes de chaque espèce présents dans la molécule est donné par l'indice.

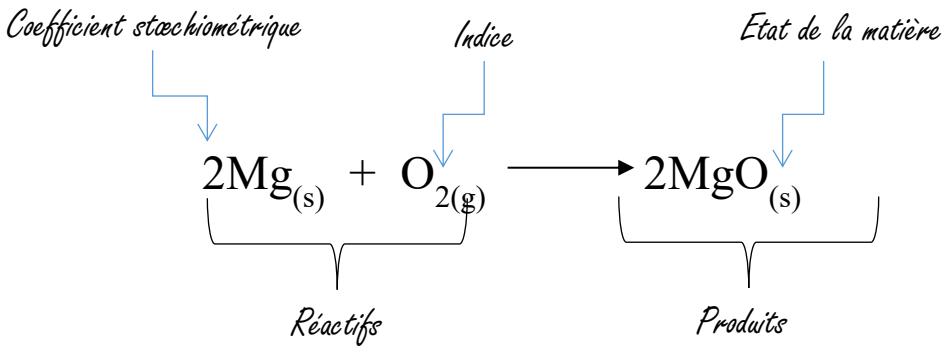
  Ex : la molécule de dioxyde de carbone est représentée par CO_2 (un atome de carbone lié à deux atomes d'oxygène)

Les atomes et molécules sont également représentés via les modèles en boule :

- La molécule d'eau peut être représentée par 

Comment écrire ce qu'il se passe dans une réaction chimique ?

En écrivant une équation de réaction. Cette équation de réaction obéit aux règles suivantes :



- Les réactifs s'écrivent à gauche. Ils sont représentés par les formules chimiques des molécules ou atomes qui les constituent.

- Les produits s'écrivent à droite. Ils sont représentés par les formules chimiques des molécules ou atomes qui les constituent.

- Un « + » est écrit entre les molécules ou atomes des réactifs si la réaction implique plusieurs réactifs différents. Le « + » signifie « mis en contact de », « avec », « et », etc.

- Une flèche est ajoutée entre les réactifs et les produits. Elle représente la réaction chimique en elle-même. Elle peut être lue « réagissent pour former ».
- On trouve le même nombre d'atomes de chaque élément chez les réactifs et chez les produits. On dit que l'équation est pondérée.
- Les chiffres devant les molécules ou atomes sont appelés coefficients stœchiométriques. Ils donnent le nombre minimum d'atomes ou molécules impliqués dans la réaction chimique. Plus généralement, ils indiquent la proportion de réaction entre réactifs et entre réactifs et produits.
- Dans certains cas, les états de la matière sont indiqués en indice des molécules ou atomes.

Retrouve-t-on toutes les observations de départ dans l'équation de réaction ?

Non. L'équation de réaction est un modèle de la réaction chimique. Elle ne contient que quelques informations choisies (réactifs, produits, proportion, état de la matière).

Comment peut-on lire une équation de réaction ?

Soit l'exemple suivant :

$$2Mg + O_2 \longrightarrow 2MgO$$

« 2X atomes de magnésium *et* X molécules de dioxygène *réagissent pour former* 2X molécules d'oxyde de magnésium ».

Souvent, l'équation de réaction est lue pour X = 1 (nombre minimum).

« 2 atomes de magnésium *et* 1 molécule de dioxygène *réagissent pour former* 2 molécules d'oxyde de magnésium ».

Comment peut-on pondérer une équation de réaction ?

En modifiant les coefficients stœchiométriques des réactifs et produits. Il est interdit de changer les indices ou d'introduire de nouveaux composés.

Ex :	$Na + O_2$	$\longrightarrow$	Na_2O	équation non-pondérée
	$4Na + O_2$	$\longrightarrow$	$2Na_2O$	équation pondérée

ANNEXE

Expérience de l'électrolyse de l'eau

1° Principe de l'expérience

L'électrolyse de l'eau permet de visualiser la production de dioxygène et de dihydrogène en introduisant un courant électrique dans une solution d'eau acidifiée. L'intérêt de cette expérience est double car elle montre une réaction endothermique et elle permet de visualiser la production de gaz en des quantités stœchiométriques différentes.

2° Matériel

Note pour le professeur : *Il existe une multitude de modes opératoires permettant de réaliser l'électrolyse de l'eau : électrolyseur, cuve à électrolyse, dispositifs « tout en un », etc. Le mode opératoire proposé ici l'est à titre indicatif. Si le professeur dispose d'un électrolyseur, l'expérience est d'une grande simplicité.*

- 1 bac en plastique (bouteille plastique découpée/tupperware/bacs déco…)
- 2 électrodes de carbone – Il est possible d'utiliser de grosses mines de crayon gras ou des barres de graphite vendues parfois en droguerie. On peut aussi démonter des piles et récupérer les électrodes de carbone qui les constituent (prudence !)
- Des ciseaux et de la colle forte pour introduire les électrodes de carbone dans le fond du bac en plastique et assurer une bonne étanchéité
- Un générateur de courant 12 V
- Deux fils électriques
- Deux pinces crocodiles
- Deux éprouvettes
- Une solution d'acide peu concentrée (0,5 mole/litre)

3° Mode opératoire

- Réaliser deux trous dans le fond du bac (un peu plus gros que les électrodes).
- Introduire les électrodes et placer la colle forte entre le plastique et les électrodes de manière à assurer l'étanchéité.
- Brancher les électrodes au générateur à l'aide des pinces crocodile que vous aurez préalablement attaché aux fils électriques.
- Remplir le bac à mi-hauteur avec la solution d'eau acidifiée.
- Placer les deux éprouvettes remplies d'eau acidifiée (au même niveau) au-dessus des électrodes de manière à ce qu'elles recueillent les gaz formés.
- Allumer le générateur de 12 V.

4° Observations

- Dégagement gazeux dans les deux éprouvettes.
- Dégagement double chez l'une des deux électrodes (anode).

5° Interprétation

Nous pouvons identifier les deux gaz produits dans les deux éprouvettes à l'aide de deux allumettes.

- Dans le cas du dihydrogène, l'approche d'une flamme va provoquer la combustion de l'hydrogène et une éjection brutale de gaz qui provoque un son très reconnaissable, le cri de l'hydrogène.

- Si l'on plonge une allumette allumée dans l'autre éprouvette, la flamme s'intensifiera au contact de l'oxygène.

On observe alors que l'électrolyse a produit deux fois plus de dihydrogène que de dioxygène.

6° Généralisation

La réaction d'électrolyse de l'eau entraîne donc la formation d'un volume double de dihydrogène gazeux et d'un volume simple de dioxygène gazeux. Un courant électrique est nécessaire à la réaction d'électrolyse de l'eau.

ANNEXE F

Post-test n°1 de 2012

1. **Soit l'équation de réaction suivante (combustion du sodium) :**

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

....

a) Inscris les termes « réactifs » ou « produits » sur les pointillés ci-dessus.
b) Décris deux différences entre les réactifs et les produits.

……
……
……
……
…….

c) Qu'est-ce qui est commun aux réactifs et aux produits dans une réaction chimique ?

……
……
……
……
…….

d) Que signifie le signe « + » ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- Le signe « + » signifie qu'il y a réaction chimique entre les deux réactifs.
☐ 2- Le signe « + » signifie que les réactifs sont mis en contact.
☐ 3- Le signe « + » signifie que l'on mélange les réactifs.
☐ 4- Le signe « + » signifie que l'on additionne les réactifs entre eux.

e) Que signifie la flèche ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- La flèche représente la réaction chimique.
☐ 2- La flèche indique les résultats de la réaction : les produits.
☐ 3- La flèche a la même signification que le signe égal en mathématiques.
☐ 4- La flèche signifie « réagissent pour former ».
☐ 5- La flèche signifie que les réactifs sont mis en contact.

f) Que signifie le chiffre 4 dans **4**Na ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- C'est le nombre de molécules de Na impliquées dans la réaction.
☐ 2- C'est le nombre d'atomes de Na impliqués dans la réaction.
☐ 3- Dans cette réaction, il faut quatre fois plus de sodium que de dioxygène.
☐ 4- C'est un coefficient qui permet la pondération de l'équation de réaction.
☐ 5- C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de Na dans une molécule.

g) Que signifie le 2 dans Na_2O ?
Coche la ou les cases correspondant aux affirmations qui te paraissent correctes.

☐ 1- C'est un coefficient : il indique le nombre d'atomes de sodium impliqués dans la réaction.
☐ 2- C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de sodium dans la molécule de Na_2O.
☐ 3- C'est la valence du sodium, c'est-à-dire le nombre de liaisons que le sodium peut effectuer avec un autre atome.

h) Que se passe-t-il, selon toi, au niveau des réactifs, pendant la réaction chimique?
……
……
……
……

i) En utilisant le modèle en boules vu au cours (sodium = grosse boule, oxygène = petite boule), modélise l'équation de réaction de combustion du sodium.

DEFI : En utilisant le modèle en boules vu au cours, modélise l'équation de réaction suivante :

$$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$$

ANNEXE G

Résultats du post-test en 2012 et en 2013 – Tableaux de données

RÉSULTATS DE 2012

Q1 : INSCRIS LES TERMES « RÉACTIFS » OU « PRODUITS » SUR LES POINTILLÉS CI-DESSUS.

BILAN TOTAL :

- ✓ **Par réponses correctes / incorrectes**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
Correctes	101	92 %
Incorrectes	7	6 %
Pas de réponse	2	2 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE :

- ✓ **Par réponses correctes / incorrectes**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Correctes	96	90	90	84	100	92	83	90
Incorrectes	4	10	10	8	0	6	17	8
Pas de réponse	0	0	0	8	0	2	0	2

Q2 : DÉCRIS DEUX DIFFÉRENCES ENTRE LES RÉACTIFS ET LES PRODUITS

3A1 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Ils n'ont pas les mêmes propriétés + L'état de la matière peut varier pendant la réaction	**1**
Dans ces réactifs, l'oxygène est gazeux et dans les produits il est solide + Dans les réactifs, l'oxygène est pris deux fois et dans les produits une seule fois	**1**
Les réactifs sont solides et liquides et les produits sont solides + ils n'ont plus le même nombre d'atomes	**2**
L'état des molécules + la quantité de molécules	**1**
Un des réactifs est solide et l'autre gazeux mais le produit est entièrement solide + le nombre de molécules et atomes	**1**
Les réactifs sont composés de molécules différentes alors que les réactifs sont composés de molécules identiques (corps pur simple-composé) + l'état de la matière	**1**
Les réactifs ont encore les « + », pas les produits + les molécules sont toutes rassemblées dans les produits	**1**
Il y a un « + » entre le sodium et l'oxygène dans les réactifs + dans les produits, l'oxygène et le sodium se sont assemblés	**1**
Les réactifs sont les substances de départ et les produits sont les substances à la fin de l'expérience + les réactifs se sont transformés en produits	**1**
Les réactifs n'ont pas les mêmes propriétés que les produits + chez les réactifs, il y a une mise à feu	**1**
Les réactifs sont séparés par le signe « + » tandis que les produits pas (forment une molécule) + les réactifs sont solides et gazeux alors que les produits sont solides	**1**
La valence + les atomes	**1**
Les réactifs ne sont pas assemblés entre eux + l'oxygène en gaz est passé à l'état solide	**1**
Les réactifs sont les mêmes corps, les produits sont de nouveaux corps formés + le nombre d'atomes et les valences qui changent	**1**
1 différence	
Les produits sont les corps avant qu'il y a réaction chimique, qui les transforme en réactifs (NDLR : logique avec question 1a)	**1**
Réactifs, ce sont deux corps qui réagissent et les produits, ce sont les nouveaux corps formés	**1**
Les réactifs sont les corps qui réagissent entre eux et les produits sont les nouveaux corps formés	**1**
Les réactifs sont chargés positivement et les produits sont chargés négativement	**1**
Les réactifs sont séparés et sont différents	**1**

Dans une réaction, les réactifs sont des corps en relation entre eux et les produits sont des produits formés de cette réaction	**1**
Réactif (s) et (g) et produit (s)	**1**
Pas de réponse	**1**

3A2 – 24 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Réactif = substance avant la transformation ; produit = substance après la transformation + Leurs propriétés sont différentes	**1**
Ils ont des propriétés différentes + les formules chimiques sont différentes mais possèdent le même nombre d'atomes de chaque espèce	**1**
Le sodium et l'oxygène + 1 oxygène en moins dans les produits ; l'indice du sodium est de 2 dans le produit alors que au départ non	**1**
Le nombre de molécules + l'indice des atomes	**1**
Il y a le même nombre d'atomes de chaque espèce + il y a les mêmes espèces	**1**
Dans le réactif, c'est deux corps purs simples dans les produits c'est un corps pur composé + Dans le réactif, le nombre de valence n'est pas le même que dans les produits	**1**
Ils ne sont pas attachés (réactifs) + il y a plus de 0 aux réactifs	**1**
Les produits contrairement aux réactifs sont des mélanges + les produits sont des corps purs composés	**1**
Les réactifs ont plus d'atomes que les produits + l'une des valences (g) a disparu	**1**
Un des deux réactifs n'a pas les mêmes caractéristiques que le produit – il a les caractéristiques des deux réactifs + leur forme peut être différente (réactif solide et gazeux et produit solide)	**1**
1 différence	
Le réactif est le composant et le produit est le résultat de l'expérience	**1**
Il y a 4 atomes de Na (sans valence) et dans le produit deux atomes de Na (valence 2) ; il y a O_2 et dans le produit seulement O	**1**
Les produits ne s'additionnent pas – à la fin, ça reste des produits	**1**
Réactif = corps pur ; produit = mélange	**1**
Le produit, c'est le résultat des réactifs	**1**
Les réactifs, c'est un phénomène chimique et les produits, c'est un mélange des corps	**1**
Les réactifs sont des corps différents	**1**
Les réactifs réagissent entre eux ; les produits sont leur transformation	**1**
Dans une combinaison chimique, les combinaisons ont de nouveaux produits. Les réactifs, c'est ceux qui les créent	**1**
Ils n'ont plus les mêmes propriétés	**1**

Les produits peuvent avoir une nature différente après que les réactifs aient réagi (phénomène chimique) ou la même (phénomène physique)	**1**
a + b - les réactifs ont un signe « + » et les produits non	**1**
Pas de réponse	**2**

3A3 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Les réactifs sont séparés et les produits sont regroupés + il peut y avoir des atomes qui apparaissent dans les produits après la réaction et pas dans les réactifs	**1**
Réactifs : ils sont minimum 2 et les produits sont un ensemble + les réactifs ne sont pas un mélange alors que les produits sont un mélange	**1**
Ils n'ont pas forcément les mêmes valences + pas forcément les mêmes indices	**1**
Il n'y a plus le même nombre d'atomes de Na + les atomes d'oxygène sont gazeux dans les réactifs et solide dans les produits	**1**
Ils ne sont plus séparés + nombre d'atomes différent	**1**
Les réactifs modifient la nature des substances et les combinaisons s'effectuent dans des proportions bien définies alors que les produits conservent leurs propriétés et s'effectuent en toute proportion	**1**
Les réactifs sont composés de plusieurs atomes alors que les produits sont composés d'une molécule + ils s'associent pour créer les produits	**1**
Les réactifs sont les composants chimiques initiaux tandis que les produits sont le résultat des réactifs avec de nouvelles propriétés	**1**
1 différence	
Réactifs : corps qui réagissent entre eux – produits : nouveaux corps formés	**1**
Les réactifs sont les éléments avant la réaction chimique et les produits sont des éléments après la réaction chimique	**1**
Dans les réactifs, il y a le signe « + » mais pas dans les produits	**1**
Les réactifs sont mis en contact alors que les produits sont assemblés	**1**
Les réactifs sont des « purs simples », ils ne peuvent pas se diviser	**1**
Les réactifs sont les termes qui agissent entre eux pour former les produits	**1**
Les réactifs sont les corps mélangés entre eux alors que les produits sont les nouveaux corps formés	**1**
Les produits ne sont pas pondérés et les produits sont pondérés (?)	**1**
Les réactifs sont les molécules qui sont mises en contact et les produits c'est la molécule formée après l'expérience	**1**
Les réactifs sont des corps qui réagissent entre eux et les produits sont des noyaux de corps formés	**1**
Les réactifs sont ceux qui font réagir et les produits, c'est le résultat	**1**

Les produits sont toujours à l'état solide	**1**

3A4 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Les réactifs réagissent entre eux alors que les produits sont les nouveaux corps formés + Dans une réaction chimique, les produits ont des nouvelles propriétés que les réactifs	**1**
Les produits sont la réaction des réactifs + les molécules sont différentes	**1**
Les valences ne sont pas les mêmes + leurs coefficients ne sont pas les mêmes	**1**
4s at de Na et 2 g de O ; 4 at Na et s at de O (état + nombre d'atomes)	**1**
1 différence	
Les corps qui réagissent entre eux sont appelés réactifs et les corps formés sont appelés produits	**1**
Les réactifs réagissent entre eux pour former des produits	**1**
Les produits sont la réaction provoquée par les réactifs	**1**
Les réactifs réagissent entre eux pour former les produits et les produits sont les produits des réactifs	**1**
Les réactifs sont des atomes qui n'ont pas encore subi de changement et les produits sont la solution des réactifs	**1**
Les réactifs forment toujours une addition	**1**
Les réactifs un ensemble de molécules qui vont donner un ensemble différent à la fin de l'équation	**1**
Dans une réaction, les corps qui réagissent sont les réactifs et les nouveaux corps que l'on obtient sont les produits	**1**
Les réactifs sont une addition d'atomes alors que les produits sont des produits ; les réactifs sont distincts alors que les produits forment un ensemble	**1**
Les réactifs réagissent entre tandis que le produit est le résultat de la réaction des réactifs	**1**
Les réactifs sont plusieurs avant la réaction tandis qu'après, les produits forment un ensemble	**1**
Pas de réponse	**5**

3A5 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Les réactifs sont séparés d'un « + » + les deux réactifs sont additionnés pour former le produit	**1**
Les réactifs sont avec un signe « + » + les atomes sont séparés	**1**
L'oxygène dans les réactifs était sous forme gazeuse tandis que dans les produits, il est solide + il y avait deux corps dans les réactifs tandis qu'il n'y en a qu'un dans les produits	**1**
La forme de la matière est différente + ce n'est plus le même nombre de molécules	**1**
Dans les produits, il n'y a pas d'addition + ce sont des corps purs composés	**1**
Il y a deux termes séparés par un « + » dans les réactifs + il y a deux états de la matière dans les réactifs et seulement 1 dans les produits	**1**
1 différence	
Les réactifs sont ceux qui réagissent et produisent ; les produits sont ceux qui sont produits	**1**
Dans les réactifs, il y a 4 N et dans les produits, il n'en y a que deux	**1**
L'un contient un corps gazeux et l'autre pas	**1**
Les produits c'est ce qu'on a avant la réaction et les réactifs c'est ce qu'on a après la réaction (NDLR : logique avec 1a)	**1**
Les réactifs s'introduisent dans les produits	**1**
Les produits, sont ce que l'on obtient lors de l'équation des réactifs	**1**
Les réactifs n'ont pas subi de transformation alors que les produits ont subi une transformation	**1**
Les réactifs sont des atomes qui réagissent entre eux et les produits se forment entre eux	**1**
Les réactifs sont des corps purs simples et les produits sont des corps purs composés	**1**
Il y a autant d'atomes dans tous les cas	**1**
Les produits sont des nouveaux corps formés et les réactifs sont des corps qui réagissent entre eux	**1**
Les réactifs sont au moins deux alors que le produit est seul	**1**
Lors d'une expérience, les réactifs sont des corps purs qui après une réaction vont donner des produits, la substance	**1**
Pas de réponse	**4**

3A6 : 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
2 différences	
Les produits, c'est la solution des réactifs ; les réactifs forment deux molécules, les produits n'en forment plus qu'une + ils n'ont pas le même nombre d'atomes	**1**
Les réactifs réagissent entre eux et les produits sont la formation des réactifs + les réactifs sont plusieurs et le produit est seul	**1**
Pas les mêmes valences + c'est une réaction chimique, donc les corps deviennent d'autres corps au cours de la réaction	**1**
Les produits sont le résultat des réactifs + les produits se trouvent toujours à droite de la flèche et les réactifs toujours à gauche	**1**
Les réactifs sont deux corps purs ou plus qui vont être mélangées + le produit est un corps pur composé	**1**
Les réactifs sont une somme de 2 termes + les produits sont la transformation des réactifs en produits	**2**
1 différence	
Réactifs : gazeux et solide ; produits : solide	**1**
Les réactifs ne se modifient pas contrairement aux produits, les produits sont des nouveaux contrairement aux réactifs	**1**
Les réactifs, c'est une addition alors que les produits, ils se multiplient	**1**
Les réactifs sont ceux qui forment les produits après la combustion	**1**
Lors d'une réaction chimique, les réactifs réagissent entre eux et les produits se forment	**1**
Les réactifs c'est les corps qui réagissent entre eux au départ et les produits c'est les substances formées	**1**
Le réactif, c'est l'élément de départ alors que le produit est ce qu'on obtient à la fin	**1**
Les réactifs sont des corps qi réagissent entre eux et les produits sont les nouveaux corps formés	**1**
C'est après une réaction chimique que le réactif devient le produit	**1**
Les produits ne sont pas mélangés mais deux produits ensemble font un réactif	**1**
Les produits sont la solution que les réactifs produisent	**1**
Les réactifs c'est avant la réaction et une fois la réaction faite ça donne des produits	**1**
Ce que c'est et ce que ça devient au final	**1**
Les réactifs sont les corps qui réagissent lors d'un phénomène chimique + les produits sont les nouveaux corps formés après le phénomène chimique	**1**
Il y a le double côté réactif que produit	**1**
Pas de réponse	**2**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses données**

Nombre de réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
2	41	37 %
1	57	52 %
0	12	11 %

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	50	45 %
Plusieurs réactifs / un seul produit	21	19 %
Les états de la matière	18	16 %
La quantité d'atomes	12	11 %
Pas de « + » chez les produits	12	11 %
Pas de réponse	12	11 %
Les propriétés	7	6 %
Corps purs simples / composés	6	5 %
La valence des atomes	6	5 %
Le nombre de molécules	3	3 %
Les produits sont à droite de la flèche - les réactifs à gauche de la flèche	1	1 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE :

- ✓ **Par nombre de réponses données**

Nombre de réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
2	65	40	20	30	29	37	42	38
1	30	60	55	52	63	52	50	52
0	4	0	25	17	8	11	8	11

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	26	50	50	30	71	45,5	21	41
Plusieurs réactifs / un seul produit	22	25	10	22	17	19	8	17
Les états de la matière	43	10	5	17	4	16,5	4	14
La quantité d'atomes	26	20	0	9	0	11	21	13
Pas de « + » chez les produits	13	5	10	17	8	11	8	10
Pas de réponse	4	0	25	17	8	11	8	10
Les propriétés	8	10	5	0	0	6,5	13	7
Corps purs simples / composés	4	5	0	13	4	5,5	13	7
La valence des atomes	8	5	5	0	4	5,5	8	5
Le nombre de molécules	9	0	0	4	0	2,5	4	3

Q3 : QU'EST-CE QUI EST COMMUN AUX RÉACTIFS ET AUX PRODUITS DANS UNE RÉACTION CHIMIQUE ?

3A1 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Leur masse est la même	**1**
La masse des réactifs est égale à la masse des produits	**1**
La valence des corps	**1**
Le nombre d'atomes est le même	**3**
Le nombre d'atomes des deux côtés de l'équation est identique	**1**
Il y a le même nombre d'atomes de chaque sorte chez les produits et chez les réactifs	**1**
Le nombre d'atomes de chaque molécule	**1**
Les molécules sont identique	**1**
Le nombre de molécules	**1**
Ils ont tous les deux les mêmes atomes et dans les réactifs, l'addition des deux atomes réagissent pour former le produit	**1**
La nature des atomes	**1**
Les atomes restent les mêmes	**1**
Les atomes sont les mêmes, mais pas dans les mêmes quantités	**1**
Les atomes les composant	**1**
Les composants	**1**
La masse ; le nombre d'atomes	**2**
Si le circuit était fermé, leur masse totale serait égale ; le même nombre d'atomes	**1**
Les corps purs que les réactifs et les produits ont	**1**
Pas de réponse	**2**

3A2 – 24 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
La masse des réactifs est égale à la masse des produits	**3**
Le nombre d'atomes qui doit être équilibré : il faut avoir le même nombre d'atomes de chaque espèce des deux côtés de la flèche	**1**
Le nombre d'atomes de chaque espèce est identique	**1**
Il y a le même nombre d'atomes de chaque sorte chez les produits et chez les réactifs	**1**
Le nombre d'atomes de chaque molécule	**1**
Ils ont le même nombre d'atomes	**2**
Leur sorte de molécule est identique	**1**
Les molécules des réactifs restent dans les produits ; elles ne se transforment pas	**1**
Les réactifs égalent le produit	**1**
La nature des atomes	**1**
Aucun autre corps ne vient s'ajouter	**1**
Les constituants	**2**
Les atomes et la masse sont les mêmes ; les nombres des molécules et des atomes sont différents	**1**
Le nombre de molécules ; le nombre d'atomes	**1**
La masse des réactifs vaut exactement la masse du produit ; le nombre de molécules de chaque types est égale dans les réactifs et dans les produits	**1**
Quand on perd une molécule dans le produit, il doit aussi en perdre une pour que l'équation chimique reste équilibrée	**1**
Le total à la fin	**1**
Les réactifs se transforment en produits	**1**
Pas de réponse	**2**

3A3 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Ils ont la même masse	**1**
La masse ne change pas	**1**
Leur masse reste identique	**1**
La masse de l'ensemble des réactifs est égale à la masse de l'ensemble des produits formés	**1**
Le nombre d'atomes de chaque espèce est égal / le même pour les réactifs et les produits. Il faut donc les pondérer	**1**
Les molécules des réactifs sont toujours présentes sauf qu'elles sont jumelées avec d'autres	**1**
Les atomes	**1**
Ils ont les mêmes atomes	**1**
Ils peuvent être composés de mêmes atomes	**1**
Leur composition est la même	**1**
Ce seront toujours les mêmes atomes mais pas de même nombre mais les mêmes par rapport à leur nom. Il n'en y a pas de nouveau qui se crée	**1**
Les espèces d'atomes	**1**
Ils ont les mêmes nature d'atome	**1**
Ils sont tous les deux de même matière	**1**
Le signe « + »	**1**
Les réactifs sont égaux aux produits	**1**
La filtration, la concentration	**1**
Pas de réponse	**3**

3A4 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Leur poids	**1**
La masse de l'ensemble des produits est exactement la même que celle de l'ensemble des réactifs dans une réaction chimique	**1**
Ils ont tous les deux le même nombre d'atomes au départ	**1**
C'est le même nombre de chaque atome et de chaque espèce	**1**
Ils ont le même nombre d'atomes	**1**
Car il garde la molécule mais leur valence, le coefficient change, qui donne une réaction chimique	**1**
Ils ont toujours les mêmes atomes. De valence différente, mais aucun atome ne disparait durant la réaction chimique. Si ils sont au début, ils seront là à la fin.	**1**
La nature de l'atome : si il y a de l'oxygène au début, il y aura toujours de l'oxygène à la fin	**1**
Les composants sont les mêmes mais pas leur quantité	**1**
Ils sont composés de la même chose	**1**
Les atomes	**1**
Leur nature change. Ils sont tous les deux transformés	**1**
Ils peuvent tous les deux devenir d'autres corps	**1**
Ils valent la même chose	**1**
La masse volumique des réactifs est égale à la masse volumique des produits	**1**
Ils ont tous les deux le même nombre d'atomes et de molécules	**1**
Leur masse car la masse de l'ensemble des réactifs est égale à la masse de l'ensemble des produits ainsi que des atomes qui les composent	**1**
Le nombre d'atomes, on retrouve toujours le même constituant	**1**
Pas de réponse	**2**

3A5 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Ils ont la même masse	**1**
La masse de l'ensemble des produits est exactement la même que celle de l'ensemble des réactifs dans une réaction chimique	**1**
Le nombre d'atomes à la fin de l'équation	**1**
Le nombre d'atomes est le même	**2**
C'est le nombre d'atomes, l'équation doit être pondérée	**1**
Les molécules restent les mêmes	**1**
Lors d'une réaction chimique, les molécules des réactifs sont présentes dans les produits. Rien ne se perd	**1**
Leurs composants	**1**
Ils sont tous les deux en mouvement	**1**
C'est la pondération	**1**
La substance	**1**
Les réactifs gardent leur même nature même quand ils deviennent des produits	**1**
Ils deviennent tous les deux d'autres corps	**1**
Il y a le même nombre de produits que de réactifs	**1**
La quantité de matière qui ne se modifie pas. Le nombre d'atomes reste le même	**1**
La nature des atomes et leur nombre	**1**
Les indices et les atomes	**1**
Pas de réponse	**5**

3A6 – 24 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
La masse de l'ensemble	**2**
La masse de l'ensemble des produits est exactement la même que celle de l'ensemble des réactifs dans une réaction chimique. La masse est donc commune	**1**
Ils ont le même nombre d'atomes de chaque côté	**1**
Ils sont composés des mêmes atomes	**1**
Qu'ils ont chacun des atomes	**1**
On ne change pas les atomes	**1**
On garde toujours les mêmes atomes mais la quantité varie	**2**
Les atomes restent les mêmes. On effectue une réaction mais les atomes ne disparaissent pas	**1**
Le nombre de groupements	**1**
Ils conservent la même base	**1**
Les symboles	**1**
À la fin de la réaction, les réactifs sont égaux aux produits si dans un système fermé	**1**
Ils sont tous les deux modifiés car ça se passe dans une réaction chimique	**1**
Il y a toujours la même matière	**1**
Les valences doivent être les mêmes	**1**
Ils se composent tous les deux des mêmes atomes et du même nombre aussi	**1**
Pas de réponse	**6**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative (Tot-2)
Le type d'atomes	30	27 %
Le nombre d'atomes	23	21 %
Pas de réponse	18	16 %
La masse	17	15 %
Le type de molécules	5	5 %
La possibilité de se transformer	4	4 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Le type d'atomes	22	30	15	9	25	27	16	25
Le nombre d'atomes	39	5	25	26	8	21	33	23
Pas de réponse	9	15	10	22	25	16	8	15
La masse des réactifs et produits	22	20	15	9	13	15	21	16
Le type de molécules	4	5	5	9	0	5	8	5

Q4 : QUE SIGNIFIE LE SIGNE « + » ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
1 réponse	63	57 %
2 réponses	44	40 %
3 réponses	2	2 %
0 réponse	1	1 %

- ✓ **Par combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Mise en contact	29	26 %
Addition	15	14 %
Réaction	14	13 %
Mise en contact + mélange	12	11 %
Mise en contact + addition	12	11 %
Mise en contact + réaction	6	6 %
Réaction + addition	6	6 %
Mélange	5	5 %
Mélange + addition	5	5 %
Réaction + mélange	3	3 %
Mise en contact + mélange + addition	2	2 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Mise en contact	61	55 %
Addition	40	36 %
Mélange	27	26 %
Réaction	29	25 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1	3A3	3A4	3A5	3A6	Tot-2	3A2	Total
1 réponse	48 (11)	75 (15)	30 (6)	69 (16)	63 (15)	57 (63)	54 (13)	57 (76)
2 réponses	48 (11)	25 (5)	65 (13)	26 (6)	38 (8)	40 (43)	42 (10)	40 (53)
3 réponses	4 (1)	0	0	4 (1)	0	2 (2)	4 (1)	2 (3)
0 réponse	0	0	5 (1)	0	0	1 (1)	0	1 (1)

- ✓ **Par combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Mise en contact	22 (5)	40 (8)	10 (2)	30 (7)	29 (7)	26 (29)	13 (3)	24 (34)
Addition	13 (3)	20 (4)	0	17 (4)	17 (4)	14 (15)	13 (3)	13 (18)
Réaction	9 (2)	15 (3)	10 (2)	17 (4)	13 (3)	13 (14)	17 (4)	13 (18)
Mise en contact + mélange	13 (3)	5 (1)	15 (3)	9 (2)	13 (3)	11 (12)	13 (3)	11 (15)
Mise en contact + addition	9 (2)	5 (1)	15 (3)	17 (4)	8 (2)	11 (12)	8 (2)	10 (14)
Mélange	4 (1)	0	10 (2)	4 (1)	4 (1)	5 (5)	13 (3)	6 (8)
Mélange + addition	4 (1)	10 (2)	5 (1)	0	4 (1)	5 (5)	8 (2)	5 (7)
Mise en contact + réaction	13 (3)	0	10 (2)	0	4 (1)	5 (6)	4 (1)	5 (7)
Réaction + addition	9 (2)	0	10 (2)	0	8 (2)	5 (6)	0	4 (6)
Réaction + mélange	0	5 (1)	10 (2)	0	0	3 (3)	8 (2)	4 (5)
Mise en contact + mélange + addition	4 (1)	0	0	4 (1)	0	2 (2)	4 (1)	2 (3)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Mise en contact	61 (14)	50 (10)	50 (10)	61 (14)	54 (13)	55 (61)	42 (10)	54 (71)
Addition	39 (9)	35 (7)	30 (6)	39 (9)	38 (9)	36 (40)	33 (8)	36 (48)
Mélange	26 (6)	20 (4)	40 (8)	17 (4)	21 (5)	25 (27)	46 (11)	28 (38)
Réaction	30 (7)	20 (4)	40 (8)	17 (4)	25 (6)	26 (29)	29 (7)	27 (36)

Q5 : QUE SIGNIFIE LA FLÈCHE ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
1 réponse	52	47 %
2 réponses	46	42 %
3 réponses	12	11 %

- ✓ **Par combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
« Réagissent pour former »	38	35 %
« RPF » + indique les produits	21	19 %
« RPF » + réaction chimique	14	13 %
« RPF » + indique les produits + réaction	10	9 %
Réaction chimique	7	6 %
Egal + indique les produits	6	6 %
Indique les produits	4	4 %
Egal	3	3 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
« Réagissent pour former »	89	81 %
Indique les produits	45	41 %
Réaction chimique	32	29 %
Egal	12	11 %
Mise en contact	3	3 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
1 réponse	48 (11)	55 (11)	25 (5)	61 (14)	46 (11)	47 (52)	54 (13)	48 (62)
2 réponses	48 (11)	30 (6)	60 (12)	26 (6)	46 (11)	42 (46)	33 (8)	41 (55)
3 réponses	4 (1)	15 (3)	15 (3)	13 (3)	8 (2)	11 (12)	13 (3)	11 (15)

- ✓ **Par combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
« Réagissent pour former »	43 (10)	45 (9)	15 (3)	43 (10)	25 (6)	34 (38)	33 (8)	34 (46)
« RPF » + indique les produits	30 (7)	10 (2)	25 (4)	13 (3)	21 (5)	20 (21)	17 (4)	19 (25)
« RPF » + réaction chimique	17 (4)	20 (4)	15 (3)	0	13 (3)	13 (14)	4 (1)	11 (15)
« RPF » + indique les produits + réaction	4 (1)	15 (3)	10 (2)	8 (2)	8 (2)	8 (10)	8 (2)	9 (12)
Réaction chimique	0	5 (1)	5 (1)	8 (2)	13 (3)	6 (7)	8 (2)	7 (9)
Egal + indique les produits	0	0	10 (2)	13 (3)	4 (1)	5 (6)	0	4 (6)
Indique les produits	4 (1)	0	5 (1)	4 (1)	4 (1)	4 (4)	4 (1)	4 (5)
Egal	0	5 (1)	0	4 (1)	4 (1)	3 (3)	8 (2)	4 (5)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
« Réagissent pour former »	96 (22)	90 (18)	80 (16)	70 (16)	71 (17)	81 (89)	71 (17)	79 (106)
Indique les produits	39 (9)	25 (5)	55 (11)	43 (10)	42 (10)	41 (45)	33 (8)	40 (53)
Réaction chimique	22 (5)	40 (8)	30 (6)	17 (4)	38 (9)	29 (32)	29 (7)	29 (39)
Egal	0	5 (1)	20 (4)	22 (5)	8 (2)	11 (12)	25 (6)	13 (18)
Mise en contact	4 (1)	0	5 (1)	0	4 (1)	2 (3)	0	2 (3)

Q6 : QUE SIGNIFIE LE CHIFFRE 4 DANS 4Na ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
1 réponse	39	35 %
2 réponses	65	59 %
3 réponses	6	6 %

- ✓ **Par combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Coefficient + nombre de molécules	24	22 %
Coefficient + nombre d'atomes	19	17 %
Coefficient	15	14 %
Nombre d'atomes	11	10 %
Nombre de molécules	9	8 %
Indice + nombre d'atomes	7	6 %
Indice	4	4 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Coefficient	74	67 %
Nombre d'atomes	48	44 %
Nombre de molécules	45	41 %
Indice	18	16 %
Proportion	1	1 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
1 réponse	17 (4)	50 (10)	20 (4)	39 (9)	50 (12)	35 (39)	46 (11)	37 (50)
2 réponses	74 (17)	45 (9)	80 (16)	57 (13)	42 (10)	59 (65)	50 (12)	57 (77)
3 réponses	9 (2)	5 (1)	0	4 (1)	8 (2)	5 (6)	4 (1)	5 (7)

- ✓ **Par combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Coefficient + nombre de molécules	52 (12)	10 (2)	20 (2)	26 (6)	13 (2)	25 (24)	29 (7)	25 (31)
Coefficient + nombre d'atomes	9 (2)	20 (4)	40 (4)	17 (4)	21 (5)	21 (19)	13 (3)	19 (22)
Coefficient	9 (2)	10 (2)	5 (1)	17 (4)	25 (6)	14 (15)	17 (4)	14 (19)
Nombre de molécules	0	15 (3)	10 (2)	4 (1)	13 (3)	8 (9)	25 (6)	11 (15)
Nombre d'atomes	9 (2)	15 (3)	0	17 (4)	8 (2)	10 (11)	4 (1)	9 (12)
Indice + nombre d'atomes	4 (1)	10 (2)	5 (1)	9 (2)	4 (1)	6 (7)	4 (1)	6 (8)
Indice	0	10 (2)	5 (1)	0	4 (1)	4 (4)	0	3 (4)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Total (%)	Tot-2 (%)
Coefficient	87 (20)	67 (16)	45 (9)	65 (13)	70 (16)	67 (16)	67 (90)	67 (74)
Nombre de molécules	61 (14)	54 (13)	30 (6)	45 (9)	30 (7)	38 (9)	43 (58)	41 (45)
Nombre d'atomes	26 (6)	25 (6)	50 (10)	55 (11)	48 (11)	42 (10)	40 (54)	44 (48)
Indice	13 (3)	13 (3)	30 (6)	15 (3)	13 (3)	13 (3)	16 (21)	16 (18)
Proportion	4 (1)	0	0	0	0	0	1 (1)	1 (1)

Q7 : QUE SIGNIFIE LE 2 DANS Na_2O ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Indice	65	59 %
Indice + valence du Na	21	19 %
Valence de Na	10	9 %
Coefficient	8	7 %
Indice + coefficient	4	4 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Indice	90	82 %
Valence de Na	33	30 %
Coefficient	14	13 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Indice	70 (16)	65 (13)	60 (12)	48 (11)	54 (13)	59 (65)	42 (10)	56 (75)
Indice + valence du Na	22 (5)	5 (1)	20 (4)	22 (5)	25 (6)	19 (21)	21 (5)	19 (26)
Valence de Na	4 (1)	10 (2)	10 (2)	9 (2)	13 (3)	9 (10)	13 (3)	10 (13)
Coefficient	4 (1)	15 (3)	10 (2)	9 (2)	0	7 (8)	21 (5)	10 (13)
Indice + coefficient	0	5 (1)	0	9 (2)	4 (1)	4 (4)	4 (1)	4 (5)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Indice	91 (21)	75 (15)	80 (16)	78 (18)	83 (20)	82 (90)	67 (16)	79 (106)
Valence de Na	26 (6)	15 (3)	30 (6)	35 (8)	42 (10)	30 (33)	33 (8)	31 (41)
Coefficient	4 (1)	20 (4)	10 (2)	22 (5)	8 (2)	13 (14)	25 (6)	15 (20)

Q8 : QUE SE PASSE-T-IL, SELON TOI, AU NIVEAU DES RÉACTIFS, PENDANT LA RÉACTION CHIMIQUE?

3A1 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Ils se transforment	**1**
Les réactifs vont se transformer en produits et les molécules identiques seront rassemblées	**1**
Ils se transforment en produits	**1**
Ils s'assemblent pour former une nouvelle molécule	**1**
Ils deviennent d'autres corps et c'est pour cela que l'on obtient un nouveau « produit » (substance)	**1**
Les molécules vont s'accrocher et vont former autre chose	**1**
Les atomes « s'accrochent » l'un à l'autre, forment des liaisons entre elles, afin de former une nouvelle matière	**1**
Ils s'associent entre eux	**1**
Ils s'assemblent	**1**
Ils s'assemblent pour donner des nouveaux corps avec des nouvelles propriétés	**1**
Il y a des réactions chimiques et les molécules s'entrechoquent entre elles et ça forme des nouvelles matières	**1**
Les réactifs réagissent entre eux pour équilibrer la réaction entre réactifs et produits	**1**
Ils réagissent entre eux pour former de nouveaux corps	**1**
Au cours d'une réaction chimique, les réactifs sont les corps qui réagissent entre eux	**1**
Ils réagissent entre eux, ils se mélangent ou il y en a qui disparaissent	**1**
Ils réagissent entre eux, se transforment pour devenir d'autres substances	**1**
Les réactifs se mélangent et réagissent pour former les produits	**1**
Ils réagissent entre eux pour former des produits qui n'auront plus les mêmes propriétés	**1**
Ils forment une solution (produit)	**1**
Ils se mélangent et ne font plus qu'un pour former un produit	**1**
Le nombre de charges positives est égal au nombre de charges négatives	**1**
Au cours du phénomène physique, la nature des molécules est changée. C'est ce qui se passe au niveau des réactifs	**1**
Pas de réponse	**1**

3A2 – 24 élèves – « classe-témoin »

Réponse	Nombre d'élèves
Ils se transforment	**2**
Ils se transforment pour former des produits	**1**
Ils se transforment – il chauffe	**1**
Pendant la réaction chimique, les réactifs deviennent des produits, leurs propriétés changent. Les réactifs deviennent d'autres corps.	**1**
Les réactifs se confondent pour ne former plus qu'un. Tout change : les propriétés, peut-être l'aspect. Seul le nombre d'atomes de chaque espèce est identique	**1**
Ils s'assemblent en fusionnant pour ne former plus qu'une seule molécule formée avec des atomes différents.	**1**
Les réactifs interagissent entre eux pour former d'autres corps	**1**
Ils s'assemblent grâce à leurs bras pour ne former qu'une seule molécule	**1**
Il y en a au moins un qui se dissout dans l'autre	**1**
Les réactifs réagissent entre eux pour former un produit – ils peuvent se dissoudre, se transformer, se fusionner (ou je ne sais pas quoi encore)	**1**
Ça devient un produit, soit un mélange	**1**
Certains réactifs fusionnent entre eux pour former d'autres produits ; certains s'évaporent et d'autres restent les mêmes et ne se transforment pas	**1**
Ils se combinent entre eux – le produit obtient les caractéristiques des deux réactifs	**1**
Ils sont en réaction les uns avec les autres	**1**
Ils réagissent entre eux pour former des produits	**1**
Certains se mélangent pour créer des produits différents	**1**
Ils se mélangent l'un l'autre	**1**
Ils se mélangent pour former un autre corps	**1**
Ils se mélangent, changent de propriétés ; certaines apparaissent, d'autres disparaissent au cours de la réaction	**1**
Il y a certains réactifs qui disparaissent et il y a de nouveaux produits qui apparaissent lors d'une réaction chimique	**1**
Le nombre de molécules change – la nature du produit change également	**1**
Pas de réponse	**2**

3A3 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Ils se transforment en produits qui n'ont pas les mêmes molécules qu'au départ	**1**
Une réaction chimique est un phénomène où des corps deviennent d'autres corps donc : les corps vont devenir d'autres corps	**1**
Un corps va devenir un autre corps	**1**
Ils « se mettent ensemble » pour ne former qu'un seul réactif	**1**
Ils se jumellent grâce à des procédés chimiques	**1**
Ils s'assemblent pour former des produits	**1**
Les réactifs vont assembler leurs atomes afin de former un produit	**1**
Les corps des réactifs réagissent entre eux, ce qui forme une réaction chimique	**1**
Ils réagissent pour former un autre corps	**1**
Ils réagissent entre eux	**1**
Les réactifs font réagir les produits	**1**
Ils se mélangent	**1**
Ils se mélangent pour former une ou plusieurs molécules	**1**
Il y des atomes qui apparaissent et d'autres qui disparaissent	**1**
Certains atomes disparaissent et d'autres apparaissent. Les nouveaux atomes ont des nouvelles caractéristiques. Le mélange se fait en proportions bien définies	**1**
Il y a une combustion car le delta est complet (oxygène, combustible et mise à feu)	**1**
Pas de réponse	**2**

3A4 – 20 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Il y a une transformation au point de vue moléculaire mais le nombre de molécules et d'atomes au final ne change pas	**1**
Les réactifs se transforment en un autre corps	**1**
Ils se mettent ensemble pour former un tout	**1**
Ils rentrent en contact, se mélangent pour former une autre formule	**1**
Les réactifs s'additionnent et réagissent entre eux pour former les produits	**1**
Les corps mélangés deviennent d'autres corps, donc les réactifs mélangés ensemble deviennent des produits	**1**
Les réactifs se mélangent, d'autres substances apparaissent, disparaissent dans la réaction. Les substances formées ont de nouvelles propriétés et la combinaison s'effectue dans des proportions bien définies	**1**
Ils sont mélangés, se transforment et s'assemblent homogènement	**1**
Au niveau des réactifs, ils vont se mélanger entre eux pour former une nouvelle molécule avec des propriétés différentes (= produit)	**1**
Les réactifs se mélangent, du coup il y a un phénomène chimique. Et les réactifs se transforment en produits	**1**
Les réactifs se mélangent entre eux, forment un mélange homogène et le tout forme un produit dont la nature du corps a changé, ce qu'on appelle une réaction chimique	**1**
Ils changent de propriétés	**1**
Selon moi, dans une réaction chimique, les réactifs sont modifiés et leur nature est altérée au cours de la réaction chimique. Ils ne conservent pas leurs propriétés.	**1**
Lors d'une réaction chimique, la nature des corps est transformée	**1**
Les indices s'échangent et se multiplient pour avoir un produit équivalent au début	**1**
Pas de réponse	**5**

3A5 – 23 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Ils se transforment d'autres corps	**1**
Il se passe une réaction chimique : les réactifs se transforment en d'autres produits	**1**
Les molécules et les atomes de même nature de chaque réactif s'assemblent	**1**
Les réactifs deviennent d'autres corps	**1**
Ils fusionnent pendant la réaction ; c'est ce que signifie le « = » ; on peut ainsi dire qu'ils s'additionnent	**1**
Ils s'assemblent pour former de nouvelles molécules tout en gardant la quantité de matière	**1**
Les réactifs s'additionnent et il change de nombre d'indice ou de nombre de coefficient selon l'énoncé	**1**
Les atomes s'assemblent pour former les produits	**1**
Ils réagissent entre eux ; certains disparaissent, d'autres se créent et forment des nouveaux corps (en gardant leurs propriétés)	**1**
Lors d'une réaction chimique, les réactifs réagissent entre eux et forment de nouveaux corps, les produits	**1**
Ils réagissent entre eux	**1**
Ils réagissent et subissent une modification de leurs caractéristiques	**1**
Les deux réactifs ont réagi pour former un produit ; pour cela, j'imagine qu'ils ont exposé à des températures élevées	**1**
Les réactifs réagissent entre eux et forment de nouvelles molécules (produits)	**1**
Les molécules se mélangent	**1**
Les réactifs se mélangent entre eux et forment un produit	**1**
Ils se mélangent ou se transforment en d'autres réactifs	**1**
Certaines molécules disparaissent d'autres apparaissent ; la nature des réactifs change et leur propriétés aussi	**1**
Pas de réponse	**5**

3A6 – 24 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Une transformation	**1**
Ils sont transformés sous une autre forme ; il n'y a plus moyen de les récupérer après	**1**
Les réactifs se touchent pour former autre chose	**1**
Les réactifs s'assemblent pour former les produits	**1**
Ils s'unissent pour former de nouveaux corps. Ils changent de propriétés.	**1**
Ils deviennent d'autres corps	**1**
Ils rentrent en contact ; ils se mélangent	**1**
Ils se mettent ensemble pour former le produit	**1**
Lors d'une réaction chimique, les corps qui réagissent entre eux sont appelés « réactif » et les nouveaux corps qui se forment sont appelés produits	**1**
Ils réagissent entre eux pour former un produit	**5**
Les corps des réactifs réagissent entre eux	**1**
Ils se mélangent pour former autre chose que ce que l'on avait au départ	**1**
Les composants se mélangent, les réactifs s'assemblent pour former un produit	**1**
Ils se mélangent aux produits	**1**
Lors de la réaction chimique, au niveau des réactifs, il y a un mélange de groupement	**1**
La quantité d'atomes change et les atomes peuvent changer	**1**
Pas de réponse	**4**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme s'assembler, se réarranger, se lier, etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	34	31 %
Réagissent entre eux (sans indication du processus réactionnel)	23	21 %
Pas de réponse	17	15 %
Se mélanger (idée principale)	16	15 %
Se transforment (sans indication d'une référence au comment du processus réactionnel)	13	12 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (effervescence, combustion, solution, disparition/apparition)	10	9 %
Référence à un changement de propriétés	8	7 %
Changement de nature des molécules/substances	6	6 %
Disparition et apparition d'atomes	3	3 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)	Total (%)
Tenter de décrire le processus réactionnel	43 (10)	30 (6)	25 (5)	26 (6)	30 (7)	31 (34)	42 (10)	33 (44)
Réagissent entre eux	26 (6)	20 (4)	0	26 (6)	30 (7)	21 (23)	8 (2)	19 (25)
Pas de réponse	4 (1)	10 (2)	25 (5)	21 (5)	17 (4)	15 (17)	8 (2)	14 (19)
Se mélanger	17 (4)	15 (3)	10 (2)	13 (3)	17 (4)	15 (16)	17 (4)	15 (20)
Se transforment	17 (4)	4 (1)	15 (3)	13 (3)	8 (2)	12 (13)	17 (4)	13 (17)
Référence à des propriétés macroscopiques	8 (2)	15 (3)	10 (2)	13 (3)	0	9 (10)	25 (6)	12 (16)
Référence à un changement de propriétés	8 (2)	0	20 (4)	4 (1)	4 (1)	7 (8)	13 (3)	8 (11)
Changement de nature des molécules/substances	4 (1)	0	15 (3)	4 (1)	0	5 (6)	4 (1)	5 (7)
Disparition et apparition d'atomes	0	10 (2)	0	0	4 (1)	3 (3)	0	2 (3)

Q9 : EN UTILISANT LE MODÈLE EN BOULES VU AU COURS (SODIUM = GROSSE BOULE, OXYGÈNE = PETITE BOULE), REPRÉSENTE LA RÉACTION DE COMBUSTION DU SODIUM.

MODÉLISATION 1

BILAN TOTAL

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4	4 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	10	9 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	1	1 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4	4 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	11	10 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	1	1 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	2	2 %
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	25	23 %
Combustion du carbone/magnésium	27	25 %
Pas de réponse	25	23 %

✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2 (%)
Représentation alternée	10	9
Représentation linéaire	9	8
Représentation à plusieurs accroches	4	4
Représentation décalée	1	1

BILAN CLASSE PAR CLASSE

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)	3A2 (%)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	9 (2)	5 (1)	0	0	4 (1)	4 (4)	0
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	26 (6)	15 (3)	0	4,5 (1)	0	9 (10)	8 (2)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4,5 (1)	0	0	0	0	1 (1)	4 (1)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	0	5 (1)	0	9 (2)	4 (1)	4 (4)	12,5 (3)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4,5 (1)	5 (1)	25 (5)	9 (2)	8 (2)	10 (11)	4 (1)
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4.5 (1)	0	0	0	0	1 (1)	0
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	4.5 (1)	0	5 (1)	0	0	2 (2)	0
$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$	22 (5)	20 (4)	25 (5)	30 (7)	17 (4)	23 (25)	50 (12)
Combustion du carbone/magnésium	22 (5)	30 (6)	30 (6)	23 (6)	17 (4)	25 (27)	8 (2)
Pas de réponse	4.5 (1)	30 (4)	15 (3)	22 (5)	50 (12)	23 (25)	12,5 (3)

✓ **Par types de représentations iconiques correctes (nombre de cas)**

Types de représentation iconique correcte	3A1	3A3	3A4	3A5	3A6	Total
Représentation alternée	4	1	1	2	2	10
Représentation linéaire	3	1	1	2	1	9
Représentation à plusieurs accroches	1	2	0	1	0	4
Représentation décalée	0	0	1	0	0	1

MODÉLISATION 2

BILAN TOTAL

✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	12	11 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	13	12 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	10	9 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	4	4 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	2	2 %
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	31	28 %
Combustion du carbone/magnésium	0	0
Pas de réponse	34	31 %

✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2
Représentation linéaire	13	12 %
Représentation alternée	8	7 %
Représentation décalée	3	3 %
Représentation à plusieurs accroches	1	1 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

✓ **Par catégories de réponses (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A3 (%)	3A4 (%)	3A5 (%)	3A6 (%)	Tot-2 (%)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	17 (4)	10 (2)	10 (2)	13 (3)	4 (1)	11 (12)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	30 (7)	15 (3)	10 (2)	4.5 (1)	0	12 (13)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	9 (2)	0	0	0	0	2 (2)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	4,5 (1)	15 (3)	10 (2)	9 (2)	8 (2)	9 (10)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	0	0	5 (1)	9 (2)	4 (1)	4 (4)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	0	0	5 (1)	0	4 (1)	2 (2)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	4,5 (1)	0	5 (1)	0	0	2 (2)
$4Al_{(s)} + 3O_{2(g)} \longrightarrow 2Al_2O_{3(s)}$	26 (6)	25 (5)	40 (8)	35 (8)	17 (4)	28 (31)
Combustion du carbone/magnésium	0	0	0	0	0	0
Pas de réponse	9 (2)	35 (7)	15 (3)	30 (7)	63 (15)	31 (34)

✓ **Par types de représentations iconiques correctes (nombre de cas)**

Types de représentation iconique correcte	3A1	3A3	3A4	3A5	3A6	Total
Représentation linéaire	4	0	5	3	1	13
Représentation alternée	2	1	1	2	2	8
Représentation décalée	1	0	0	2	0	3
Représentation à plusieurs accroches	1	0	0	0	0	1

MODÉLISATIONS 1 et 2

BILAN TOTAL

✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques**

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative Tot-2 (%)
Représentation d'une autre réaction chimique	27	25
Séparation du CPC en CPS	25	23
Agrégation des réactifs et/ou des produits	21	19
Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	14	13
Non-utilisation de l'indice	10	9
Eclatement des réactifs et/ou des produits	7	6

BILAN CLASSE PAR CLASSE

✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques (nombre de cas)**

Types d'erreurs	3A1	3A3	3A4	3A5	3A6	Total
Représentation d'une autre réaction chimique	5	6	6	6	4	27
Séparation du CPC en CPS	7	5	6	2	5	25
Agrégation des réactifs et/ou des produits	4	5	5	6	1	21
Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	3	2	4	3	2	14
Non-utilisation de l'indice	1	1	2	3	3	10
Eclatement des réactifs et/ou des produits	0	3	1	2	1	7

RÉSULTATS DE 2013

Q1 : INSCRIS LES TERMES « RÉACTIFS » OU « PRODUITS » SUR LES POINTILLÉS CI-DESSUS.

BILAN TOTAL

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Correctes	51	94 %
Incorrectes	3	6 %
Pas de réponse	0	0 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE (nombre d'élèves entre parenthèses)

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
Correctes	90 (19)	100 (17)	94 (15)	92 (51)
Incorrectes	10 (2)	0 (0)	0 (0)	6 (3)

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION (nombre d'élèves entre parenthèses)

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Correctes	100 (18)	92 (33)
Incorrectes	0 (0)	8 (3)

Q2 : DÉCRIS DEUX DIFFÉRENCES ENTRE LES RÉACTIFS ET LES PRODUITS

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses**

Nombre de réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
3	1	2 %
2	28	52 %
1	22	41 %
0	3	6 %

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	21	39 %
Pas de « + » chez les produits	20	37 %
Les produits sont à droite de la flèche - les réactifs à gauche de la flèche	17	31 %
Plusieurs réactifs / un seul produit	8	15 %
La quantité d'atomes	4	7 %
Pas de réponse	4	7 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Nombre de réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
3	0	6 (1)	0	2 (1)
2	42 (9)	59 (10)	56 (9)	52 (28)
1	48 (10)	29 (5)	44 (7)	40 (22)
0	10 (2)	6 (1)	0	6 (3)

✓ **Par catégories de réponses (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	33 (7)	47 (8)	38 (6)	39 (21)
Pas de « + » chez les produits	24 (5)	47 (8)	44 (7)	37 (20)
Les produits sont à droite de la flèche - les réactifs à gauche de la flèche	38 (8)	29 (5)	25 (4)	31 (17)
Plusieurs réactifs / un seul produit	19 (4)	18 (3)	6 (1)	15 (8)
La quantité d'atomes	10 (2)	0	13 (2)	7 (4)
Pas de réponse	10 (2)	6 (1)	6 (1)	7 (4)

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION

✓ **Par nombre de réponses (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Nombre de réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
3	0	3 (1)
2	56 (10)	50 (18)
1	44 (8)	42 (15)
0	0	5 (2)

✓ **Par catégories de réponses (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Les produits sont les (nouveaux) corps formés après la réaction – Les réactifs sont les corps avant la réaction (qui réagissent)	39 (7)	39 (14)
Pas de « + » chez les produits	33 (6)	39 (14)
Les produits sont à droite de la flèche - les réactifs à gauche de la flèche	39 (7)	28 (10)
Plusieurs réactifs / un seul produit	17 (3)	14 (5)
La quantité d'atomes	0	14 (5)
Pas de réponse	6 (1)	8 (3)

Q3 : QUE SIGNIFIE LE SIGNE « + » ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
1 réponse	14	26 %
2 réponses	28	52 %
3 réponses	10	19 %
4 réponses	2	4 %

- ✓ **Par types de combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Mise en contact + mélange	10	19 %
Mélange + addition	7	13 %
Addition	5	9 %
Mise en contact + mélange + réaction	5	9 %
Mise en contact + réaction	5	9 %
Mise en contact	5	9 %
Mise en contact + mélange + addition	3	6 %
Réaction	3	6 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Mise en contact	34	63 %
Mélange	30	56 %
Addition	24	44 %
Réaction	20	37 %

- ✓ **Par premier choix pour chaque item**

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Mise en contact	24	44 %
Addition	12	22 %
Réaction	10	19 %
Mélange	8	15 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
1 réponse	29 (6)	29 (5)	19 (3)	26 (14)
2 réponses	52 (11)	59 (10)	44 (7)	52 (28)
3 réponses	14 (3)	12 (2)	33 (5)	19 (10)
4 réponses	5 (1)	0	6 (1)	4 (2)

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
Mise en contact + mélange	24 (5)	24 (4)	6 (1)	19 (10)
Mélange + addition	14 (3)	12 (2)	13 (2)	13 (7)
Addition	5 (1)	18 (3)	6 (1)	9 (5)
Mise en contact + mélange + réaction	5 (1)	12 (2)	13 (2)	9 (5)
Mise en contact + réaction	5 (1)	6 (1)	19 (3)	9 (5)
Mise en contact	10 (2)	6 (1)	13 (2)	9 (5)
Mise en contact + mélange + addition	10 (2)	0	6 (1)	6 (3)
Réaction	10 (2)	6 (1)	0	6 (3)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
Mise en contact	57 (12)	59 (10)	75 (12)	63 (34)
Mélange	67 (14)	47 (8)	50 (8)	56 (30)
Addition	38 (8)	47 (8)	50 (8)	44 (24)
Réaction	33 (7)	29 (5)	50 (8)	37 (20)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
Mise en contact	48 (10)	41 (7)	44 (7)	44 (24)
Addition	19 (4)	24 (4)	25 (4)	22 (12)
Réaction	14 (3)	24 (4)	19 (3)	19 (10)
Mélange	19 (4)	12 (2)	13 (2)	15 (8)

<u>BILAN EN FONCTION DE L'OPTION</u>

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
1 réponse	28 (5)	25 (9)
2 réponses	61 (11)	47 (17)
3 réponses	11 (2)	22 (8)
4 réponses	0	6 (2)

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Mise en contact + mélange	39 (7)	11 (4)
Mélange + addition	11 (2)	14 (5)
Addition	6 (1)	11 (4)
Mise en contact + mélange + réaction	11 (2)	11 (4)
Mise en contact + réaction	6 (1)	11 (4)
Mise en contact	17 (3)	6 (2)
Mise en contact + mélange + addition	0	8 (3)
Réaction	6 (1)	6 (2)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Mise en contact	72 (13)	58 (21)
Mélange	61 (11)	47 (17)
Addition	22 (4)	55,5 (20)
Réaction	33 (6)	39 (14)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses 1er choix	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Mise en contact	61 (11)	36 (13)
Addition	11 (2)	28 (10)
Réaction	17 (3)	22 (8)
Mélange	11 (2)	14 (5)

Q4 : QUE SIGNIFIE LA FLECHE ?

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
1 réponse	16	30 %
2 réponses	23	43 %
3 réponses	15	28 %

- ✓ **Par types de combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former »	13	24 %
« RPF » + réaction chimique	11	20 %
« RPF » + indique + réaction	7	13 %
« RPF » + indique	6	11 %
« RPF » + indique + égal	5	9 %
« RPF » + égal	4	7 %
Réaction	2	4 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former »	49	91 %
Réaction chimique	23	43 %
Indique les produits	21	39 %
Egal	11	20 %
Mise en contact	2	4 %

- ✓ **Par premier choix pour chaque item**

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative
« Réagissent pour former »	41	76 %
Indique les produits	7	13 %
Réaction chimique	5	9 %
Egal	1	2 %
Mise en contact	0	0 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
1 réponse	38 (8)	35 (6)	13 (2)	30 (16)
2 réponses	38 (8)	47 (8)	44 (7)	43 (23)
3 réponses	24 (5)	18 (3)	44 (7)	28 (15)

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
« Réagissent pour former »	24 (5)	35 (6)	13 (2)	24 (13)
« RPF » + réaction chimique	24 (5)	18 (3)	19 (3)	20 (11)
« RPF » + indique + réaction	14 (3)	12 (2)	13 (2)	13 (7)
« RPF » + indique	0	18 (3)	19 (3)	11 (6)
« RPF » + indique + égal	5 (1)	6 (1)	19 (3)	9 (5)
« RPF » + égal	14 (3)	0	6 (1)	7 (4)
Réaction	10 (2)	0	0	4 (2)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
« Réagissent pour former »	81 (17)	94 (16)	100 (16)	91 (49)
Réaction chimique	48 (11)	35 (6)	38 (6)	43 (23)
Indique les produits	29 (6)	35 (6)	63 (15)	41 (22)
Egal	24 (5)	6 (1)	31 (5)	20 (11)
Mise en contact	0	6 (1)	6 (1)	4 (2)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	3A1 (%)	3A2 (%)	3A3 (%)	Total (%)
« Réagissent pour former »	71 (15)	88 (15)	69 (11)	76 (41)
Indique les produits	10 (2)	6 (1)	25 (4)	13 (7)
Réaction chimique	14 (3)	6 (1)	6 (1)	9 (5)
Egal	5 (1)	0	0	2 (1)

<u>BILAN EN FONCTION DE L'OPTION</u>

- ✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
1 réponse	39 (7)	25 (9)
2 réponses	33 (6)	47 (17)
3 réponses	28 (5)	25 (9)

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
« Réagissent pour former »	33 (6)	19 (7)
« RPF » + réaction chimique	22 (4)	8 (3)
« RPF » + indique + réaction	22 (4)	19 (7)
« RPF » + indique	6 (1)	14 (5)
« RPF » + indique + égal	6 (1)	11 (4)
« RPF » + égal	6 (1)	8 (3)
Réaction	0	6 (2)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
« Réagissent pour former »	94 (17)	89 (32)
Réaction chimique	39 (7)	36 (13)
Indique les produits	44 (8)	44 (16)
Egal	5,5 (1)	28 (10)
Mise en contact	0	6 (2)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses 1er choix	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
« Réagissent pour former »	89 (16)	69 (25)
Indique les produits	6 (1)	17 (6)
Réaction chimique	6 (1)	11 (4)
Egal	0	3 (1)

Q5 : QUE SIGNIFIE 4 dans 4Na ? (sélection de tableaux)

BILAN TOTAL

- ✓ **Par nombre de réponses cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
1 réponse	13	24 %
2 réponses	33	61 %
3 réponses	8	15 %

- ✓ **Par types de combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Coefficient + nombre de molécules	12	22 %
Coefficient + nombre d'atomes	11	20 %
Nombre de molécules	7	13 %
Nombre de molécules + coefficient	5	9 %
Coefficient	3	6 %
nombre d'atomes + coefficient	3	6 %
Indice	2	4 %
Coefficient + molécules + proportion	2	4 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Coefficient	42	78 %
Nombre de molécules	30	56 %
Nombre d'atomes	20	37 %
Indice	6	11 %
Proportion	5	9 %

✓ **Par premier choix pour chaque item**

Réponses 1er choix	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Coefficient	29	54 %
Nombre de molécules	13	24 %
Nombre d'atomes	7	13 %
Indice	3	6 %
Proportion	2	4 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

✓ **Par nombre de réponses cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
1 réponse	33 (7)	12 (2)	25 (4)	24 (13)
2 réponses	62 (13)	59 (10)	63 (10)	61 (33)
3 réponses	5 (1)	29 (5)	12 (2)	15 (8)

✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
Coefficient + nombre de molécules	29 (6)	12 (2)	25 (4)	22 (12)
Coefficient + nombre d'atomes	0	29 (5)	36 (6)	20 (11)
Nombre de molécules	24 (5)	6 (1)	6 (1)	13 (7)
Nombre de molécules + coefficient	19 (4)	6 (1)	6 (1)	9 (5)
Coefficient	0	0	19 (3)	6 (3)
nombre d'atomes + coefficient	5 (1)	6 (1)	6 (1)	5 (3)
Indice	5 (1)	6 (1)	0	4 (2)
Coefficient + molécules + proportion	5 (1)	0	6 (1)	4 (2)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
Coefficient	62 (13)	82 (14)	94 (15)	78 (42)
Nombre de molécules	76 (16)	47 (8)	38 (6)	56 (30)
Nombre d'atomes	14 (3)	59 (10)	44 (7)	37 (20)
Indice	9 (2)	6 (1)	6 (1)	11 (6)
Proportion	9 (2)	6 (1)	6 (1)	9 (5)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
Coefficient	38 (8)	47 (8)	81 (13)	54 (29)
Nombre de molécules	43 (9)	18 (3)	6 (1)	24 (13)
Nombre d'atomes	9 (2)	18 (3)	13 (2)	13 (7)
Indice	9 (2)	6 (1)	0	6 (3)
Proportion	0	12 (2)	0	4 (2)

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Coefficient	83 (15)	78 (28)
Nombre de molécules	72 (13)	50 (18)
Nombre d'atomes	33 (6)	42 (15)
Indice	0	17 (6)
Proportion	17 (3)	3 (1)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses 1er choix	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Coefficient	50 (9)	56 (20)
Nombre de molécules	33 (6)	19 (7)
Nombre d'atomes	6 (1)	17 (6)
Indice	0	8 (3)
Proportion	11 (2)	0

Q6 : QUE SIGNIFIE LE 2 DANS Na_2O ? (sélection de tableaux)

BILAN TOTAL

- ✓ **Par types de combinaisons cochées**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Indice	40	74 %
Indice + valence de Na	9	17 %
Valence de Na	2	4 %
Coefficient	2	4 %
Indice + coefficient	1	2 %

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Indice	50	93 %
Valence de Na	11	20 %
Coefficient	3	6 %

- ✓ **Par premier choix pour chaque item**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative
Indice	52	93 %
Valence de Na	2	4 %
Coefficient	2	4 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
Indice	76 (16)	71 (12)	75 (12)	74 (40)
Indice + valence de Na	5 (1)	24 (4)	25 (4)	17 (9)
Valence de Na	10 (2)	0	0	4 (2)
Coefficient	5 (1)	6 (1)	0	4 (2)
Indice + coefficient	5 (1)	0	0	2 (1)

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION

- ✓ **Par types de combinaisons cochées (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Indice	94 (17)	64 (23)
Indice + valence de Na	6 (1)	22 (8)
Valence de Na	0	6 (2)
Coefficient	0	6 (2)
Indice + coefficient	0	3 (1)

- ✓ **Par fréquences additionnées pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Indice	100 (18)	89 (32)
Valence de Na	6 (1)	28 (10)
Coefficient	0	8 (3)

- ✓ **Par premier choix pour chaque item (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Indice	100 (18)	89 (32)
Valence de Na	0	6 (2)
Coefficient	0	6 (2)

Q7 : QUE SE PASSE-T-IL DURANT LA RÉACTION CHIMIQUE ?

3A1 – 21 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
SG	
Ils s'assemblent pour former le produit	**2**
Ils s'assemblent pour former un atome entier	**1**
Les réactifs fusionnent pendant la réaction chimique	**1**
Ils se transforment, ils changent de formule	**1**
Ils peuvent changer d'état	**1**
Le nombre d'atomes et de molécules ne change pas	**1**
Les réactifs gardent le même nombre d'atomes de chaque espèce de part et d'autre de la flèche	**1**
Les réactifs réagissent ensemble pour former le produit	**1**
Les composés se détachent pour ensuite se rattacher pour former le produit	**1**
Ils se mélangent et vont former un produit	**1**
Sb	
Ils s'additionnent	**1**
Les réactifs se mettent en commun pour créer une réaction chimique	**1**
Ils entrent en contact et vont former un résultat qu'on appelle un produit	**1**
Les réactifs s'attachent entre eux pour former les réactifs	**1**
Il n'y a rien qui se perd, rien qui se crée, tout se transforme – Les réactions chimiques provoquent un changement de la nature chimique de la matière	**1**
Ils réagissent entre eux pour former le produit	**1**
Les réactifs se mélangent entre eux pour faire un produit	**1**
Ils se mélangent et forment une réaction chimique	**1**
Ils se mélangent, entrent en contact et ne forment plus qu'un, les réactifs vont former le produit	**1**
Ils se mélangent et se mettent ensemble	**1**

3A2 – 17 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
SG	
Ils se rassemblent et ne forment plus qu'une seule molécule	**1**
Les réactifs sont mis en contact les uns entre les autres pour former le produit	**1**
Les réactifs s'associent et leur quantité peut changer	**1**
4 atomes de sodium et 2 atomes d'oxygène réagissent pour former $2Na_2O$	**1**
Ils réagissent pour former un produit, un précipité	**1**
Ils vont se décomposer pour former de nouvelles molécules	**1**
Ils s'associent pour former le produit – Ils se séparent et s'attachent	**1**
Sb	
Les réactifs s'additionnent et font leur produit	**1**
Les réactifs sont mis en contact	**1**
Ils s'assemblent	**1**
Pendant la réaction chimique, les réactif se transforment en réagissant et forment suite à un combustible et un comburant dont l'oxygène et forment les produits, qui sont le résultat de la combustion	**1**
Les réactifs se transforment	**1**
Ils se transforment pour avoir des produits	**1**
Ils se mélangent et complètent pour former un groupement de molécules	**1**
Les réactifs réagissent pour former une réaction, qu'on appelle produit	**1**
Ils réagissent entre eux	**1**
Pas de réponse	**1**

3A3 – 16 élèves

Réponse	Nombre d'élèves
Sb	
Ils se mélangent et s'assemblent ce qui forme les produits	**1**
Ils se mélangent et s'assemblent en fonction de la nature des réactifs	**1**
Ils s'assemblent pour former un seul groupe entier et pas deux différents, alors ils sont mis en contact	**1**
Ils sont additionnés entre eux et forment ensemble une autre molécule (=réaction chimique)	**1**
Ils forment un ensemble, une molécule	**1**
L'oxygène qui était avant à l'état gazeux est à l'état solide	**1**
On les brûle (ou autres méthodes) pour voir si un des facteurs peut influencer nos atomes	**1**
La matière se transforme et les réactifs s'accordent	**1**
Les réactifs changent	**1**
Les réactifs se transforment pour former autre chose	**1**
Ils se mélangent pour former des produits	**1**
Les réactifs réagissent entre eux pour former les produits	**2**
Pas de réponse	**3**

BILAN TOTAL

- ✓ **Par catégories de réponses**

Réponses	Nombre d'élèves	Fréquence relative – Tot-2
Tenter de décrire le processus réactionnel en utilisant des verbes comme s'assembler, se réarranger, se lier, etc. (sans référence à une rupture préalable et à la notion de mélange)	20 (7 SG – 13 Sb)	37 %
Réagissent entre eux (sans indication du processus réactionnel)	8 (3 SG – 5 Sb)	15 %
Se transforment (sans indication d'une référence au comment du processus réactionnel)	7 (1 SG – 6 Sb)	13 %
Se mélanger (idée principale)	6 (1 SG – 5 Sb)	11 %
Pas de réponse	4 (4 Sb)	7 %
Référence à des propriétés macroscopiques/des types de réaction (effervescence, combustion, solution, disparition/apparition)	4 (1 SG – 3 Sb)	7 %
Référence explicite à la rupture et/ou formation de liaisons chimiques (au niveau microscopique)	3 (3 SG)	6 %
Conservation du nombre d'atomes	2 (2 SG)	4 %

QUESTION DE REPRÉSENTATION ICONIQUE MICROSCOPIQUE

MODÉLISATION 1 (avant remédiation)

BILAN TOTAL

- ✓ **Par qualité des représentations**

Réponses	Fréquence relative (2013)
Réactifs et produits corrects	37 %
Au moins un réactif/produit correct	31 %
Aucun réactif/produit correct	31 %
Pas de réponse	0 %

- ✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques**

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	13	24 %
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	9	17 %
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	8	15 %
Type 5 - Eclatement des réactifs et/ou des produits	4	7 %
Type 3 – Non-utilisation de l'indice	0	0 %
Type 6 – Représentation d'une autre réaction chimique	0	0 %

- ✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative (2013)
Représentation alternée	17	31 %
Représentation linéaire	12	22 %
Représentation à plusieurs accroches	3	6 %
Représentation décalée	0	0 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par qualité des représentations (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Total (%)
Réactifs et produits corrects	48 (10)	41 (7)	19 (3)	37 (20)
Au moins un réactif/produit correct	38 (8)	24 (4)	31 (5)	31 (17)
Aucun réactif/produit correct	14 (3)	35 (6)	50 (8)	31 (17)

- ✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques (nombre de cas)**

Types d'erreurs	Nombre d'élèves 3A1	Nombre d'élèves 3A2	Nombre d'élèves 3A3	Nombre d'élèves Tot-2
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	5	3	5	13
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	1	1	7	9
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	3	4	1	8
Type 5 - Eclatement des réactifs et/ou des produits	2	1	2	5

- ✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves 3A1	Nombre d'élèves 3A2	Nombre d'élèves 3A3	Nombre d'élèves Tot-2
Représentation alternée	8	4	5	17
Représentation linéaire	6	4	2	12
Représentation à plusieurs accroches	0	2	1	3
Représentation décalée	0	0	0	0

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION

- ✓ **Par qualité des représentations (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Réactifs et produits corrects	67 (12)	22 (8)
Au moins un réactif/produit correct	22 (4)	33 (12)
Aucun réactif/produit correct	11 (2)	44 (16)

MODÉLISATION 2 (après remédiation)

BILAN TOTAL

- ✓ **Par qualité des représentations (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative post-test n°2 (nombre d'élèves)
Réactifs et produits corrects	65 % (36)
Au moins un réactif/produit correct	31 % (17)
Aucun réactif/produit correct	4 % (2)

- ✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques**

Types d'erreurs	Nombre d'élèves	Fréquence relative post-test n°2
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	8	15 %
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	5	9 %
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	3	5 %
Type 5 - Éclatement des réactifs et/ou des produits	3	5 %

- ✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves	Fréquence relative post-test n°2
Représentation linéaire	30	55 %
Représentation décalée	11	20 %
Représentation alternée	3	5 %

BILAN CLASSE PAR CLASSE

- ✓ **Par qualité des représentations (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative 3A1 (%)	Fréquence relative 3A2 (%)	Fréquence relative 3A3 (%)	Fréquence relative Total (%)
Réactifs et produits corrects	75 (15)	56 (9)	63 (12)	66 (36)
Au moins un réactif/produit correct	25 (5)	38 (6)	32 (6)	31 (17)
Aucun réactif/produit correct	0	6 (1)	5 (1)	4 (2)

- ✓ **Par types d'erreurs de représentations iconiques**

Types d'erreurs	Nombre d'élèves 3A1	Nombre d'élèves 3A2	Nombre d'élèves 3A3	Nombre d'élèves Tot-2
Type 1 - Représentation du CPC en CPS séparés	4	3	1	8
Type 4 - Agrégation des réactifs et/ou des produits	1	3	1	5
Type 2 - Non-utilisation ou utilisation incomplète du coefficient	1	1	1	3
Type 5 - Éclatement des réactifs et/ou des produits	1	1	1	3

- ✓ **Par types de représentations iconiques correctes**

Types de représentation iconique correcte	Nombre d'élèves 3A1	Nombre d'élèves 3A2	Nombre d'élèves 3A3	Nombre d'élèves Tot-2
Représentation alternée	0	3	0	3
Représentation décalée	6	3	2	11
Représentation linéaire	10	6	14	30

BILAN EN FONCTION DE L'OPTION

- ✓ **Par qualité des représentations (nombre d'élèves entre parenthèses)**

Réponses	Fréquence relative SG (%)	Fréquence relative Sb (%)
Réactifs et produits corrects	94 (16)	53 (20)
Au moins un réactif/produit correct	6 (1)	42 (16)
Aucun réactif/produit correct	0	5 (2)

CHANGEMENT DE TYPES DE REPRÉSENTATIONS ICONIQUES

3A1 (21 élèves)

Option	Type de représentation Post-Test 1	Type de représentation Post-Test 2
Sb	Liné	CPS
Sb	CPS	CPS
Sb	Alt	CPS
Sb	CPS	Déca
Sb	CPS	/
Sb	CPS	Liné
Sb	KO	CPC
Sb	Alt	Déca
Sb	Alt	Déca
Sb	Alt	Liné
SG	Liné	Liné
SG	Liné	Liné
SG	Alt	Liné
SG	KO	Déca
SG	Liné	Liné
SG	Liné	Liné
SG	Alt	Déca
SG	Liné	Liné
SG	CPS	Liné
SG	Alt	Liné
SG	Alt	Déca

Liné = linéaire ; CPS = séparation du corps pur composé en corps pur simple ; Alt = alternée ; Déca = décalée ; Agreg = agrégation ; 2 acc = à plusieurs accroches ; KO = incorrect

3A2 (17 élèves)

Option	Post-Test 1	Post-Test 2
Sb	Alt	CPS
Sb	2 acc	CPS
Sb	CPS	CPS
Sb	Liné	Liné
Sb	KO	Alt
Sb	Liné	Liné
Sb	Agré	Alt
Sb	Agré	Agré
Sb	CPS	Liné
Sb	Alt	Déca
SG	Liné	/
SG	Liné	Liné
SG	Alt	Liné
SG	2 accr	Déca
SG	Agré	Liné
SG	Alt	Alt
SG	CPS	Déca

3A3 (19 élèves)

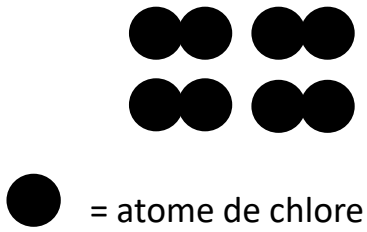
Option	Post-Test 1	Post-Test 2
Sb	Alt	Liné
Sb	CPS	Liné
Sb	KO	Agg
Sb	Liné	Liné
Sb	Alt	Liné
Sb	CPS	Liné
Sb	2 acc	Déca
Sb	KO	Liné
Sb	CPS	Liné
Sb	CPS	Liné
Sb	CPS	Liné
Sb	Alt	Déca
Sb	Alt	Liné
Sb	Agg	Liné
Sb	Liné	Liné
Sb	Alt	Liné
Sb	/	Liné
Sb	/	CPS
Sb	/	Agg

ANNEXE H

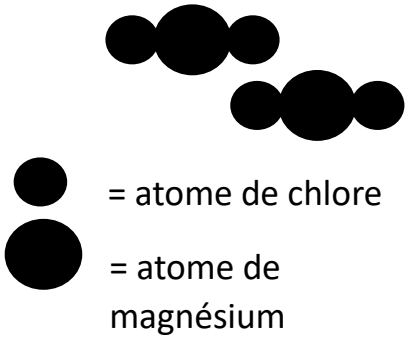
Séance d'exercices de remédiation (représentations iconiques)

1. Ecris symboliquement (coefficient, indice, formule moléculaire) les molécules ou atomes suivants, représentés par des modèles en boules. Aide-toi de la légende :

a)



b)



2. Modélise selon le modèle en boules les molécules ou atomes suivants représentés symboliquement. Propose une légende :

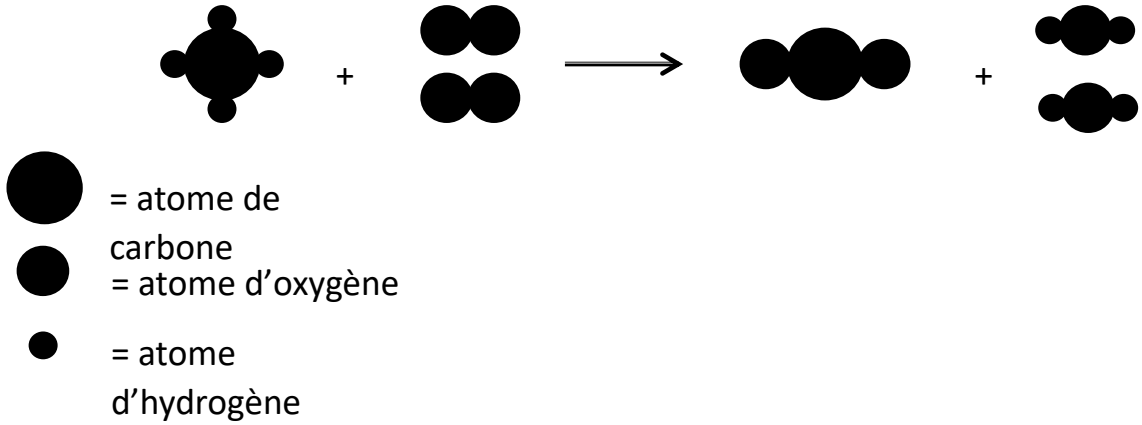
a) 3Fe

b) $2Cl_2O_5$

3. Ecris les équations de réaction (avec coefficients, indices et formules moléculaires) représentées par les modèles moléculaires suivants. Aide-toi de la légende :

a)

b)



4. Représente selon le modèle en boules les réactifs et produits des équations de réaction suivantes :

   a) $4Fe + 3O_2 \longrightarrow 2Fe_2O_3$ (GB = fer ; PB = oxygène)

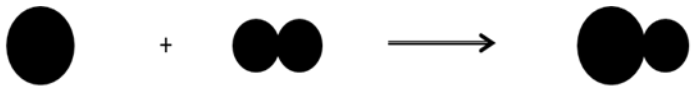
   b) $H_2 + I_2 \longrightarrow 2HI$ (GB = iode ; PB = hydrogène)

   c) $Zn + 2HCl \longrightarrow ZnCl_2 + H_2$ (GB = zinc ; MB = chlore ; PB = hydrogène)

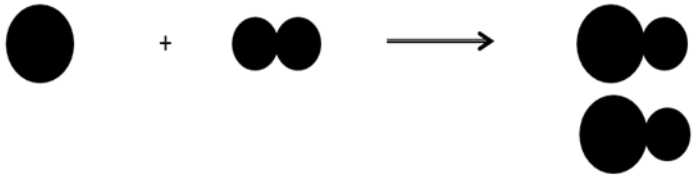
5. Pondère les équations de réaction suivantes en t'aidant des modèles moléculaires en boules.

<u>Exemple :</u>

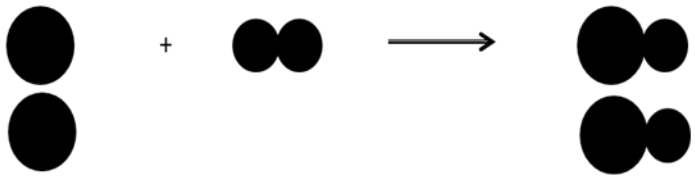
$C + O_2 \longrightarrow CO$ (GB = carbone ; PB = oxygène)



Il manque une petite boule à droite de la flèche : j'ajoute une molécule de CO



Il manque une grosse boule à gauche de la flèche : j'ajoute un atome de C



a) $Fe + S_8 \longrightarrow FeS$ (GB = fer ; PB = soufre)

b) $KClO_3 \longrightarrow KCl + O_2$ (GB = potassium ; MB = oxygène ; PB = chlore)

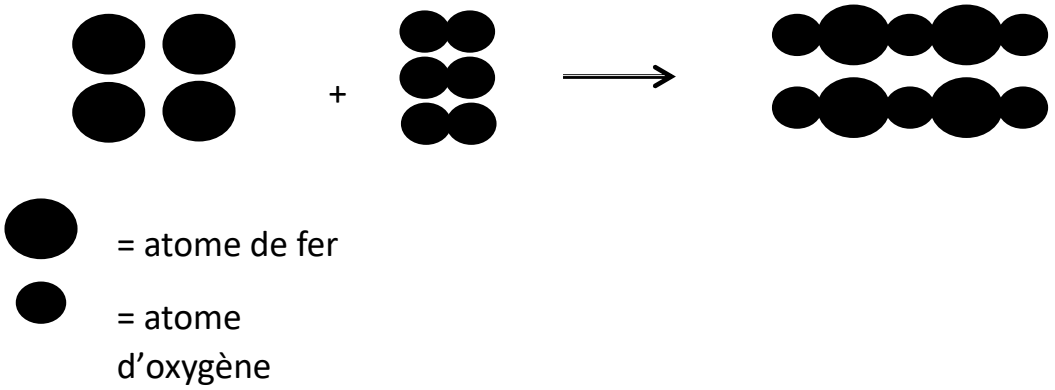
ANNEXE I

Post-test n°2 de 2013 (représentation iconique)

1) Représente selon le modèle en boules les réactifs et produits de l'équation de réaction suivante (grosse boule = atome d'azote ; petite boule = atome d'hydrogène) :

$$N_2 + 3H_2 \longrightarrow 2NH_3$$

2) Ecris l'équation de réaction (avec coefficients, indices et formules moléculaires) représentées par les modèles moléculaires suivants. Aide-toi de la légende :



3) Pondère l'équation de réaction suivante en t'aidant des modèles moléculaires en boules (grosse boule = atome d'iode ; moyenne boule = atome de chlore ; petite boule = atome d'hydrogène).

$$HI + Cl_2 \longrightarrow I_2 + HCl$$

ANNEXE J

Post-test n°1 de 2013

Soit l'équation de réaction suivante (combustion du sodium) :

$$4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}$$

....

a) Inscrire les termes « réactifs » ou « produits » sur les pointillés ci-dessus.
b) Comment peut-on différentier les réactifs des produits ? Citer deux différences

……
……
……
……
……
……

c) Que signifie le signe « + » ?

c.1. Parmi les propositions suivantes, cocher la case qui vous paraît la plus correcte.

- ☐ Le signe « + » signifie qu'il y a réaction chimique entre les deux réactifs.
- ☐ Le signe « + » signifie que les réactifs sont mis en contact.
- ☐ Le signe « + » signifie que l'on mélange les réactifs.
- ☐ Le signe « + » signifie que l'on additionne les réactifs entre eux.

c.2. Si d'autres propositions sont également correctes, inscrire leur(s) numéro(s) ci-dessous:

……

d) Que signifie la flèche ?

d.1. Parmi les propositions suivantes, cocher la case qui vous paraît la plus correcte.

- ☐ La flèche représente la réaction chimique.
- ☐ La flèche indique les résultats de la réaction : les produits.
- ☐ La flèche a la même signification que le signe égal en mathématiques.
- ☐ La flèche signifie « réagissent pour former ».
- ☐ La flèche signifie que les réactifs sont mis en contact.

d.2. Si d'autres propositions sont également correctes, inscrire leur(s) numéro(s) ci-dessous:

……

e) Que signifie le chiffre 4 dans **4**Na ?

e.1. Parmi les propositions suivantes, cocher la case qui vous paraît la plus correcte.

☐ C'est le nombre de molécules de Na impliquées dans la réaction.

☐ C'est le nombre d'atomes de Na impliqués dans la réaction.

☐ Dans cette réaction, il faut quatre fois plus de sodium que de dioxygène.

☐ C'est un coefficient qui permet la pondération de l'équation de réaction.

☐ C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de Na dans une molécule.

e.2. Si d'autres propositions sont également correctes, inscrire leur(s) numéro(s) ci-dessous:

……

f) Que signifie le 2 dans Na_2O ?

f.1. Parmi les propositions suivantes, cocher la case qui vous paraît la plus correcte.

☐ C'est un coefficient : il indique le nombre d'atomes de sodium impliqués dans la réaction.

☐ C'est un indice : il indique le nombre d'atomes de sodium dans la molécule de Na_2O.

☐ C'est la valence du sodium, c'est-à-dire le nombre de liaisons que le sodium peut effectuer avec un autre atome.

f.2. Si d'autres propositions sont également correctes, inscrire leur(s) numéro(s) ci-dessous:

……

g) Que se passe-t-il au niveau des réactifs, pendant la réaction chimique?

……
……
……
……

h) A l'aide de modèles moléculaires en boules, représente les réactifs et les produits de la réaction de combustion du sodium (grosse boule = atome de sodium ; petite boule = atome d'oxygène).

$$\mathbf{4Na_{(s)} + O_{2(g)} \longrightarrow 2Na_2O_{(s)}}$$