



HAL
open science

Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège.

Sophie Canac, Isabelle Kermen

► To cite this version:

Sophie Canac, Isabelle Kermen. Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège.. IREM de Paris, 20, 2018, Cahiers du Laboratoire de Didactique André Revuz, Christophe Hache, 9782866123888. hal-02111659

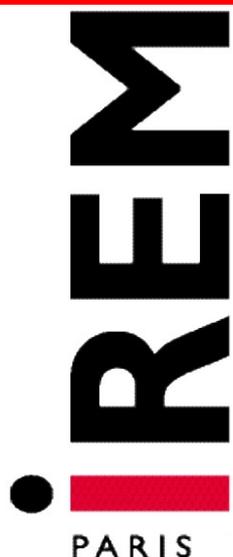
HAL Id: hal-02111659

<https://hal.science/hal-02111659>

Submitted on 26 Apr 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



LDAR

LABORATOIRE DE DIDACTIQUE
ANDRÉ REVUZ



**Cahiers du laboratoire de didactique
André Revuz
n°20**

Juillet 2018

**CONCEPTION D'UNE RESSOURCE DIDACTIQUE FONDÉE SUR
L'HISTOIRE DES SCIENCES POUR INTRODUIRE LES FORMULES
CHIMIQUES AU COLLEGE**

par Sophie Canac et Isabelle Kermen

ISBN : 978-2-86612-388-8

ISSN : 2105-5203

Imprimé par l'IREM de Paris – Université Denis Diderot Paris 7

Exemplaire **téléchargeable** sur notre site dans la section Publication

<http://www.irem.univ-paris-diderot.fr/>

Coordonnées de l'IREM

Pour venir à l'IREM (il est possible de consulter et d'acheter les publications sur place):
Université Paris-Diderot, Bâtiment Sophie-Germain,
8 place Aurélie Nemours (sur l'avenue de France), huitième étage,
75013 Paris 13ème arrondissement
(métro 14 -Bibliothèque François Mitterrand ou tramway ligne T3a – Avenue de France)

Nous Contacter

Pour téléphoner: 01 57 27 91 93

Pour écrire à l'IREM concernant les publications:

par voie postale:

Locufier Nadine
IREM de Paris – Case 7018
Université Paris Diderot
75205 Paris cedex 13

par voie électronique:

nlocufier@irem.univ-paris-diderot.fr

La liste des publications de l'IREM est mise à jour sur notre site web :

<http://www.irem.univ-paris-diderot.fr/> (en bas à gauche de la page d'accueil)

Pour rester informé:

inscription à la liste de diffusion de l'IREM de Paris également sur le site de l'IREM

Conception d'une ressource didactique fondée sur
l'histoire des sciences pour introduire les formules
chimiques au collège

Par

Sophie Canac et Isabelle Kermen

Membres du LDAR

Sommaire

Introduction.....	5
Les recherches menées autour de l'élaboration d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège	7
Cadres théoriques.....	8
Analyses préliminaires.....	12
Élaboration de la ressource pilote	16
Mise en œuvre de la ressource pilote	21
Conclusion	23
Bibliographie.....	24
La ressource pilote.....	29
Partie 1 du scénario.....	29
Partie 2 du scénario.....	32
La ressource modifiée.....	36
Partie 2 du scénario : Les dialogues.....	36
Proposition d'usage des dialogues.....	42
Annexe : Les espaces de contraintes et de nécessités.....	48
Formule de l'eau.....	48
Formule des corps simples	56

Introduction

Cette brochure présente un exposé succinct des recherches conduites autour de l'élaboration d'une ressource fondée sur l'histoire des sciences pour l'introduction des formules chimiques au collège, en classe de quatrième, et la ressource elle-même.

L'élaboration s'est effectuée en appui sur des cadres de reconstruction didactique de séquences d'enseignement-apprentissage – celui de la reconstruction didactique incluant des matériaux historiques (de Hosson, 2011) et du « *model of educational reconstruction* » (Duit et al., 2012) – un cadre d'analyse des pratiques enseignantes, la double approche didactique et ergonomique (Robert & Rogalski, 2002) et sur des espaces de contraintes et nécessités (Orange, 2000 ; Lhoste 2008).

Les investigations empiriques préliminaires conduites auprès des élèves et de quelques enseignants montrent la nécessité d'articuler les registres des modèles, le registre de la réalité et le registre du langage aux niveaux microscopique et macroscopique pour l'apprentissage des concepts de transformation chimique et réaction chimique. Ces registres et niveaux forment l'ossature du cadre didactique ayant guidé les analyses effectuées.

Une première ressource dite ressource pilote a été élaborée. Sa mise en œuvre est brièvement présentée et analysée. Le rejet par deux enseignants de la partie du scénario historique permettant d'élaborer les raisons justifiant les formules conduit à une première proposition d'évolution. La ressource modifiée est actuellement en cours d'évaluation.

La brochure comporte trois parties et une annexe : la première partie expose les recherches conduites autour de l'élaboration de la ressource, la deuxième partie présente les documents constituant la ressource pilote et la troisième partie ceux de la ressource modifiée. L'annexe présente les espaces de contraintes et de nécessités qui ont été construits par S. Canac pour caractériser les cadres de pensée et hypothèses des chimistes au cours de l'histoire.

Les recherches menées autour de l'élaboration d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège

Ce texte expose les recherches conduites autour de l'élaboration d'une ressource pour l'introduction des formules chimiques dans l'enseignement secondaire (en France) à partir de deux présupposés initiaux : l'histoire des sciences fournit des éléments pertinents pour cette élaboration et la prise en compte de la distinction entre modèles et réalité empirique est nécessaire.

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

Le passage des connaissances ordinaires aux savoirs scientifiques se fait en recherchant les raisons qui articulent des contraintes empiriques aux nécessités du modèle (Orange, 2000). La mise en tension du registre empirique et du registre des modèles permet de prendre conscience de ce qui est possible et de ce qui ne l'est pas (Orange, 2005). S'appuyer sur l'histoire des sciences permet de mettre en évidence la (lente) construction des savoirs et les désaccords qui ont pu apparaître, et finalement les raisons qui ont conduit aux savoirs scientifiques actuels. De plus, distinguer réalité empirique et modèles est une nécessité pour ne pas favoriser une tendance reconnue des élèves à imaginer le modèle comme une copie de la réalité (Ben-Zvi, Eylon, & Silberstein, 1986 ; Grosslight, Unger, Jay, & Smith, 1991).

Pour Dewey et Bachelard, les faits doivent permettre le questionnement (Fabre, 2005). Nous souhaitons proposer dans la ressource des faits expérimentaux en lien avec les concepts qui puissent déclencher le questionnement des élèves et la recherche des raisons qui ont amené les chimistes à proposer les formules plus que la recherche de la « bonne formule », les formules chimiques constituant une partie essentielle du langage des chimistes. Les concepts se définissant à travers un réseau, nous faisons l'hypothèse que l'introduction des concepts d'espèce chimique, d'atome, de molécule, de transformation chimique et de réaction chimique, passe par une mise en dialectique des différents registres de la chimie : langage, modèles et réalité, et ce, dès les premières années d'enseignement de la chimie. Faire réaliser des expériences n'apporteraient pas un noyau suffisant pour susciter la réflexion des élèves, une culture expérimentale suffisante ne s'acquiert pas en une année scolaire, tout au plus à l'issue de la scolarité. Des textes à discuter apparaissent alors plus propices.

Notre problématique s'articule autour de la conception d'un scénario à proposer aux enseignants, qui inclut un appui sur l'histoire des sciences et une prise en compte de la distinction modèle et réalité pour introduire le langage élémentaire de la chimie. Une interrogation concerne son utilisation et son acceptation par les enseignants, ce qui va nous conduire à proposer une ressource qui corresponde davantage à un parcours d'apprentissage sous-tendu par nos intentions qu'à une séquence d'enseignement constituée de séances aux objectifs et activités fixés sans possibilité de modification.

Nous présentons maintenant nos cadres théoriques, ceux donnant les principes de la reconstruction didactique que nous effectuons en vue de concevoir la ressource, et celui de la

double approche didactique et ergonomique pour analyser les pratiques enseignantes. Cette reconstruction didactique comporte des analyses préliminaires, l'élaboration de la ressource et une première mise en œuvre. Les analyses préliminaires sont constituées d'une analyse de contenu que nous appelons cadre didactique. Nous avons ensuite effectué une première vague d'investigations empiriques pour essayer de circonscrire l'enseignement-apprentissage du langage élémentaire de la chimie (noms et formules) en France : analyse des ressources institutionnelles, analyse des acquis des élèves et analyse des pratiques ordinaires d'enseignement. L'élaboration de la ressource proprement dite commence par une enquête historique visant à rechercher les raisons qui ont permis la construction des formules et se poursuit par la présentation de la ressource pilote elle-même intégrant une controverse historique. Nous analysons ensuite une première mise en œuvre de la ressource pilote qui nous conduit, en conclusion, à proposer une évolution de la ressource.

Cadres théoriques

Principes d'une reconstruction didactique pour élaborer et valider des séquences d'enseignement-apprentissage

Nous présentons brièvement les deux cadres d'élaboration de séances d'enseignement apprentissage ayant guidé notre travail et consistant en une reconstruction didactique (de Hosson, 2011b ; Duit, 2007 ; Duit, Gropengießer, Kattmann, Komorek, & Parchmann, 2012). En appui sur la méthodologie de l'ingénierie didactique (Artigue, 1994), de Hosson (2011b) a formalisé l'élaboration de parcours d'apprentissage fondés sur l'histoire des sciences, plus précisément incorporant des idées ayant permis une avancée conceptuelle dans l'histoire des sciences. Cette élaboration nécessite une enquête didactique qui analyse les difficultés des élèves et les contraintes du système scolaire pesant sur le savoir étudié. Les résultats de cette enquête didactique orientent une lecture de l'histoire du savoir en question qui aboutit à une analyse historique de la construction des concepts visés (de Hosson, 2011a ; de Hosson & Décamp, 2014 ; de Hosson & Kaminski, 2006). La réalisation de cette enquête historique permet d'extraire des informations historiques qu'il s'agit ensuite de réorganiser pour élaborer un *media*, ressource utilisée dans la construction d'une séquence d'enseignement (*ibid.*). L'enquête didactique et l'enquête historique font partie des analyses préalables de l'ingénierie didactique auxquelles on peut adjoindre une étude de l'enseignement usuel et de ses effets. La conception de la séquence d'enseignement est accompagnée d'une analyse *a priori* précisant les hypothèses faites et susceptibles de prévoir les comportements des élèves. Après l'expérimentation en classe, l'analyse *a posteriori* tenant compte des conditions réelles est confrontée à l'analyse *a priori* pour évaluer l'ingénierie.

Le rôle de l'enseignant qui met en œuvre le *media* ou la séance, imaginés par les chercheurs peut être à l'origine d'écarts inattendus, allant même parfois à l'encontre des intentions des concepteurs (Pintó, 2005). Dans les séances qu'elle avait conçues, de Hosson n'a pas eu à tenir compte d'écart provenant d'une appropriation de l'ingénierie par l'enseignant dans la mesure où elle avait elle-même conduit l'expérimentation en classe.

Dans le modèle de reconstruction didactique (MER, model of educational reconstruction Duit, 2007 ; Duit et al., 2012) issu de la tradition didactique allemande, un processus itératif s'établit entre la clarification du contenu scientifique, les investigations empiriques, la conception et l'évaluation de la séquence. Les investigations empiriques prennent en compte les points de vue des élèves et des enseignants dans les analyses préliminaires visant à établir ce qu'il sera possible d'apprendre et d'enseigner dans la séquence à concevoir, mais aussi pendant et après l'expérimentation en classe des différentes versions de la séquence conçue.

Les analyses qualitatives menées à partir d'entretiens ou de captations vidéo des séances de classe conduisent à la fois à l'affinement de la séquence et à l'ajustement du contenu à enseigner. Comparant son approche au modèle de reconstruction didactique, outre la non prise en compte des variables liées à l'enseignant, de Hosson (2011b) admet deux différences majeures : le savoir considéré est spécifiquement pris dans son contexte historique et les enquêtes sur les élèves ne concernent que les aspects cognitifs et non pas motivationnels ou affectifs.

Dans la même lignée, notre étude vise principalement¹ la construction de concepts par les élèves à partir d'un *media* faisant place au contexte historique d'élaboration des concepts visés. Cependant, rejoignant en cela le processus en jeu dans le MER (Duit et al., 2012), nous effectuons avant l'expérimentation en classe une étude des pratiques usuelles d'enseignement du savoir étudié. En effet, le *media* ayant vocation à être utilisé par des enseignants ordinaires (et volontaires), il s'agit de caractériser les conditions habituelles d'introduction des formules chimiques pour déterminer une forme de distance entre celles-ci et les conditions que le *media* nécessite. Cette distance ne doit pas être trop importante pour que le *media* soit utilisable par les enseignants (Coppens, Rebmann, & Munier, 2009) et sans trop de distorsion par rapport à nos intentions initiales (Pintó, 2005). De plus, une fois ces conditions précisées, l'expérimentation en classe est évaluée afin de procéder à des modifications du *media* visant à répondre aux manques constatés, dans le cadre d'un processus itératif (Duit et al, 2012).

Double approche didactique et ergonomique des pratiques

Pour analyser les pratiques des enseignants participant à notre étude, nous nous référons au cadre de la double approche didactique et ergonomique (Robert & Rogalski, 2002) qui repose sur la théorie de l'activité. L'activité d'un sujet (élève ou enseignant) comporte deux dimensions : l'activité productive qui correspond à la réalisation de la tâche (le sujet agit sur le réel) et l'activité constructive qui correspond aux effets de la réalisation de la tâche sur le sujet (le réel agit sur le sujet) (Pastré, 2007). Selon la nature des tâches, l'activité constructive est plus ou moins importante, elle conduit à la restructuration des structures cognitives amenant à la formation des concepts pour les élèves et au développement de l'expérience professionnelle s'agissant des enseignants. Dans ce cadre, les pratiques s'incarnent dans les réponses (préparations de séances et mises en œuvre) qu'un enseignant singulier apporte à des prescriptions officielles, compte tenu de ses ressources et des contraintes de la situation de travail (Rogalski & Robert, 2015). La complexité des pratiques enseignantes est provisoirement levée en considérant qu'elles peuvent être analysées selon cinq composantes qui sont ensuite combinées pour inférer les logiques d'action des enseignants (Robert & Hache, 2013). Les composantes cognitive et médiative sont caractérisées par les choix des enseignants en termes de contenu chimique, de tâches proposées aux élèves et de gestion de la séance où l'accompagnement procuré peut redéfinir les tâches. Ces choix sont influencés par trois déterminants, personnel, institutionnel et social auquel sont associées les trois autres composantes des pratiques : institutionnelle, personnelle et sociale. Le déterminant institutionnel regroupe les programmes, les horaires, les ressources dont les manuels et les produits chimiques qui conditionnent en partie les tâches conçues par l'enseignant. Les connaissances didactiques et épistémologiques de l'enseignant modèlent les contenus à enseigner qu'il choisit, au même titre que son expérience passée, et toutes appartiennent au déterminant personnel. Le déterminant social tient compte des habitudes professionnelles dans la communauté disciplinaire et dans l'établissement, des relations entre ces acteurs. Les élèves de la classe, en ce qu'ils appartiennent à des groupes sociaux, font aussi partie de ce

¹ Nous pensons cependant que l'usage de documents à caractère historique peut avoir un rôle sur la motivation des élèves, que nous ne cherchons pas à caractériser.

même déterminant des pratiques de l'enseignant (Masselot & Robert, 2007). À ce cadre est associée une méthodologie : les séances de classe sont analysées selon trois aspects, l'itinéraire cognitif proposé aux élèves, les formes de travail effectives, les échanges entre élèves et l'enseignant pendant la séance ; il s'agit ensuite de reconstituer les choix de l'enseignant et de les qualifier en termes de composantes des pratiques qui sont combinées pour inférer les logiques d'action. Les analyses de l'itinéraire cognitif, des formes de travail et des échanges élèves-enseignant s'effectuent selon un cadre proprement didactique qui dépend du contenu en jeu. Cependant, elles visent aussi à déterminer si les élèves ont la possibilité de développer une activité constructive. Des entretiens ou des questionnaires complètent les données.

Espace des contraintes et nécessités adapté au langage symbolique de la chimie

Suivant le point de vue des épistémologues non positivistes (Bachelard, Canguilhem, Popper), « faire des sciences c'est d'abord chercher des raisons » (Orange, 2000, p. 24). Au cours de l'enquête historique, nous recherchons les raisons qui ont permis l'établissement des formules chimiques. Nous faisons l'hypothèse que cette élaboration s'est faite en tension entre les registres des modèles et le registre empirique, au moins pour les atomistes de la première moitié du XIX^e siècle.

Orange (2000) propose de visualiser les contraintes et les nécessités qui sont mobilisées par les scientifiques au moment de l'élaboration des savoirs scientifiques, ou par des élèves au moment de la construction des connaissances, dans un espace dit des contraintes (Figure 1). Il l'utilise dans le cas de la construction du concept de « milieu intérieur » par Claude Bernard.

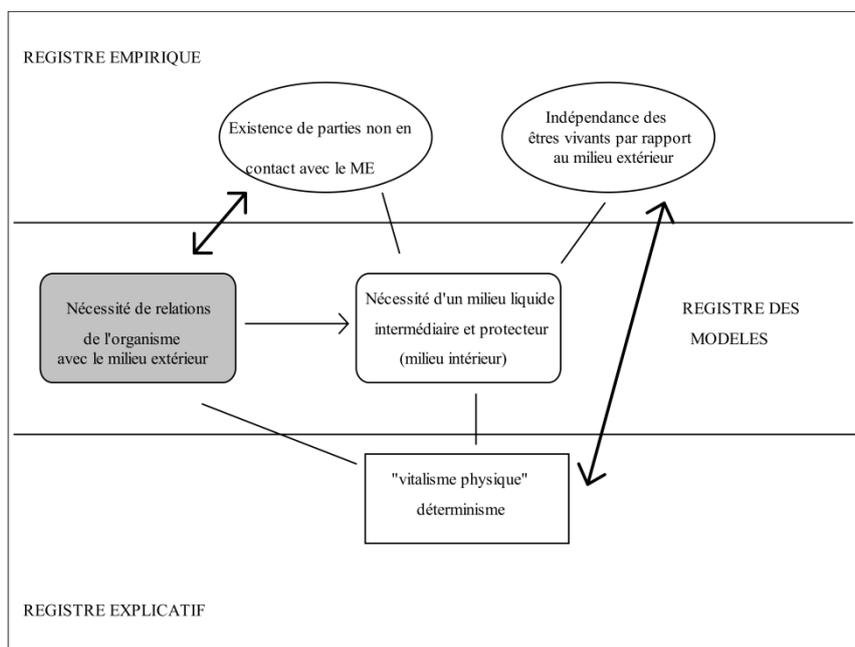


Figure 1 Espace des contraintes de la deuxième problématisation du milieu intérieur par Claude Bernard (Orange, 2000)

Crépin-Obert (2011) reprend cet espace pour étudier une controverse historique sur l'origine des fossiles entre Voltaire et Guettard. Lhoste (2008) propose un espace des contraintes modifié (Figure 2). Il ajoute une séparation permettant de distinguer les contraintes dans la partie gauche, des nécessités dans la partie droite. Lhoste et Peterfalvi (2009, p. 49) proposent « de considérer comme nécessité un construit nouveau sur la base d'un raisonnement actuel, alors qu'une contrainte serait un déjà-là convoqué dans un tel raisonnement. Ainsi une nécessité relève de l'apodictique et vient contraindre les solutions possibles ». Les nécessités

empiriques correspondent aux objets empiriques trouvés au sein de questionnements à partir de nécessités sur les modèles construits.

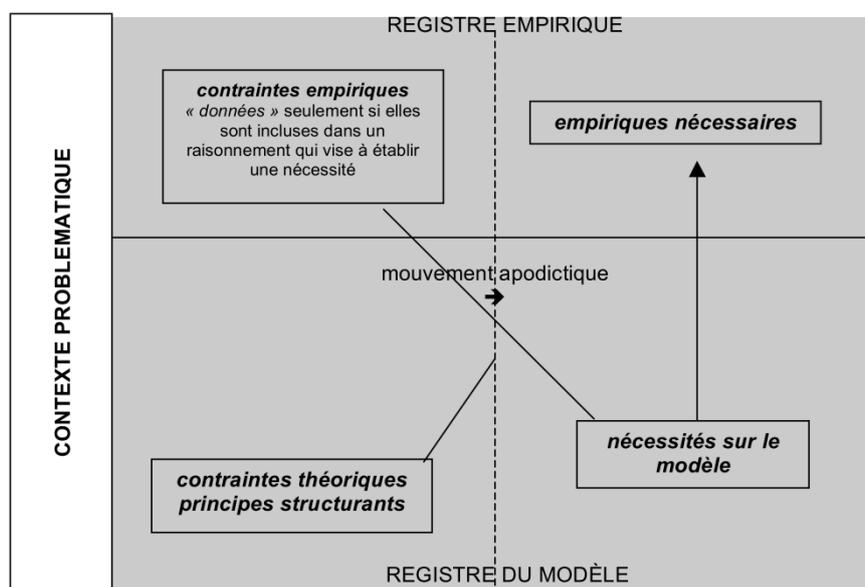


Figure 2 Une représentation modifiée des « espaces de contraintes » : les « espaces contraintes et nécessités » (Lhoste, 2008, p. 79)

Nous voulons mener l'enquête historique sur l'élaboration des formules chimiques en suivant l'évolution d'un « construit nouveau » (Lhoste & Peterfalvi, 2009). Nous recherchons en priorité les contraintes empiriques et théoriques qui ont conduit à des nécessités pour le registre symbolique. Nous décidons de reprendre l'espace des contraintes et des nécessités de Lhoste et Peterfalvi (2009) en l'adaptant à la chimie. Nous ajoutons pour cela un registre symbolique que nous plaçons au centre (Figure 3). Nous retrouvons ainsi le langage en tant que méta-niveau entre le macroscopique (registre empirique) et le microscopique (registre des modèles)². Les contraintes symboliques correspondent à ce qui est « déjà là » (Lhoste & Peterfalvi, 2009, p.49) pour l'écriture de la formule finale. Le symbolique a aussi été un outil pour de nouvelles connaissances (Klein, 2001). Nous pensons alors qu'il est possible que le symbolique soit à l'origine de nécessités dans le registre des modèles ou dans le registre empirique.

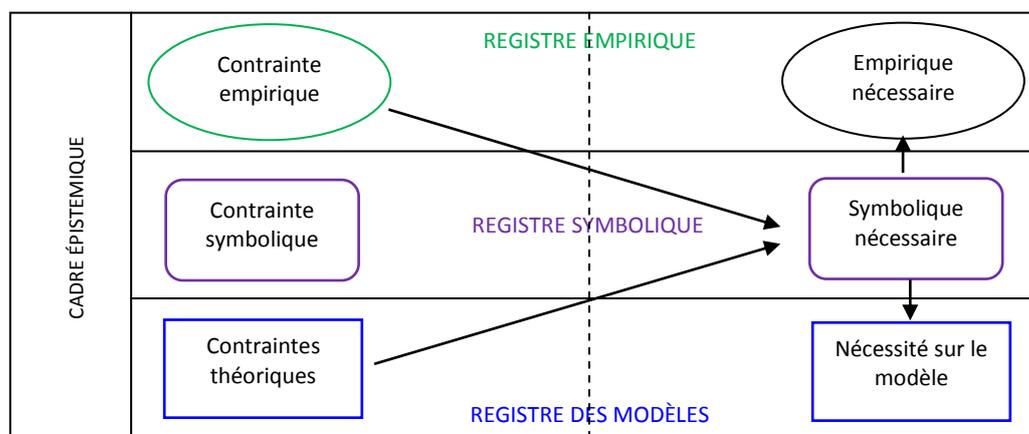


Figure 3 Espace des contraintes et des nécessités pour le langage symbolique de la chimie

² Les modèles utilisés dans la première moitié du XIX^e siècle sont microscopiques, les modèles thermodynamique et cinétique n'apparaissent que bien plus tard.

Par rapport à l'espace de Lhoste (Figure 2), nous remplaçons le contexte problématique par le cadre épistémique (Figure 3) tel que défini par Piaget et Garcia (1983) et repris par Orange (2005) ou Crépin-Obert (2010). Ce dernier doit contenir les différents registres explicatifs utilisés par chaque chimiste ou groupe de chimistes en tant que fondements de leur logique explicative (Orange, 2000). On doit y retrouver à la fois les savoirs du scientifique, notamment les théories auxquelles il se réfère et auxquelles réfèrent les modèles en tant que contraintes ou nécessités, mais aussi des aspects plus larges mis en jeu au cours de l'activité intellectuelle entre le problème perçu et la solution (Orange, 2005).

L'utilisation de cet espace doit nous permettre de faire émerger les raisonnements tenus par les chimistes du XIX^e siècle et mettre ainsi en évidence les controverses autour du langage symbolique pour la reconstruction didactique.

Analyses préliminaires

Cadre didactique : langage, registres et niveaux de la chimie

Reprenant des travaux antérieurs (Kermen & Méheut, 2011 ; Martinand, 1998 ; Tiberghien, 1994), Kermen (2018) s'appuie sur l'articulation du registre des modèles et du registre empirique pour catégoriser le savoir à enseigner, et l'adapte à un savoir particulier les modifications chimiques de la matière. Deux réalités sont distinguées dans le registre empirique : la réalité perçue, première description du monde en termes d'objets et d'événements (Tiberghien, 1994) à partir d'un vocabulaire et de concepts de la vie quotidienne (modification d'une couleur, formation d'un solide,...) et la réalité idéalisée (Gilbert, Pietrocola, Zylbersztajn, & Franco, 2000 ; Kermen & Méheut, 2011), description chimique de la réalité expérimentale mettant en jeu les concepts d'espèce chimique et de transformation chimique. Une transformation chimique correspond à un bilan macroscopique en termes d'espèces chimiques, effectué pour deux états d'un système fermé, ces deux états ne présentant pas la même composition. La réaction chimique est le modèle d'une famille de transformations chimiques mettant en jeu les mêmes espèces chimiques et joue un rôle interprétatif, unificateur (Méheut & Chomat, 1990), prédictif. Elle précise les espèces réactives, les espèces formées et les proportions qui accompagnent ces modifications respectant la conservation de la masse. Les espèces chimiques, abstraction majeure par rapport à l'expérience quotidienne (Taber, 2013), constituent un concept clé à l'échelle macroscopique. Une espèce chimique est aussi vue comme un ensemble d'un nombre considérable d'entités (molécules, atomes, particules sécables) identiques de l'échelle microscopique. Lorsque des processus chimiques sont en cours, les chocs incessants entre entités du niveau microscopique peuvent donner lieu (chocs efficaces) à de nouvelles particules correspondant à la formation de nouvelles espèces au niveau macroscopique.

Pour désigner et utiliser les concepts des modèles et de la réalité idéalisée, le langage symbolique de la chimie (noms et formules chimiques) est nécessaire. Les noms et les formules chimiques ont une double interprétation car ils désignent tout aussi bien le niveau macroscopique (les espèces chimiques) que le niveau microscopique (atomes ou molécules). Bien que d'essence macroscopique, l'équation chimique qui symbolise la réaction chimique peut aussi s'interpréter au niveau microscopique. Ce qui pourrait paraître comme une éventuelle ambiguïté est une richesse pour le chimiste (Taber, 2013). Ce système de représentations a conduit à de significatives avancées dans l'histoire de la chimie en permettant de réaliser des expériences sur une feuille blanche en lieu et place de la paillasse (Klein, 2001). Nous considérons le langage symbolique comme un méta-niveau de savoirs (Canac & Kermen, 2016). Il permet tout à la fois de représenter le registre des modèles et la

réalité idéalisée, et de jouer un rôle de passerelle entre le niveau macroscopique et le niveau microscopique (Taber, 2013). Le nom, eau, et la formule chimique, H_2O , désignent aussi bien le niveau macroscopique, par exemple le liquide dans un verre, que la molécule.

Ces considérations sont résumées sur la Figure 4 qui prend l'exemple de la combustion du méthane.

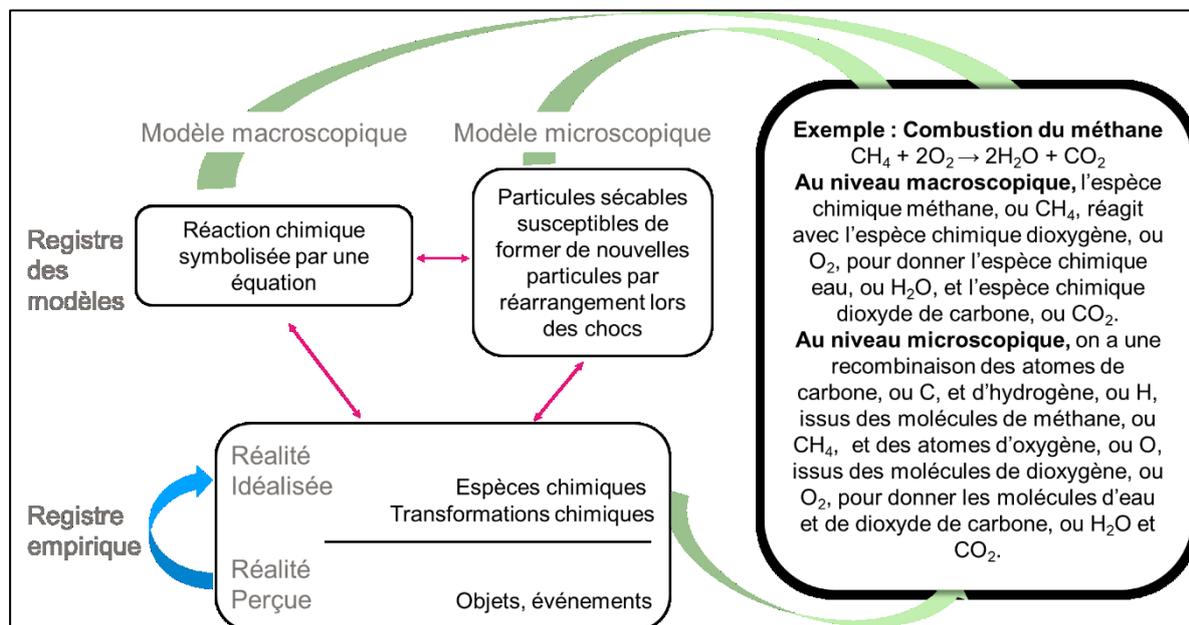


Figure 4 : articulation entre registres et niveaux de la chimie exemplifiée par l'utilisation du langage symbolique dans la combustion du méthane.

Signalons pour finir que les concepts scientifiques ne sont jamais définis de façon isolée mais toujours à travers un réseau. Prenons l'exemple du concept d'atome, définir l'atome se fait en lien avec les concepts de molécule et de réaction chimique et donc également en relation avec ceux d'espèce chimique et de transformation chimique. Ces concepts se situent à deux niveaux, macroscopique et microscopique et appartiennent à différents registres, que l'on retrouve sur la Figure 4. Ce cadre didactique tel qu'il vient d'être brièvement présenté constitue aussi une clarification du contenu au sens du MER (Duit, 2007 ; Duit *et al.*, 2012)).

Analyse des ressources institutionnelles : programme et manuels

Les programmes du collège ont été analysés pour déterminer comment l'introduction des noms et des formules chimiques est préconisée. Ils ne comportent aucune indication sur la nomenclature. Il est proposé d'introduire les formules chimiques en lien avec les concepts de molécule et d'atome, donc explicitement au niveau microscopique mais seulement implicitement dans les réactions chimiques au niveau macroscopique. Le double aspect microscopique et macroscopique du langage n'apparaît explicitement à aucun niveau des programmes, ni même dans ceux du lycée. Les différents concepts sont introduits de façon successive et aucune recommandation ne suggère de les mettre en réseau.

Dans les manuels scolaires du collège qui ont été examinés, aucune raison n'est proposée pour justifier les noms scientifiques et les formules chimiques utilisés. La réaction chimique n'est pas présentée comme un modèle macroscopique. Au moment de leur introduction, les atomes sont seulement caractérisés par leur symbole et non par leur masse et leur valence comme pour les chimistes atomistes au congrès de Karlsruhe (1860), deux attributs du concept au sens de (Barth, 2001). Le premier attribut devrait permettre de faire le lien avec le

principe de conservation de la masse au cours des transformations chimiques, propriété présente dans les programmes. L'introduction de la notion de valence est sans doute un changement important dans le curriculum mais elle est la contrainte théorique nécessaire qui permet de justifier les formules des corps simples. À ce stade des connaissances des élèves sur la constitution de l'atome, rien ne permet de comprendre cette notion mais « pourquoi certaines questions disciplinaires ne resteraient-elles pas ouvertes le temps qu'il faut ? C'est peut-être cette volonté de répondre trop vite "quelque chose" qui ferme le débat de façon non satisfaisante et démobilise bon nombre d'élèves » (Astolfi cité par Lhoste & Peterfalvi, 2009, p. 103). La valence notamment permettrait aussi de justifier en partie les modèles moléculaires fréquemment utilisés dans les manuels scolaires.

Les formules et les noms sont associés au niveau microscopique lors de leur introduction, et le glissement vers l'espèce chimique et le niveau macroscopique est implicite. Aucun manuel n'indique explicitement que le langage symbolique représente à la fois les niveaux macroscopique et microscopique. Il n'est pas présenté comme un méta-niveau ni comme un savoir apodictique.

Analyse des acquis des élèves

Une enquête par questionnaire (Canac & Kermen, 2016) a été menée auprès de plusieurs centaines d'élèves à différents niveaux de la scolarité en France, allant du collège à la première année d'université, pour évaluer dans quelle mesure les élèves (et les étudiants) maîtrisent le langage symbolique élémentaire et s'ils ont conscience de son rôle de passerelle entre niveau macroscopique et niveau microscopique. À tout niveau de la scolarité, les élèves ont de grandes difficultés à manier les notions qui ont été introduites dès les deux premières années d'enseignement de la chimie. Une partie des élèves interrogés peine à décoder une formule chimique hors du contexte d'une équation chimique (de 30% à plus de 50% selon le niveau d'étude considèrent que CH_4 et C_2H_8 sont deux formules d'une même molécule) et la grande majorité échoue dans le contexte d'une équation chimique. Un grand nombre d'élèves considère que HOH , OH_2 et H_2O ne désignent pas la même molécule, alors que la connaissance de cette souplesse d'écriture est un enjeu fondamental pour le chimiste. Les élèves interrogés ne sont pas capables d'associer correctement à un nom ou une formule à la fois un critère macroscopique (corps pur ou mélange) et un critère microscopique (atome ou molécule). De plus, la vision microscopique des noms et des formules chimiques s'accroît avec le niveau d'étude. Cette difficulté à associer deux concepts (l'espèce et l'entité) à une formule brute avait déjà été repérée dans d'autres pays (Mzoughi-Khadhraoui & Dumon, 2012 ; Taskin & Bernholt, 2014). Par contre, qu'elle apparaisse aussi pour les noms constitue un résultat nouveau qui montre que le caractère dual du langage symbolique (nom et formule) n'est pas reconnu par la majorité des élèves en fin de cursus scientifique. Il semble qu'il faille imputer ces résultats à l'enseignement actuel qui favoriserait une vision microscopique des noms et formules.

Observation des pratiques ordinaires

Nous faisons l'hypothèse qu'il existe des contraintes institutionnelles, épistémologiques et didactiques qui mettent les enseignants en difficulté au moment de l'introduction des formules chimiques faute de ressources adaptées. Pour étayer cette hypothèse, deux séances de classe ordinaire en quatrième ont été filmées dans deux établissements avec deux enseignants volontaires qui ont été interrogés dans un entretien post-séance. Ces séances correspondaient à l'introduction des formules chimiques. Nous avons cherché à caractériser les différences et similitudes dans le scénario proposé par les enseignants, à déterminer les liens effectués entre registre empirique, registre des modèles et registre symbolique. En particulier nous avons

examiné si les liens effectués conduisent les enseignants à présenter le langage symbolique comme un méta-niveau et s'ils fournissent des raisons quant à l'élaboration des formules chimiques. La méthode adoptée a consisté d'abord à caractériser les tâches assignées aux élèves, l'organisation du travail (qui fait quoi ? quand ? comment ?) et l'étayage proposé par les enseignants. Les transcriptions des vidéos ont été découpées en épisodes, chaque épisode étant indexé à la réalisation d'une tâche dont l'objectif a été reconstitué. Dans un deuxième temps, les discours ont été analysés pour déterminer les registres de la chimie (empirique, modèles, représentation) mis en œuvre au cours de la séance et le niveau de langage (macroscopique ou microscopique) utilisé par chaque enseignant. Enfin les entretiens ont apporté certaines informations permettant d'approcher les déterminants institutionnel, personnel et social.

Au cours des deux séances, les enseignants observés, Aude et Mathieu, effectuent des choix analogues quant aux contenus chimiques proposés et à l'organisation du travail adoptée (composantes cognitive et médiative). Leurs séances sont proches au sens où ils proposent un nombre équivalent de tâches de même type, simples pour la plupart, cependant elles diffèrent par la nature des activités introductives, les exemples utilisés et la répartition temporelle des tâches. Les deux séances sont des cours dialogués, le temps réservé au travail individuel est très réduit. Les deux enseignants guident les élèves pas à pas, fournissent des exemples de la vie courante pour illustrer certains de leurs propos et adoptent un discours bienveillant pour encourager les élèves. Ils font travailler aux élèves le codage des formules chimiques à partir de la composition de la molécule déduite elle-même du nom chimique. Le registre empirique est absent pour justifier la formule chimique. Seul le nom chimique (dioxygène, dihydrogène, dioxyde de carbone) semble leur permettre de le faire. Mais quand arrive le cas de l'eau, ils doivent demander aux élèves de se souvenir de la formule, ce qui peut paraître paradoxal dans la séance introduisant les formules chimiques. Ils illustrent les formules chimiques en faisant manipuler des modèles moléculaires aux élèves. Tous deux indiquent pendant l'entretien que la seule justification possible des formules dans le registre des modèles est la liaison covalente (connaissance didactique) mais que le programme ne leur permet pas d'évoquer (déterminant institutionnel).

Seul le registre des modèles microscopiques est mis en relation explicite avec le registre symbolique. La formule ou le nom ne semblent pas désigner l'espèce chimique. La teneur du discours ne permet pas d'associer explicitement les noms et formules aux deux niveaux, macroscopique et microscopique. Réussir les tâches proposées ne peut pas conduire les élèves à appréhender le langage symbolique comme un méta-niveau.

Les contraintes institutionnelles et la non-connaissance de certaines difficultés des élèves semblent être à l'origine des choix analogues des deux enseignants alors que la vision sociale du niveau de la classe et la vision personnelle de chaque enseignant à propos de l'enseignement les amènent à investir les marges de manœuvre possibles différemment dans les exercices et l'étayage qu'ils procurent aux élèves.

Bien que cette étude ne porte que sur deux enseignants, les séances correspondent à ce que nous qualifions d'ordinaire pour l'introduction des formules chimiques en quatrième. En effet, les régularités observées entre les deux séances semblent cohérentes à la fois avec les contraintes institutionnelles et avec les difficultés des élèves dans l'utilisation et l'interprétation du langage symbolique déjà repérées (Canac & Kermen, 2016). Nous considérons alors que l'enseignement des formules chimiques au moment de leur introduction en collège ne permet pas aux élèves d'établir les liens adéquats entre les différents registres et niveaux de la chimie.

Élaboration de la ressource pilote

Aude et Mathieu ne semblent pas en mesure d'apporter des raisons qui conduisent à l'élaboration et au choix des formules en dehors du modèle de Lewis qui n'est introduit qu'à partir du lycée dans les programmes. Pourtant les premières formules chimiques s'élaborent pendant la première moitié du XIX^e siècle et le modèle de l'atome alors disponible – particule élémentaire insécable qui se conserve dans les transformations chimiques – est équivalent à celui qui est donné aux élèves au moment de l'introduction des formules au collège. Nous avons fait l'hypothèse que les raisons données par les chimistes pour élaborer les premières formules ont pu s'articuler entre contraintes du registre empirique et du registre des modèles et qu'elles ont conduit à des nécessités pour le registre symbolique. L'utilisation de l'espace des contraintes et nécessités adapté à l'étude de l'élaboration des formules chimiques (Figure 3), doit nous permettre de cibler les éléments historiques pertinents pour la reconstruction didactique en réalisant une synthèse épistémologique de l'élaboration des formules chimiques au XIX^e siècle en « cartographiant le champ des possibles » (Orange, 2005, p.77).

Enquête historique

L'enquête débute avec Lavoisier et la naissance d'un langage théorique spécialisé (Izquierdo-Aymerich, 2012) et se termine au congrès de Karlsruhe (1860) fixant les formules chimiques telles que nous les utilisons encore aujourd'hui (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993).

À la fin du XVIII^e, la notion de corps pur est au centre des recherches (Goupil, 1991). Pour Lavoisier (1801) les espèces chimiques sont soit des corps simples soit des corps composés, combinaisons des simples. Plusieurs lois sont alors élaborées et vont être à l'origine des deux courant de pensée – équivalentisme et atomisme – qui vont traverser la chimie pendant toute la première moitié du XIX^e siècle :

- la loi des proportions définies de Proust qui confirme « l'individualité des corps chimiques » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 100) ;
- la loi des nombres proportionnels de Richter qui introduit la notion de stœchiométrie ;
- la loi des proportions multiples de Dalton à partir de laquelle il relance l'hypothèse de l'atome.

Pour les atomistes, le corps composé est constitué de particules microscopiques caractérisées par une masse et qui se combinent dans des proportions fixes. Avec l'hypothèse atomique, ces lois acquièrent « une signification intuitive immédiate » (Bensaude-Vincent & Stengers, 1993, p. 151). Les équivalentistes refusent la théorie atomique. Leur interprétation est macroscopique. Le corps composé est une combinaison des corps simples. Mais qu'ils soient atomistes ou équivalentistes, tous les chimistes adoptent la même représentation : l'alphabet latin proposé par Berzelius (1819). Suivant le courant de pensée, les lettres symbolisent les atomes ou les corps simples. Cependant les chimistes mettent plus de cinquante ans avant de s'accorder sur les formules.

Nous nous intéressons plus particulièrement au cas de l'eau et des corps simples gazeux, premières formules introduites aux élèves dans les programmes français. Les équivalentistes et Dalton utilisent les mêmes formules. Pour un équivalentiste, la lettre symbolise le corps simple et l'eau doit correspondre à la première combinaison entre le gaz hydrogène et le gaz oxygène (Berthelot, 1860 ; Regnault, 1850). Dalton (1808) postule que la formule chimique doit être la plus simple possible. Le corps simple est donc nécessairement constitué d'un seul atome et la formule de l'eau doit correspondre à la combinaison la plus élémentaire HO. Pour Berzelius (1819), atomiste convaincu, la combinaison des atomes est liée à leur affinité

électrochimique. Deux atomes identiques ne peuvent donc s'associer. Le corps simple reste monoatomique. Mais dans le cas de l'eau, il se réfère aux lois volumétriques de Gay-Lussac. Il traduit par la formule³ H₂O l'obtention d'eau à partir de la combinaison de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène. Avec le développement de la chimie organique, de nouveaux faits empiriques font apparaître de nouveaux problèmes qui nécessitent l'évolution des modèles et des formules. Gerhardt (1844) constate jusqu'à sept formules pour l'éthanol. Il cherche alors à remettre de l'ordre dans les formules utilisées. Il constate notamment que la formule HO de l'eau nécessite de doubler toutes les formules des équivalents en chimie organique (Gerhardt, 1844). Reprenant comme Berzelius les lois volumétriques de Gay-Lussac, Gerhardt, pourtant équivalentiste convaincu, propose à son tour la formule H₂O. Mais le bouleversement le plus important a lieu pour les corps simples. Gaudin (1833) est le premier à proposer des formules constituées de plusieurs atomes pour les corps simples en reprenant les hypothèses d'Avogadro – Ampère pour les gaz. Ces derniers proposaient dès 1808 la distinction atome et molécule (Scheidecker-Chevallier, 1997). Les travaux de Dumas (1836), Gerhardt (1844) et Laurent (1854) sur la possibilité de substituer un hydrogène par un chlore déstabilisent la vision dualistique de Berzelius. Les chimistes admettent qu'un corps simple puisse être constitué de plusieurs atomes identiques. La découverte de l'isomérisie et l'observation des substitutions en chimie organique, entre autres, amènent l'émergence d'une notion nouvelle : l'atomicité ou capacité de combinaison d'un atome (Dumon & Cokelez, 2006). Les chimistes atomistes – organiciens comme Boutlerov, Couper, Kékulé, Wurtz, abandonnent la formule empirique, qui ne donne que les proportions pondérales des éléments chimiques, au profit d'une formule rationnelle qui doit pouvoir indiquer l'arrangement des atomes au sein de la molécule.

L'atome est la plus petite quantité d'un élément qui puisse exister dans un corps composé, comme masse individuelle par les forces chimiques. La molécule est un groupe d'atomes formant la plus petite quantité d'un corps simple ou composé, qui puisse exister à l'état libre, entrer dans une réaction ou en sortir. (Wurtz, 1864, p. 39)

La molécule des corps simples n'est plus nécessairement monoatomique. Les atomes peuvent « épuiser sur eux-mêmes » leur capacité de combinaison (Wurtz, 1871, p. 156). À partir des lois volumétriques de Gay-Lussac et en croisant avec les différents résultats de la chimie organique, les molécules des gaz hydrogène, oxygène, chlore, azote deviennent biatomiques.

Utilisation des espaces de contraintes pour identifier les raisons qui ont permis l'élaboration des formules chimiques

Nous identifions les raisons qui ont permis l'élaboration des formules chimiques à partir des espaces de contraintes et nécessités donnés en annexe (figures 5 à 12).

Formules de l'eau

Que nous indiquent les différents espaces autour de la formule de l'eau ?

- Sans registre des modèles (les équivalentistes Figure 5), la formule de l'eau est arbitraire et se décline sous plusieurs formes en fonction de la référence choisie.

- Si le registre des modèles est insuffisant et qu'il est nécessaire d'ajouter un registre explicatif dans le cadre épistémique (Dalton Figure 7 et Berzelius Figure 8.), la formule n'est pas stabilisée.

³ Nous gardons la notation moderne dans laquelle l'atomicité figure en indice.

- La formule se stabilise uniquement lorsque le registre symbolique est exclusivement obtenu par la mise en tension du registre empirique et du registre des modèles (Figure 9).

Pour élaborer la formule chimique de l'eau, plusieurs contraintes empiriques et théoriques sont nécessaires pour un seul registre explicatif, celui de la représentation particulière de la matière qui se perfectionne avec les organiciens-atomistes. Nous observons que ceux qui aboutissent à la formule H_2O , soit utilisent les lois de Gay-Lussac (Berzelius et les atomistes après le congrès de Karlsruhe) soit ont un registre empirique en chimie organique particulièrement développé (Gerhardt).

Formules des corps simples

Nous aboutissons pour les corps simples à la même constatation qu'avec la formule de l'eau. Le registre symbolique se stabilise lorsqu'il est obtenu par la mise en tension du registre empirique et du registre des modèles, sans registre explicatif tiers (successivement le critère de simplicité de Dalton et la vision dualistique de Berzelius représenté par les flèches vertes des figures Figure 7, Figure 8, Figure 10, Figure 11). Comme pour la formule de l'eau, le dernier espace des contraintes (Figure 12) qui aboutit aux formules définitives des corps simples est bien le plus complexe. Mais la formule des corps simples a beaucoup plus divisé la communauté scientifique alors qu'atomistes et équivalentistes pouvaient parfois être d'accord pour les corps composés. Les premières propositions de corps simples constitués de plusieurs entités particulières ont été faites par Avogadro et Ampère en 1811. Il faut pourtant attendre cinquante ans plus tard le congrès de Karlsruhe, et Cannizzaro, pour que leurs propositions soient reprises. Pour cela, il était sans doute nécessaire de développer le modèle de l'atome et n'avoir plus qu'un seul registre explicatif. Mais l'accord définitif de toute la communauté scientifique ne fut vraiment obtenu que lorsque l'atome sortit de son statut d'hypothèse pour devenir une réalité probable.

Choix des controverses et des raisons :

Autour de deux courants de pensée, équivalentiste et atomiste, nous avons constaté cinq controverses portant sur les formules de l'eau et des corps simples. À partir des espaces de contraintes et nécessités, nous pouvons associer à chaque scientifique ou groupe de scientifiques un registre explicatif, des données empiriques et un modèle de référence (Tableau 1). Les contraintes du registre empirique et du registre des modèles imposent les nouvelles formules chimiques.

Le langage devient une construction intellectuelle et une hypothèse confrontées aux données expérimentales (Laszlo, 2010, p. 10)

D'un point de vue épistémologique, pour pouvoir élaborer les formules chimiques de l'eau et des corps simples telles que nous les connaissons aujourd'hui, un registre des modèles a été nécessaire. Les formules chimiques se stabilisent définitivement quand les atomistes proposent un modèle de l'atome suffisamment développé ne nécessitant plus qu'un seul registre interprétatif dans le cadre épistémique : le modèle particulière de la matière (Figure 9 et Figure 12). L'atome est alors caractérisé par sa masse et son atomicité. Au niveau empirique, la chimie organique, à travers notamment des réactions de substitution et les réactions dans les gaz, semble avoir joué un rôle essentiel dans la détermination des formules à la fois de l'eau et des corps simples. Nous retrouvons systématiquement dans les espaces de contraintes et nécessités des atomistes (Figure 9 et Figure 12) la tension entre les lois volumétriques de Gay-Lussac et les lois d'Avogadro-Ampère. Enfin l'élaboration finale des formules des corps simples correspond à l'espace où contraintes et nécessités (Figure 12) sont

les plus nombreuses alors que paradoxalement ces formules sont les premières présentées aux élèves. L'apparente simplicité symbolique des formules des corps simples ne doit pas faire oublier la complexité des raisons nécessaires à leur élaboration.

Tableau 1 Les controverses autour des formules chimiques pendant la première moitié du XIX^e siècle

Courant de pensée	Scientifiques ou groupe de scientifiques	Leur proposition pour les corps simples	Leur proposition pour l'eau	Leur registre explicatif	Leurs données empiriques de référence	Leur modèle de référence
Équivalentiste	Premiers équivalentistes	H, O, ...	HO	Refus du modèle particulière	Analyse des corps composés	
	Équivalentistes organiciens	H, O, ...	H ₂ O		Analyse des corps composés et synthèses organiques	
Atomiste	Dalton	H, O, ...	HO	Modèle particulière et critère de simplicité	Analyse des corps composés	Atome caractérisé par sa masse
	Berzelius	H, O, ...	H ₂ O	Modèle particulière et vision dualistique	Analyse des corps composés et lois de Gay-Lussac	Atome caractérisé par sa masse
	Atomistes organiciens	H ₂ , O ₂ , ...	H ₂ O	Modèle particulière	Analyse des corps composés, lois de Gay-Lussac, synthèses organiques et isomérisation.	Distinction atome - molécule. Atome caractérisé par sa masse et son atomicité

Nous souhaitons proposer aux enseignants des ressources leur permettant d'introduire les premières formules chimiques. Nous pensons que les controverses autour des formules de l'eau et des formules des corps simples associées au modèle de l'atome et aux lois volumétriques des gaz de Gay-Lussac peuvent permettre cela. Le premier scénario est élaboré à partir de cette enquête historique dont nous venons de fournir les grandes étapes et des raisons qui ont permis aux chimistes d'élaborer ces formules.

Ressource pilote proposée aux enseignants

Le débat entre élèves nous semble la démarche pédagogique la plus adaptée pour le scénario proposé. Mais nous faisons le choix de ne pas imposer aux enseignants l'organisation du travail avec les élèves. Ce serait prendre le risque d'un rejet des ressources en leur demandant de changer leurs habitudes de gestion de classe.

La stabilité de la composante médiative des pratiques peut ainsi être à l'origine de difficultés pour les enseignants à adopter des exercices différents de ceux dont ils ont l'habitude : ce n'est pas changer d'énoncé qui est difficile, c'est changer de gestion, et s'adapter à des modes de déroulement inhabituels, pourtant éventuellement nécessaires. (Robert, 2007, p. 303)

Il nous semble plus intéressant dans un premier temps de développer les connaissances épistémologique et didactique des enseignants en les amenant à utiliser les documents sans nécessairement changer leurs habitudes de travail. Nous pensons en effet que si les enseignants utilisent les textes avec leurs élèves au cours d'une ou plusieurs séances, ils pourront commencer à développer de façon empirique des « connaissances professionnelles locales » leur permettant d'affiner le déroulement de leur séance, notamment en anticipant les réactions des élèves (Morge, 2003, p. 104-105).

Dans le scénario, nous proposons aux enseignants une sélection de textes historiques en indiquant les prérequis qui nous semblent nécessaires pour les comprendre, les objectifs pour leur utilisation et quelques exemples de questions pour leur exploitation. Les textes proposés ont été légèrement modifiés par rapport aux textes historiques originaux pour les rendre plus accessibles aux élèves. Le scénario est conçu en deux parties. La première doit permettre aux élèves de se familiariser avec les représentations symboliques. Dans la deuxième, nous proposons une controverse historique qui doit amener un questionnement quant aux raisons qui ont permis l'élaboration des formules.

Partie 1 du scénario

Nous avons constaté que les élèves éprouvent des difficultés dans la lecture des formules ne voyant pas dans H_2O , HOH , OH_2 la représentation de la même formule (Canac & Kermen, 2016). Nous proposons alors de leur faire élaborer la composition du dioxyde de carbone à partir des symboles qui ont été proposés par Hassenfratz et Adet, Dalton ou Berzelius. Le mot composition doit être compris historiquement aussi bien au niveau macroscopique pour l'espèce chimique que microscopique pour la molécule. Nous choisissons le dioxyde de carbone car tous les élèves connaissent déjà cette formule avant son introduction par le professeur de chimie. Au cours de cette séance, les élèves doivent choisir entre les différents symboles et peuvent proposer tout type de représentation en plaçant notamment les lettres de Berzelius dans l'ordre qu'ils souhaitent. L'enseignant pourra alors indiquer que les chimistes utilisent préférentiellement une représentation mais que d'autres sont également possibles et correctes. Nous faisons l'hypothèse que ce travail autour du choix des symboles chimiques peut permettre aux élèves une plus grande souplesse dans la lecture des formules chimiques et illustrer la science comme « une aventure humaine » (Martinand, 1993, p. 96).

Partie 2 du scénario

Les élèves ayant une lecture de la formule essentiellement microscopique et les enseignants observés ne justifiant les formules proposées qu'à partir du nom, l'objectif de cette partie est d'amener les élèves à s'interroger sur les raisons qui conduisent à proposer une formule plutôt qu'une autre. Ces raisons doivent pouvoir s'appuyer à la fois sur le registre empirique macroscopique et sur le registre des modèles microscopiques. Pour cela, nous repartons de l'enquête historique et des cinq controverses que nous avons constatées (Tableau 1).

Le raisonnement des équivalentistes part du refus du modèle atomique et s'appuie sur un registre empirique particulièrement développé, beaucoup trop éloigné des connaissances des élèves actuels. Le raisonnement de Berzelius fait référence à sa vision dualistique. Les enseignants devraient alors introduire les phénomènes électrochimiques avant les molécules ce qui risquerait de modifier trop les habitudes prises et pourrait entraîner le refus des ressources proposées. Finalement, nous choisissons une reconstruction didactique basée sur la controverse entre Dalton et les atomistes organiciens. Celle-ci est fictive, les atomistes organiciens ayant combattu les thèses des équivalentistes ou celles de Berzelius. Mais le

critère de simplicité avancé par Dalton, permettant de justifier les formules atomiques des corps simples et corps composés, semble constituer un argument accessible aux élèves. Il nous paraît intéressant d'un point de vue épistémologique de montrer que ce critère ne repose sur aucune théorie scientifique ni aucun fait expérimental et qu'il est arbitraire. Nous pensons que les transformations mettant en jeu des gaz et les lois volumétriques de Gay-Lussac peuvent apporter le registre empirique permettant de réfuter le critère de simplicité de Dalton et d'élaborer, en lien avec le modèle de l'atome et de la molécule, la formule de l'eau dans un premier temps puis celles des corps simples diatomiques dans un deuxième temps. Il nous semble en effet plus judicieux de commencer par l'élaboration de la formule d'un corps composé puis de passer ensuite aux formules des corps simples. Malgré l'apparente simplicité du résultat final, l'histoire nous montre que leur élaboration a nécessité un plus long cheminement et n'a été permise qu'avec la différenciation des concepts d'atome et de molécule.

Nous proposons aux enseignants de travailler à partir d'un texte de Lavoisier sur la synthèse de l'eau, de deux textes de Dalton, donnant une interprétation de la réaction chimique à partir des atomes et indiquant les règles de combinaisons des atomes pour l'eau (critère de simplicité), puis de trois textes de Gaudin s'appuyant sur les lois de Gay-Lussac dans le cas de la synthèse de l'eau. Ce travail doit amener les raisons justifiant les formules du corps composé eau et des corps simples oxygène et hydrogène. Les textes de Gaudin doivent créer la dialectique entre registre symbolique, registre empirique et registre des modèles. Les enseignants sont amenés à travailler simultanément, plutôt que successivement comme cela est suggéré dans les ouvrages scolaires, les concepts d'espèce chimique, d'atome, de molécule, de transformation chimique et de réaction chimique. Nous souhaitons créer ainsi les conditions d'introduction du langage symbolique en tant que méta-niveau. La même formule représente à la fois l'espèce chimique et la molécule et l'équation de la réaction chimique se lit à un niveau macroscopique avec les volumes de gaz et s'interprète à un niveau microscopique avec les atomes et les molécules.

Mise en œuvre de la ressource pilote

Nous avons débuté la deuxième vague d'investigations empiriques en présentant ce scénario à deux enseignants. Nous leur avons demandé d'utiliser le scénario proposé ou d'en élaborer un nouveau en choisissant parmi les textes fournis. Tous deux ont déclaré que la deuxième partie était trop difficile pour les élèves. L'un des deux, Mathieu, qui avait été observé lors de sa séance ordinaire l'année précédente, a accepté de mettre en place le premier scénario dans sa classe. Au cours de cet entretien préalable nous lui avons exposé les idées qui nous ont amenées à choisir ces textes et nos objectifs quant à leur utilisation en classe. Nous avons filmé la séance puis effectué un entretien juste après. Dans un premier temps, nous présentons le plan de séance de l'enseignant. En comparant avec la séance ordinaire, nous indiquons ensuite ce qui nous semble stabilisé dans ses pratiques et ce que la ressource a éventuellement permis de faire évoluer. Pour cela, nous réutilisons la méthodologie développée dans l'analyse des séances ordinaires.

Premier usage

Dans les textes proposés, Mathieu conserve les exemples de symboles d'Hassenfratz et Adet puis de Dalton et simplifie le texte de Berzelius qui explique le choix des symboles sous forme de lettres.

Ce choix lui permet de ne pas changer sa progression. Cette séance remplace très précisément celle que nous avons observée un an auparavant. Comme pour la séance « ordinaire », celle à partir des textes historiques se situe entre un cours introduisant le concept d'atome en tant que particule élémentaire et une séance permettant aux élèves de manipuler les modèles moléculaires. Il termine à nouveau le programme de chimie par l'étude des équations de réaction. Au cours de l'entretien, la première raison qu'il invoque pour justifier ses choix est l'intérêt qu'il porte à l'évolution historique des connaissances. Il ajoute que ce travail lui permet d'ajouter un nouvel objectif, montrer que la science se construit. C'est aussi, à son avis, la partie qui doit le plus intéresser les élèves. Mathieu n'utilise pas le texte de Lavoisier figurant dans la proposition de scénario. Travailler autour des proportions chimiques lui semble intéressant mais le temps ne lui permet pas de tout faire. Cette remarque semble indiquer qu'il ne conçoit pas de changer sa progression en traitant simultanément l'introduction des formules chimiques et des équations de réaction. Enfin Mathieu ne souhaite pas faire travailler les élèves sur la synthèse de l'eau proposée dans le texte de Lavoisier parce qu'elle n'est pas réalisable expérimentalement en classe de collège.

Ce qui nous semble être stabilisé

Même si le contenu de la séance a évolué avec l'utilisation des textes historiques, l'organisation du travail proposé par Mathieu reste assez proche de celle que nous avons pu observer dans la séance ordinaire. Les tâches restent simples et s'enchaînent au même rythme qu'à la première séance. Il s'agit encore d'un cours dialogué et les élèves prennent assez peu la parole. L'enseignant réutilise des exemples et une partie de la séance initiale. Nous rappelons l'hypothèse faite par Robert (2007) selon laquelle il est plus difficile pour un enseignant expérimenté de changer sa gestion de classe plutôt que son contenu. La comparaison des deux séances observées semble aller dans ce sens, la composante médiative des pratiques de Mathieu est stable. Quant à l'utilisation des registres de la chimie, Mathieu se cantonne au registre microscopique. Le langage chimique reste majoritairement implicite ou non-défini comme lors de la séance de l'année précédente, puisque Mathieu ne précise pas le niveau macroscopique ou microscopique auquel il se place. De plus, la justification des formules se fait toujours à partir des noms ou des modèles moléculaires.

Ce qui nous semble en évolution

L'utilisation des textes historiques amène une plus grande variété d'objectifs dans les tâches prescrites. Les élèves ont plus de liberté pour l'écriture des formules. Ils sont plus sollicités qu'au cours de la première séance pour proposer leurs idées de représentation. Ils ne manquent pas d'imagination, notamment avec les symboles d'Hassenfratz et Adet et ceux de Berzelius.

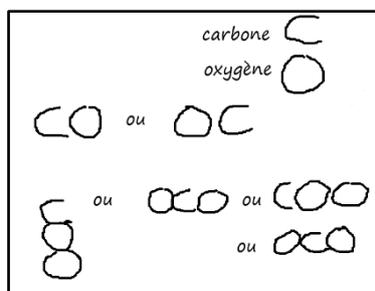


Photo 1 Extrait du tableau : proposition des élèves à partir des lettres pour l'écriture des formules chimiques de l'oxyde de carbone et du dioxyde de carbone

Le nouveau contenu permet de montrer que les scientifiques ont hésité entre plusieurs types de symboles et qu'il y a eu évolution, ce qui devient un nouvel objectif pour la séance. La composante cognitive des pratiques de Mathieu a évolué.

Quelle validation ?

Les deux enseignants sollicités ont rejeté la partie 2 du scénario. Mathieu, au cours de l'entretien post séance, confirme qu'il n'avait pas perçu que la deuxième partie des textes historiques devait permettre d'arriver à la formule chimique à partir des lois de Gay-Lussac. Il indique n'avoir jamais eu de questions d'élèves demandant la raison des formules proposées. Il ne sait pas lui-même comment la leur justifier en dehors du modèle de Lewis. Il reconnaît qu'il n'a pas perçu le rôle du langage symbolique en tant que méta-niveau et la nécessité de définir explicitement les niveaux, macroscopique et microscopique, au moment de l'utilisation des noms et des formules. Il hésite lui-même pour le niveau à associer à la notion de corps pur. Il apparaît que la composante personnelle des pratiques de Mathieu constitue un frein à l'utilisation de cette partie de la ressource pilote.

Néanmoins, la première partie du scénario semble acceptable par les enseignants, et Mathieu l'a mise en œuvre en effectuant des modifications, indices d'une appropriation. L'utilisation des textes permet une plus grande activité cognitive des élèves et met l'accent sur la souplesse d'écriture des formules, dont nous avons rappelé l'importance.

Conclusion

Les analyses préliminaires que nous avons conduites montrent les difficultés des élèves. Les enseignants observés semblent démunis pour y faire face. Cela confirme la nécessité de proposer aux enseignants des ressources pour introduire le langage symbolique. La ressource pilote est construite à partir de sources historiques primaires pour atteindre un objectif précis : éliminer l'arbitraire dans l'écriture des formules chimiques et proposer des raisons à la fois fondées sur des résultats empiriques et des éléments de modèle, au début de l'enseignement secondaire. Mais la partie du scénario permettant d'accéder aux raisons a été rejetée par les deux enseignants sollicités. En accord avec le MER (Duit et al., 2012) qui sous-tend notre démarche, nous avons décidé de modifier la deuxième partie du scénario qui a paru inaccessible aux enseignants. Beaufils, Maurines et Chapuis (2010) constatent que ces derniers attendent majoritairement une mise à disposition de documents préparés et non des textes historiques primaires.

Nous avons élaboré des dialogues fictifs, tels qu'imaginés par de Hosson (2011b), entre les trois personnages – Sagredo, Salviati et Simplicio – créés par Galilée. Nous les avons proposés à deux autres enseignants qui ont trouvé le nouveau format accessible et les ont mis en œuvre dans leur classe. L'analyse de ces séances est en cours, mais les premières constatations montrent que les enseignants ne comprennent pas pourquoi nous cherchons à proposer aux élèves les raisons historiques qui ont permis l'élaboration des formules chimiques. Une formation épistémologique et didactique semble nécessaire pour que les enseignants comprennent les fondements de notre démarche et qu'ils fassent des choix en toute connaissance. Nous envisageons de poursuivre cette recherche dans le cadre d'une démarche collaborative dans laquelle nous apportons une expertise épistémologique et didactique et les enseignants l'expertise du terrain (Desgagné, 1997).

Bibliographie

- Artigue, M. (1994). Didactical engineering as a framework for the conception of teaching products. In R. Biehler, R. W. Scholz, R. Sträßer, & B. Winkelmann (Eds.), *Didactics of mathematics as a scientific discipline* (pp. 27–39). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Barth, B.-M. (2001). *L'apprentissage de l'abstraction*. Paris, France : Retz.
- Beaufils, D., Maurines, L., & Chapuis, C. (2010). Compte-rendu d'enquête sur l'histoire des sciences auprès d'enseignants de physique et chimie. *Le BUP Physique Chimie*, 924, 581–598.
- Bensaude-Vincent, B., & Stengers, I. (1993). *Histoire de la chimie*. Paris : Éd. la Découverte.
- Ben-Zvi, R., Eylon, B.-S., & Silberstein, J. (1986). Is an atom of copper malleable? *Journal of Chemical Education*, 63(1), 64. <https://doi.org/10.1021/ed063p64>
- Berthelot, M. (1860). *Chimie organique fondée sur la synthèse* (Vol. 1). Mallet-Bachelier.
- Berzelius. (1819). *Essai sur la théorie des proportions chimiques et sur l'influence chimique de l'électricité*. Paris: Méquignon-Marvis.
- Canac, S., & Kermen, I. (2016). Exploring the mastery of French students in using basic notions of the language of chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 17(3), 452–473. <https://doi.org/10.1039/C6RP00023A>
- Coppens, N., Rebmann, G., & Munier, V. (2009). Suivre l'évolution des conceptions des élèves en mécanique : développement et évaluation d'exercices informatisés. *Didaskalia*, (35), 37–58. <https://doi.org/10.4267/2042/31136>
- Crépin-Obert, P. (2010). Idées et raisons sur les coquilles fossiles: étude épistémologique comparée entre une situation de débat à l'école primaire et une controverse historique. *Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, (1), 93–120.
- Crépin-Obert, P. (2011). Raison ou obstacle en histoire de la paléontologie et en classe de collège: analogie ou analogisme? *Recherches En Didactique Des Sciences et Des Technologies*, (3), 21–54.
- Dalton, J. (1808). *A new system of chemical philosophy* (Vol. 1). London: Rickerstaff.
- Desgagné, S. (1997). Le concept de recherche collaborative : l'idée d'un rapprochement entre chercheurs universitaires et praticiens enseignants. *Revue des sciences de l'éducation*, 23(2), 371-393
- de Hosson, C. (2011a). Una controversia histórica al servicio de una situación de aprendizaje: una reconstrucción didáctica basada en Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo de Galileo. *Enseñanza de Las Ciencias*, 29(1), 115–126.
- de Hosson, C. (2011b). *L'histoire des sciences : un laboratoire pour la recherche en didactique et l'enseignement de la physique*. Note de synthèse pour l'habilitation à diriger des recherches. Université Paris Diderot. Repéré à <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655594/>
- de Hosson, C., & Décamp, N. (2014). Using Ancient Chinese and Greek Astronomical Data: A Training Sequence in Elementary Astronomy for Pre-Service Primary School Teachers. *Science & Education*, 23(4), 809–827. <https://doi.org/10.1007/s11191-013-9625-2>
- de Hosson, C., & Kaminski, W. (2006). Un support d'enseignement du mécanisme de la vision inspiré de l'histoire des sciences. *Didaskalia*, (28), 101–126. <https://doi.org/10.4267/2042/23955>
- Duit, R. (2007). Science Education Research Internationally: Conceptions, Research Methods, Domains of Research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 3(1), 3–15. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75369>

- Duit, R., Gropengießer, H., Kattmann, U., Komorek, M., & Parchmann, I. (2012). The model of educational reconstruction- A framework for improving teaching and learning science. In D. Jorde & J. Dillon (Eds.), *Science education research and practice in Europe: retrospective and prospective* (pp. 13–37). Sense Publishers.
- Dumas, J.-B. (1836). *Leçons sur la philosophie chimique professées au Collège de France*. Paris : Ébrard, Libraire.
- Dumon, A., & Cokelez, A. (2006). La cohésion de la matière. *L'actualité Chimique*, (297), 49–56.
- Fabre, M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'Ère Nouvelle*, 38(3), 53–67.
- Fabre, M., & Orange, C. (1997). Construction des problèmes et franchissements d'obstacles. *Aster*, 24, 37-57.
- Gaudin, M.-A. (1833). Recherches sur la structure intime des corps inorganiques définis. *Annales de Chimie et de Physique*, 52, 113–133.
- Gerhardt, C. (1844). *Précis de chimie organique. Tome I*. Paris : Fortin, Masson et Cie.
- Gilbert, J. K., Pietrocola, M., Zylbersztajn, A., & Franco, C. (2000). Science and Education: Notions of Reality, Theory and Model. In J. K. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), *Developing Models in Science Education* (pp. 19–40). Springer Netherlands.
- Goupil, M. (1991). *Du flou au clair ? Histoire de l'affinité chimique de Cardan à Prigogine*. Éd. du CTHS.
- Grosslight, L., Unger, C., Jay, E., & Smith, C. L. (1991). Understanding models and their use in science: Conceptions of middle and high school students and experts. *Journal of Research in Science Teaching*, 28(9), 799–822. <https://doi.org/10.1002/tea.3660280907>
- Izquierdo-Aymerich, M. (2012). School Chemistry: An Historical and Philosophical Approach. *Science & Education*, 22(7), 1633–1653. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9457-5>
- Kermen, I. (2018). *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée. Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes*. Rennes : Presses Universitaires de Rennes.
- Kermen, I., & Méheut, M. (2011). Grade 12 French Students' use of a Thermodynamic Model for Predicting the Direction of Incomplete Chemical Changes. *International Journal of Science Education*, 33(13), 1745–1773. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.519008>
- Klein, U. (2001). Paper tools in experimental cultures. *Studies in History and Philosophy of Science Part A*, 32(2), 265–302. [https://doi.org/10.1016/S0039-3681\(01\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0039-3681(01)00010-3)
- Laszlo, P. (2010). Ampère et la « forme représentative » des molécules. Retrieved 10 October 2016, from <http://www.bibnum.education.fr/chimie/theorie-chimique/lettre-d-ampere-berthollet>
- Laurent, A. (1854). *Méthode de chimie*. Mallet-Bachelier.
- Lhoste, Y. (2008). *Problématisation, activités langagières et apprentissage dans les sciences de la vie. Étude de quelques débats scientifiques dans la classe dans deux thèmes biologiques: nutrition et évolution*. Université de Nantes. Repéré à <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-00376892/>
- Lhoste, Y., & Peterfalvi, B. (2009). Problématisation et perspective curriculaire en SVT : l'exemple du concept de nutrition. *Aster*, 49, 79-108
- Martinand, J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, 2, 89–99.
- Martinand, J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In *Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et*

- technologiques au lycée d'enseignement général et au collège, Actes de l'université d'été.* INRP-ENS Cachan. Repéré à <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>
- Masselot, P., & Robert, A. (2007). Le rôle des organisateurs dans nos analyses didactiques de pratiques de professeurs enseignant les mathématiques. *Recherche & Formation*, (3), 15–31.
- Méheut, M., & Chomat, A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle particulière par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, 5(4), 417–437. <https://doi.org/10.1007/BF03173130>
- Morge, L. (2003). Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulière. *Didaskalia*, (23), 101–131.
- Mzoughi-Khadhraoui, I., & Dumon, A. (2012). L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique. *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, (6), 89–118.
- Orange, C. (2000). *Idées et raisons : constructions de problèmes, débats et apprentissages scientifiques en SVT*. Mémoire de recherche pour l'HDR, Université de Nantes, Nantes.
- Orange, C. (2005). Problématisation et conceptualisation en sciences et dans les apprentissages scientifiques. *Les Sciences de l'éducation-Pour l'ère Nouvelle*, 38(3), 69–94.
- Pastré, P. (2007). Quelques réflexions sur l'organisation de l'activité enseignante. *Recherche et Formation*, (56), 81–93.
- Piaget, J., & Garcia, R. (1983). *Psychogénèse et histoire des sciences*. Paris: Flammarion.
- Pintó, R. (2005). Introducing curriculum innovations in science: Identifying teachers' transformations and the design of related teacher education: Introducing Curriculum Innovations in Science. *Science Education*, 89(1), 1–12. <https://doi.org/10.1002/sce.20039>
- Regnault, V. (1850). *Premiers éléments de chimie*. Paris : V. Masson, Langlois et Leclercq.
- Robert, A. (2007). Stabilité des pratiques des enseignants de mathématiques (second degré): une hypothèse, des inférences en formation. *Recherches En Didactique Des Mathématiques*, 27(81), 271–312.
- Robert, A., & Hache, C. (2013). Pourquoi, comment comprendre ce qui se joue en classe de mathématiques ? *Cahiers du laboratoire de didactique André Revuz*, (5), 26-86.
- Robert, A., & Rogalski, J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : Une double approche. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 2(4), 505–528. <https://doi.org/10.1080/14926150209556538>
- Rogalski, J., & Robert, A. (2015). De l'analyse de l'activité de l'enseignant à la formation des formateurs. Le cas de l'enseignement de mathématiques dans le secondaire. In V. Lussi Borer, M. Durand, & F. Yvon (Eds.), *Analyse du travail et formation dans les métiers de l'éducation* (pp. 95–113). Louvain-la-Neuve : De Boeck Supérieur.
- Scheidecker-Chevallier, M. (1997). L'hypothèse d'Avogadro (1811) et d'Ampère (1814): la distinction atome/molécule et la théorie de la combinaison chimique. *Revue d'histoire Des Sciences*, 159–194.
- Taber, K. S. (2013). Revisiting the chemistry triplet: drawing upon the nature of chemical knowledge and the psychology of learning to inform chemistry education. *Chemistry Education Research and Practice*, 14(2), 156–168. <https://doi.org/10.1039/c3rp00012e>

- Taskin, V., & Bernholt, S. (2014). Students' Understanding of Chemical Formulae: A review of empirical research. *International Journal of Science Education*, 36(1), 157–185. <https://doi.org/10.1080/09500693.2012.744492>
- Tiberghien, A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4(1), 71–87. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90019-1)
- Wurtz, C. A. (1864). *Leçons de philosophie chimique*. Paris : Hachette.
- Wurtz, C. A. (1871). *Leçons élémentaires de chimie moderne*. Victor Masson.

La ressource pilote

Chacune des deux parties composant la ressource est constituée de matériaux historiques fournis aux enseignants, ci-dessous, et des questions possibles qu'ils pourraient soumettre à leurs élèves pour étudier ces textes en classe.

Partie 1 du scénario

Il s'agit d'introduire le modèle des atomes, le choix des symboles pour le modèle atomique et d'effectuer la première écriture d'une équation chimique.

Introduire le modèle de l'atome

Extrait d'un texte de Berzelius sur le modèle atomique de Dalton (texte transformé) :

« D'après le système de Dalton, les corps sont composés d'atomes ; et un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre élément mais non avec des fractions d'atomes. De même, un atome d'un corps composé peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre corps, composé. »

Ce premier texte est une entrée possible pour proposer aux élèves le modèle de Dalton pour l'atome.

Introduire les symboles des atomes et formule des molécules

- Extrait d'un texte de Dalton (1808, p. 214-215) à propos des formules des oxydes de carbone (texte transformé) :

« De l'application de ces règles, nous pouvons tirer les conclusions suivantes que l'oxyde carbonique est un composé binaire, formé d'un atome de carbone et d'un oxygène ; que le gaz carbonique est un composé ternaire formé d'un atome de carbone, et de deux d'oxygène. »

Les élèves doivent faire le choix entre plusieurs symboles pour écrire les formules. Nous proposons de travailler à partir du dioxyde de carbone car ils connaissent déjà tous cette formule.

Question :

Parmi les exemples de symboles proposés ci-dessous, lesquels choisiriez-vous pour représenter les compositions de l'oxyde carbonique et du gaz carbonique proposé par Dalton ? Expliquez votre choix.

- Symboles proposés par Hassenfratz et Adet dans Méthode de nomenclature chimique (de Morveau, Lavoisier, Bertholet, & de Fourcroy, 1787)



Gaz carbonique

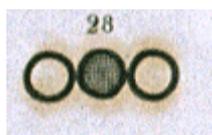


carbone



oxygène

- Symboles proposés par Dalton (1808) :



Gaz carbonique



carbone



oxygène

Question possible :

Parmi les exemples de symboles proposés ci-dessus, lesquels choisiriez-vous pour représenter les compositions de l'oxyde carbonique et du gaz carbonique proposé par Dalton ? Expliquez votre choix.

- Extrait d'un texte de Berzelius (1819, p. 109- 111) proposant les lettres comme symboles représentatifs des atomes (texte transformé)

« Méthode de compter le nombre relatif des atomes dans les combinaisons chimiques, et d'exprimer par des signes leur composition en qualité et en quantité. »

Lorsque nous essayons d'exprimer les proportions chimiques, nous trouvons qu'il est nécessaire d'avoir des signes chimiques. On en a employé depuis longtemps quoiqu'ils aient été jusqu'à présent de peu d'utilité. À l'époque de l'alchimie des signes furent créés par le besoin de s'exprimer d'une manière mystique et incompréhensible pour le vulgaire. La chimie antiphlogistique (Hassenfratz et Adet) voulut leur en substituer d'autres, fondés sur le même principe scientifique que les nouveaux noms chimiques : le signe devait indiquer les parties constituantes d'un corps composé.

Mais quoique ces signes, il faut l'avouer, fussent bien choisis ils n'étaient guère utiles car il est plus aisé d'écrire un mot en abrégé que de dessiner une figure. En proposant ici d'autres signes, je chercherai à éviter ces inconvénients. Je dois cependant faire observer que ces nouveaux signes ne sont pas créés dans la vue de les placer, comme les anciens, sur les vases de laboratoire mais qu'ils ont pour objet de faciliter l'expression des proportions chimiques, et de nous mettre en état d'énoncer brièvement et avec facilité le nombre d'atomes élémentaires qui se trouve dans chaque corps composé.

Les signes chimiques doivent être des lettres alphabétiques pour pouvoir être facilement tracés et imprimés sans défigurer le texte. Je choisis donc à cet effet la lettre initiale du nom latin de chaque corps simple ; mais plusieurs de ces corps ayant la même initiale, je les distingue de la manière suivante :

1. Les corps simples non métalliques (les métalloïdes) ne seront désignés que par la lettre initiale, quand même elle serait commune à quelque métal ;
2. et le métal qui aura la même initiale qu'un autre métal ou un métalloïde , sera indiqué par les deux premières lettres de son nom, ou, si elles se trouvaient les mêmes dans un autre nom, on ajoutera à l'initiale la première consonne différente. »

Question possible :

À partir de la proposition de Berzelius ci-dessus, donner la formule du gaz carbonique (ou dioxyde de carbone).

Commentaire

Toutes les propositions sont possibles à ce stade : **OCO**, **COO**, **OOC**, CO₂, **CO₂**, C₂O, C₂O, CO², etc. Elles peuvent être discutées avec les élèves pour indiquer celles qui sont parfois utilisées (en jaune) et celle qui est en général retenue (en vert).

Les élèves doivent faire le choix entre plusieurs symboles pour écrire les formules. Nous proposons de travailler à partir du dioxyde de carbone car ils connaissent déjà tous cette formule.

Pour les autres symboles, le travail peut se faire en lien avec le tableau périodique en repérant les symboles avec une seule lettre et ceux avec deux lettres puis en repérant les lettres non « prévisibles ».

Application à la synthèse de l'eau : de la transformation chimique à la réaction chimique

Extrait d'un texte de Lavoisier (1862, p. 360-361) sur la synthèse de l'eau (texte transformé) :

« Depuis qu'on connaît l'expérience dans laquelle un mélange d'hydrogène et d'oxygène ne produit, en brûlant, que de l'eau très pure, à peu près égale en masse à celui des deux gaz réunis, il était difficile de ne pas reconnaître dans cette production d'eau une preuve presque évidente que ce liquide, mis de tout temps au rang des substances simples, est réellement un corps composé. »

Questions :

Quelle est la transformation chimique décrite par Lavoisier ?

À partir des représentations que vous avez choisies, quelle pourrait être la formule de l'eau ?

Proposez une représentation de la réaction qui interprète la transformation chimique sous forme d'équation

Commentaire

Cette partie doit permettre la transition entre la première étape et la deuxième étape.

Nous attendons comme réponse possible HO (ou OH) ou H₂O si les élèves connaissent déjà la formule. Puis :

$H + O \rightarrow$ (ou $=$) HO (ou OH) ou $H_2 + O \rightarrow H_2O$ si les élèves connaissent déjà la formule du dihydrogène

Partie 2 du scénario

Dans cette partie l'objectif est d'aborder la formule d'une molécule et le modèle de la réaction chimique et l'écriture des formules des molécules, des espèces chimiques et d'une équation chimique.

Introduction de la réaction chimique : modèle pour la transformation chimique

- Extrait d'un texte de Dalton (1808, p. 212) donnant l'interprétation microscopique de la réaction chimique

« L'analyse et la synthèse chimique ne vont pas plus loin que de séparer les particules les unes des autres, et les réunir. »

Question possible :

En vous aidant du texte de Dalton et du texte de Lavoisier (texte fin de la partie 1), proposez une interprétation en termes d'atomes et de molécules de l'expérience de la synthèse de l'eau décrite par Lavoisier. Vérifiez si votre proposition permet d'interpréter également la conservation de la masse au cours d'une transformation chimique indiquée par Lavoisier.

Ce premier travail doit permettre de définir une réaction chimique en termes de redistribution d'atomes et d'interpréter la conservation de la masse par la conservation des atomes (rappel : des atomes différents ont des masses différentes.)

Controverse historique : recherche de la formule de l'eau en lien avec la synthèse de l'eau

- Extrait d'un texte de Dalton (1808, p. 214-215) indiquant les règles de combinaisons des atomes appliquées à l'eau :

« Les règles générales suivantes peuvent être adoptées comme guide dans toutes nos recherches sur la synthèse chimique.

1. *Quand une seule combinaison de deux corps peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire, à moins qu'une certaine cause indique le contraire.*
2. *Quand deux combinaisons sont observées, on doit présumer qu'elles sont l'une binaire et l'autre ternaire*

De l'application de ces règles aux faits chimiques déjà bien établis, nous pouvons tirer les conclusions suivantes : que l'eau est un composé binaire d'hydrogène et d'oxygène. »

- Extrait d'un texte de Gaudin (Gaudin, 1833, pp. 121–122) indiquant la formule de l'eau :

« Un volume de gaz oxygène, en se combinant avec deux volumes de gaz hydrogène, donne deux volumes de vapeur d'eau, si les particules sont des atomes et pour que toutes les molécules soient identiques, il faudra que chaque particule d'oxygène s'approprie 2 particules de gaz hydrogène il y aura donc 3 particules en tout dans chaque molécule d'eau. »

Questions :

Quelle est la formule de l'eau proposée par Dalton ? Proposée par Gaudin ?

Comment Dalton justifie-t-il sa formule ? Comment Gaudin justifie-t-il sa formule ?

Quelle formule doit-on retenir pour l'eau et pour quelle raison ?

Commentaire

Controverse entre Dalton et Gaudin pour la formule de l'eau. Dalton utilise un principe de simplicité. Gaudin part de résultats expérimentaux. La formule H_2O permet d'interpréter les résultats expérimentaux.

Recherche des formules des molécules d'hydrogène et d'oxygène : cas de la synthèse de l'eau

À partir des formules, on peut remplacer les noms dans le texte en dihydrogène et dioxygène. Cette partie permet d'écrire une première équation de réaction chimique.

- Extrait d'un texte de Gaudin (Gaudin, 1833, pp. 121–122) reliant volume de gaz et molécule :

« Pour une même pression et une même température, nous dirons 1, 2, 3 molécules, au lieu de 1, 2, 3 volumes. Une molécule de gaz oxygène, en se combinant à deux molécules de gaz hydrogène, donne deux molécules de vapeur d'eau »

Question possible :

En écrivant l'équation de la réaction correspondant à la synthèse de l'eau avec les proportions indiquées par Gaudin, peut-on conserver pour l'oxygène et l'hydrogène les formules proposées par Dalton ?

Et si non, quelle formule proposeriez-vous pour pouvoir respecter les faits expérimentaux ? Pour répondre vous pouvez-vous aider du texte de Gaudin ci-dessous.

- Extrait d'un texte de Gaudin (Gaudin, 1833, pp. 121–122) à propos des formules des molécules d'« oxygène » et d'« hydrogène »⁴:

« Une molécule de gaz oxygène, en se combinant à deux molécules de gaz hydrogène, donne deux molécules de vapeur d'eau ; [...], il faut et il suffit que la molécule d'oxygène se partage en deux, et que chaque moitié vienne s'unir à une molécule biatomique d'hydrogène ; donc le gaz oxygène est biatomique comme l'hydrogène »

Autre texte possible de Gaudin sur l'eau

« Par exemple, on sait très bien que, pour faire détoner le gaz hydrogène par son mélange avec l'oxygène, il faut, afin que la combinaison des deux gaz soit totale et ne laisse pour produit que de l'eau, que le rapport soit de deux volumes d'hydrogène contre un seul volume d'oxygène; et ,après la combinaison ,en supposant que l'on porte à 100 degrés la température de l'eau formée, on reconnaît qu'elle représente, pour trois volumes de gaz employé, deux volumes de vapeur seulement, et l'on dit qu'il y a eu condensation dans un rapport de trois à deux volumes.

⁴ Nous conservons dans la question les noms des molécules indiqués par Gaudin.

Cela revient tout à fait à dire que deux molécules d'hydrogène, en se combinant avec une seule molécule d'oxygène, donnent lieu à deux molécules de vapeur d'eau. Dès lors il faut bien que la molécule d'oxygène se partage en deux parties égales pour que chaque moitié se réunisse aux molécules biatomiques d'hydrogène : donc la molécule d'oxygène, étant divisible par deux, n'est pas un atome, et cette molécule est biatomique au moins. »

La ressource modifiée

La première partie n'est pas modifiée. La deuxième partie est la suivante.

Partie 2 du scénario : Les dialogues

Ces dialogues sont construits à partir d'extraits historiques et reprennent les trois personnages du dialogue de Galilée utilisés par Cécile de Hosson :

- Simplicio joue le rôle du détenteur des théories anciennes et le contradicteur,
- Salviati représente le détenteur des nouvelles théories scientifiques
- et Sagredo représente le médiateur.

Les textes reposent sur les controverses historiques entre les chimistes du XIX^e : controverse entre les partisans de l'atome et les équivalentistes, controverse entre les partisans de l'existence d'un arrangement des atomes au sein de la molécule (ce qui permet notamment de faire la distinction entre les atomes et les molécules) et les partisans d'une formule chimique représentant la proportionnalité des atomes au sein de la molécule (dans ce cas, la formule du corps simple est nécessairement monoatomique). Plusieurs théories s'affrontent donc à travers les personnages de Salviati et de Simplicio. Le travail de l'enseignant à partir des dialogues est de faire réfléchir les élèves sur les différents arguments proposés par les chimistes, en leur demandant de prendre éventuellement position. L'étude des deux textes doit permettre de faire comprendre aux élèves que les formules chimiques ont été élaborées en prenant appui à la fois :

- sur le registre empirique (étude de la synthèse de l'eau, de l'acide chlorhydrique et de l'ammoniac et des échanges en volume de gaz au cours de ces transformations chimiques),
- sur le registre des modèles microscopiques (atome et molécule ; l'interprétation microscopique de la réaction chimique : conservation des atomes)
- et sur le registre des modèles macroscopiques (le corps pur simple ou composé).

Dialogue 1 : formule des corps composés

Sagredo : N'est-il pas vrai que monsieur Lavoisier a réussi à décomposer de l'eau en gaz oxygène et en gaz hydrogène ?

Salviati : C'est parfaitement exact. Tous les chimistes sont maintenant d'accord sur ce point. L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé.⁵ Dans le nouveau système proposé par monsieur Dalton, tout corps est formé d'un assemblage de particules qui peuvent être elles-mêmes des combinaisons d'autres particules ultimes appelées atomes. Un atome d'un élément peut se combiner avec 1, 2, 3, etc. atomes d'un autre élément, toujours avec des nombres entiers d'atomes jamais avec des fractions d'atomes.⁶ La particule d'eau est donc formée d'atomes d'hydrogène H et d'atomes d'oxygène O. La combinaison de ces atomes forme une molécule d'eau.

Sagredo : Et dans ce cas, comment pourrions-nous écrire la formule de cette molécule d'eau ?

⁵ D'après Lavoisier, A.-L. (1862). Œuvres de Lavoisier (Tome II Mémoires de chimie et physique). Paris, p.335-341

⁶ D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Edition). Paris : Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.8

Simplicio : Pour monsieur Dalton, la règle générale suivante peut être adoptée comme guide dans toutes les recherches sur la synthèse chimique : quand une seule combinaison de deux atomes peut être obtenue, nous devons présumer qu'elle est binaire, à moins qu'une certaine cause indique le contraire. De l'application de cette règle, nous pouvons tirer la conclusion suivante : la molécule d'eau est une combinaison binaire d'atome d'hydrogène et d'atome d'oxygène.⁷ Sa formule chimique sera donc HO.

Salviati : Pour monsieur Berzelius, monsieur Dalton s'est trop peu fondé sur l'expérience, et n'a peut-être pas agi avec assez de précaution en appliquant sa nouvelle règle des combinaisons au système de la chimie.⁸ Monsieur Lavoisier a employé deux volumes de gaz hydrogène pour un volume de gaz oxygène.⁹ Cette expérience a été confirmée par monsieur Gay-Lussac. Et donc pour monsieur Berzelius, il paraît plus simple et plus conforme à l'expérience de considérer la molécule d'eau comme composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène.¹⁰

Simplicio : La formule HO peut très bien s'expliquer. 2 volumes d'hydrogène se combinent avec 1 volume d'oxygène. Comme nous avons admis que la molécule d'eau est formée d'un atome d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, il est clair que l'on peut dire que l'atome d'oxygène est représenté par 1 volume de gaz oxygène et que l'atome d'hydrogène est représenté par 2 volumes de gaz hydrogène.¹¹

Sagredo : Mais ceci n'est-il pas une supposition gratuite ?

Salviati : En effet, nous connaissons aujourd'hui un grand nombre d'exemples contraires à la règle des combinaisons de monsieur Dalton et notamment la molécule d'eau. De nombreux chimistes semblent s'accorder pour la formule H₂O et s'appuient pour cela sur les hypothèses de monsieur Ampère et de monsieur Avogadro¹² à propos de la combinaison des atomes et sur les résultats expérimentaux de monsieur Gay-Lussac pour les volumes de gaz. Je vais dès à présent vous présenter ces nouvelles règles.

Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (1^{ère} partie)

Sagredo : La mise en contact du gaz hydrogène et du gaz chlore permet d'obtenir le gaz chlorhydrique. Comment peut-on représenter cela avec les formules de monsieur Berzelius ?

Simplicio : En me basant sur les combinaisons de monsieur Dalton, l'atome d'hydrogène H et l'atome de chlore Cl vont se combiner pour donner la molécule chlorhydrique HCl.

⁷ D'après Dalton, J. (1808). A new system of chemical philosophy (Vol. 1). London : Rickerstaff., p.213

⁸ D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Edition). Paris: Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.9

⁹ D'après Lavoisier, A.-L. (1862). Œuvres de Lavoisier (Tome II Mémoires de chimie et physique). Paris : p.335-341

¹⁰ D'après Berzelius, J. J. (1835). Théorie des proportions chimiques (Deuxième Édition). Paris : Firmin Didot Frères, Libraires-Éditeurs, p.27

¹¹ D'après Regnault, V. (1850). Premiers éléments de chimie. Paris: V. Masson, Langlois et Leclercq., p.540

¹² D'après Avogadro, A. (1811). Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons. Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts, (LXXIII), 58-76.

Salviati : Monsieur Gay-Lussac, qui a posé en 1808 ses lois mémorables sur les volumes des gaz qui se combinent, a trouvé qu'1 volume d'hydrogène s'unit à 1 volume de chlore pour donner 2 volumes de gaz chlorhydrique¹³.

Sagredo : N'y a-t-il pas alors contradiction entre le fait d'obtenir une molécule de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Simplicio, et deux volumes de gaz chlorhydrique, comme l'indique monsieur Salviati ?

Simplicio : L'explication la plus simple est qu'1 volume d'hydrogène s'unit à 1 volume de chlore ce qui donne 2 volumes de gaz chlorhydrique.¹⁴

Salviati : Mais pour l'eau monsieur Gay-Lussac a trouvé que 2 volumes de gaz hydrogène et 1 volume de gaz oxygène donnent deux volumes de gaz eau. Et nous connaissons également l'action entre le gaz hydrogène et le gaz azote où monsieur Gay-Lussac trouve que 3 volumes de gaz hydrogène et 1 volume de gaz azote donnent 2 volumes de gaz ammoniac. Votre raisonnement ne semble plus applicable.

Simplicio : Je vous l'accorde, ma première explication était trop simple. Mais des chimistes comme monsieur Berthelot proposent de considérer que les corps simples ou composés occupent des volumes différents mais qu'ils sont entre eux dans des rapports simples comme :

- 1 équivalent d'oxygène occupe 1 volume
- 1 équivalent de chlore, d'hydrogène, 2 volumes
- 1 équivalent de gaz chlorhydrique, 4 volumes.¹⁵

Sagredo : Cela me semble bien compliqué et je ne comprends pas comment il choisit les volumes. De plus, monsieur Simplicio est reparti des formules de monsieur Dalton. Mais on a vu précédemment que celui-ci s'est déjà trompé pour la formule de l'eau.

Salviati : Vous avez tout à fait raison. Nous faisons de notre côté les mêmes hypothèses que messieurs Ampère et Avogadro : le volume de gaz représente la molécule de gaz. En cherchant à expliquer les faits conformément à cette hypothèse, de nombreux chimistes supposent que les molécules qui constituent un corps simple ne sont pas formées d'un seul atome, comme l'a d'abord suggéré Monsieur Dalton, mais sont composés de plusieurs atomes réunis.¹⁶ Monsieur Wurtz remplace donc l'énoncé de monsieur Berthelot par : tous les gaz renferment le même nombre de molécules pour un même volume de gaz, la molécule pouvant être formée soit :

- par 1 atome (mercure)
- par 2 atomes (hydrogène, chlore, oxygène, azote)
- par 3 atomes (ozone)¹⁷

¹³ D'après Wurtz, A. (1869). Histoire des doctrines chimiques depuis Lavoisier jusqu'à nos jours. Paris: L. Hachette., p.119

¹⁴ Ce raisonnement n'a pas été tenu par les opposants de la théorie atomique mais pourrait être proposé par les élèves.

¹⁵ D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences, 1, p.1189-1195.

¹⁶ D'après Avogadro, A. (1811). Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons. Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts, (LXXIII), p.58-76.

¹⁷ D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1189-1195

Dialogue 2 : formules des corps simples et distinction atome/molécule (2^{ème} partie)

Simplicio : Vous êtes en train de nous dire que les formules H et H₂ ne représentent pas la même chose alors que l'une est tout simplement le double de l'autre. En quoi cet énoncé est-il plus clair ?

Salviati : Parce que nous établissons une distinction bien tranchée entre les mots atome et molécule, et cela avec d'autant plus de raisons que, si jusqu'à ce jour on n'est pas parvenu à se mettre d'accord sur des formules uniques, c'est uniquement faute d'avoir établi cette distinction.¹⁸

Simplicio : Monsieur Berthelot pense que les notions d'atomes et de molécules sont trop hypothétiques. Qui n'a jamais vu, je le répète, une molécule ou un atome ?¹⁹

Salviati : Point n'est besoin de les voir. Cette théorie permet d'interpréter l'ensemble des faits. De nombreux chimistes, Messieurs Dumas, Gaudin, Gerhardt, Laurent, pensent que pendant le processus de combinaison chimique, les molécules échangent leurs atomes de manière à donner de nouvelles molécules. Monsieur Wurtz représente cela sous la forme d'une équation : $HH + ClCl = HCl + HCl$.²⁰

Sagredo : Cette théorie semble se tenir Donc si je récapitule ce que dit monsieur Salviati, les espèces chimiques sont constituées de particules que nous appelons molécules et ces molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes.

Salviati : C'est tout à fait cela, quoi qu'en dise monsieur Berthelot par la voix de monsieur Simplicio. Les gaz hydrogène et chlore ne sont pas constitués de particules atomiques mais biatomiques.²¹ Nous allons d'ailleurs les rebaptiser et les appeler molécule de dichlore et molécule de dihydrogène. Et nous appellerons les gaz correspondant : le dichlore et le dihydrogène.

Sagredo : Et on interprète alors la transformation chimique comme un échange d'atomes entre les molécules qui constituent les espèces chimiques.

Salviati : Tout à fait. Cette théorie permet également d'interpréter la formation de l'eau et de l'ammoniac et d'interpréter les volumes de gaz trouvés par monsieur Gay-Lussac.

Sagredo : Et l'atome d'hydrogène ne s'unit pas dans les mêmes quantités aux atomes de chlore, d'oxygène, d'azote et de carbone. Nous obtenons alors quatre formules de molécules différentes.

¹⁸ D'après Gaudin, M. A. (1833). Recherches sur la structure intime des corps inorganiques définis. Annales de Chimie et de Physique, 52, p.113–133.

¹⁹ D'après Berthelot, M. (1877). Réponse à la note de M. Wurtz, relative à la loi d'Avogadro et à la théorie atomique. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1189–1195.

²⁰ D'après Wurtz, C. A. (1864). Leçons de philosophie chimique. Paris : Hachette., p.37-38.

²¹ D'après Gaudin, M.-A. (1873). L'architecture du monde des atomes dévoilant la structure des composés chimiques et leur cristallogénie. Paris : Gauthiers-Villars., p.25.

Salviati : Encore exact. Les atomes, de chlore, d'oxygène, d'azote n'ont pas le même pouvoir de combinaison pour l'hydrogène. Les combinaisons ainsi formées sont : HCl, H₂O, NH₃ et nous pouvons y ajouter CH₄ car les atomes d'hydrogène peuvent être remplacés par quart dans la molécule de méthane. Ainsi, les atomes C, Cl, N et O des corps simples ne sont pas équivalents entre eux puisqu'ils s'unissent à un même atome dans des quantités différentes.²².

Sagredo : Il me reste une dernière question. La formule chimique permet de représenter une molécule. Est-il possible d'utiliser cette même formule pour représenter une espèce chimique ?

Salviati : Monsieur Gaudin trouve que si l'on voulait compter le nombre des atomes contenus dans une grosse tête d'épingle, en en détachant chaque seconde un milliard, il faudrait continuer cette opération pendant plus de deux cent cinquante mille ans.²³ Une espèce chimique est donc constituée d'un nombre incalculable de la même molécule. Il semble donc pertinent de garder la même formule pour la molécule et pour l'espèce chimique. Cependant pour faire la différence entre la molécule, invisible et l'espèce chimique accessible à nos sens, nous pouvons ajouter un indice à la formule qui désigne l'espèce chimique : un « g » pour gaz, un « l » pour liquide et un « s » pour solide.

Sagredo : Et dans ce cas, nous pouvons alors représenter les quatre réactions de formation du gaz chlorhydrique, du gaz eau, du gaz ammoniac et du gaz méthane à partir des espèces chimiques : gaz dihydrogène, gaz dichlore, gaz diazote.

Objectifs pour l'ensemble des séances :

- Être capable de définir les termes molécules et atomes en lien avec le modèle microscopique de la réaction chimique et savoir qu'à une molécule est associée une formule chimique (un ou plusieurs types d'atome et nombre invariable pour chaque type d'atome)
- Être capable de définir une espèce chimique : corps pur simple ou corps pur composé et savoir qu'à une espèce chimique est associée une formule chimique et un nom chimique.
- Être capable de lire une formule chimique et d'écrire une formule chimique à partir de la composition en atomes de la molécule. Être capable de faire le lien entre le nom chimique et la formule chimique.
- Être capable de lire l'équation au niveau microscopique (entre molécules) de la réaction chimique modélisant la transformation chimique et de repérer dans cette équation la conservation des atomes. (ex : $\text{H}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow 2 \text{HCl}$)
- Et en parallèle être capable de lire l'équation au niveau macroscopique (entre espèces chimiques) de la réaction chimique dans le cas d'espèces gazeuses et de faire le lien entre les nombres stœchiométriques et les volumes échangés (ex : $\text{H}_2 (\text{g}) + \text{O}_2 (\text{g}) \rightarrow 2$

²² D'après Wurtz, A. (1877). Sur la loi des volumes de M. Gay-Lussac ; réponse à M. H. Sainte-Claire Deville. Comptes Rendus Hebdomadaires Des Séances de l'Académie Des Sciences, 1, p.1183-1189.

²³ Gaudin, M.-A. (1873). L'architecture du monde des atomes dévoilant la structure des composés chimiques et leur cristallogénie. Paris: Gauthiers-Villars.

HCl (g) et 1 volume de dihydrogène + 1 volume de dioxygène donne 2 volumes de chlorure d'hydrogène alors que la masse de dihydrogène + la masse de dichlore donne la masse de chlorure d'hydrogène). Cette étape peut permettre de préparer l'évolution qui s'opérera en seconde avec le modèle macroscopique de la réaction chimique en lien avec l'introduction de la quantité de matière (mole).

Proposition d'usage des dialogues

« Mode d'emploi » dialogue 1 :

Prérequis :

- Définition des transformations chimiques comme modifications de la nature des espèces chimiques présentes au début, et à la fin, avant et après le changement. À ce stade, aucune équation n'a encore été proposée aux élèves pour représenter les transformations chimiques.

Notamment on n'écrit pas d'équations avec les noms des espèces chimiques pour représenter la transformation chimique. Proposition pour représenter la transformation chimique : on indique les espèces chimiques présentes dans l'état initial et les espèces chimiques présentes dans l'état final²⁴ comme ci-dessous :

État initial ou début de la transformation
oxygène et hydrogène

État final ou fin de la transformation
eau

La conservation de la masse peut éventuellement avoir été traitée mais ce prérequis n'est pas nécessaire pour les séances à venir.

- Modèle de l'espèce chimique : une espèce chimique ou corps pur est caractérisée par un certain nombre de propriétés (température changement d'état, masse volumique, ...). Les élèves pourraient avoir élaboré des cartes d'identité des différentes espèces chimiques qu'ils ont été amenés à étudier. Ces cartes pourraient être complétées au fur et à mesure.
- On associe un nom scientifique à une espèce chimique.
- Modèles particuliers : une espèce chimique est constituée de particules infiniment petites et toutes identiques. Dans le cas des gaz, on appelle ces particules des molécules.
- Théorie atomique : les particules sont elles-mêmes constituées d'autres particules appelées atomes. Les atomes et molécules n'ont pas encore été définis plus que cela (objectifs des séances).
- Les symboles des atomes : un travail a pu être proposé aux élèves sur les différentes propositions de symboles qui ont été proposées par les chimistes (voir autres outils historiques proposés).

Objectifs :

- Deux espèces chimiques différentes correspondent à deux particules constituées d'atomes différents ou en nombre différent
- Une molécule est représentée par sa formule chimique. **Deux formules chimiques différentes de molécules correspondent à deux particules différentes et donc à deux espèces chimiques différentes.**
- Rappel des corps simple et composé. Interprétation corps simple et corps composé au niveau microscopique

²⁴ À noter qu'il s'agit d'une situation particulière où tous les réactifs sont consommés, ce qui correspond à des proportions initiales dites stœchiométriques.

Durée : 1 séance

Déroulé possible de la séance :

Trois étapes possibles (voir séparation en pointillé dans le texte) :

- 1^{ère} étape :
 - Faire échanger les élèves sur la phrase : « L'eau n'est plus un corps simple mais est bien un corps composé ». Proposer alors de définir corps simple et corps composé à un niveau macroscopique. Et expliquer éventuellement le « plus » dans « n'est plus un corps simple » en faisant référence à la théorie des quatre éléments d'Aristote.
 - Demander aux élèves de répondre à la question de Sagredo en faisant des propositions sur la formule de l'eau et en justifiant leur proposition.
- 2^{ème} étape :
 - Demander aux élèves de donner les formules faites par Simplicio et par Salviati ainsi que les arguments proposés par chacun d'eux et de comparer à leurs réponses.
 - Faire émerger le type d'arguments sur lequel s'appuie Simplicio (simplicité de la formule) et le type d'argument proposé par Salviati (proposer une interprétation d'un résultat empirique)
- 3^{ème} étape :
 - Quelle est la formule finalement retenue ?
 - Pour quelle raison Sagredo ne semble pas vouloir retenir la proposition de Simplicio ?
 - Faire remarquer qu'il y a eu débat sur les formules et que celles retenues ne sont pas celles de Dalton qui s'est donc trompé sur ce point

Conclusion de la séance :

- Revenir sur la définition du corps composé en demandant aux élèves de donner une règle au niveau microscopique.
- Donner les règles d'écriture d'une formule chimique

Activités possibles après la séance :

Exercice sur les formules et les noms associés du monoxyde de carbone, du dioxyde de carbone, du gaz chlorhydrique, de l'ammoniac et du méthane.

« Mode d'emploi » dialogue 2 :

Prérequis :

Cette séance fait suite à la précédente. Les prérequis sont donc identiques à la première séance auxquels on ajoute ceux de la première séance : la formule chimique pour la molécule.

Durée : 2 séances

Objectifs des deux séances :

- Définir atome et molécule au niveau microscopique et faire le lien avec espèce chimique (corps pur et corps simple)
- Proposer le modèle de la réaction chimique à un niveau microscopique pour interpréter les transformations chimiques : réarrangement des atomes des molécules correspondant aux espèces chimiques qui se transforment pour former les molécules correspondant aux espèces chimiques qui se forment.
- Représenter une réaction au niveau microscopique par une équation et être capable de repérer la conservation des atomes
- Première notion de valence à partir des molécules de chlorure d'hydrogène, d'eau, d'ammoniac et de méthane avec première utilisation des modèles moléculaires. Lien possible ensuite avec le tableau périodique

Déroulé possible de la première séance :

- 1^{ère} étape :
 - Faire écrire aux élèves l'équation de réaction supposée de la transformation chimique entre l' « hydrogène » et le « chlore »
 - Faire débattre les élèves sur une éventuelle contradiction
- 2^{ème} étape
 - Faire écrire aux élèves l'équation de réaction supposée de la synthèse de l'eau et de la synthèse de l'ammoniac, toujours en supposant les formules des corps simples comme monoatomique
 - Faire débattre sur la proposition de Simplicio au regard des informations apportées par Salviati et leur demander leurs éventuelles hypothèses.
- 3^{ème} étape :
 - Faire écrire les formules des corps simples à partir des propositions de Salviati
 - Faire réfléchir les élèves sur le fait que Simplicio fait des propositions en essayant de « coller » aux résultats expérimentaux et que Salviati fait des propositions à partir d'hypothèses mises à l'épreuve de l'expérience.

Conclusion de la première séance :

Demander aux élèves de faire leurs propositions sur la différence entre atomes et molécules

Déroulé possible de la deuxième séance :

- 1^{ère} étape :
 - Faire écrire l'équation de réaction synthèse du gaz chlorhydrique proposée par Salviati avec les formules « correctes »

- Demander aux élèves pourquoi certains refusaient l'hypothèse de l'atome au XIX^e siècle. Faire ressortir qu'il y a eu débat et leur demander les raisons qui ont permis à la théorie atomique de l'emporter.
- 2^{ème} étape
 - Faire écrire aux élèves l'équation de réaction de synthèse de l'eau (celle de l'ammoniac peut être traitée plus tard en exercice) en faisant remarquer la conservation des atomes
 - Renommer les molécules.
- 3^{ème} étape :
 - Faire comparer aux élèves les formules du gaz chlorhydrique, de l'eau, de l'ammoniac et du méthane. Possibilités d'utiliser alors les modèles moléculaires pour ces quatre molécules. Cette étape pouvant également être réalisée plus tard
- 4^{ème} étape :
 - Demander aux élèves de répondre à la question de Sagredo : comment peut-on représenter les espèces chimiques ?
- 5^{ème} étape :
 - Comparer les réponses des élèves et la proposition de Salviati
 - Faire écrire l'équation de réaction de synthèse du gaz chlorhydrique avec les espèces chimiques en faisant remarquer le lien entre les nombres stœchiométriques et les volumes échangés.

Conclusion pour l'ensemble des séances :

Définition de molécules et atomes en lien avec le modèle microscopique de la réaction chimique et en lien avec les espèces chimiques, corps simples et corps composés.

Les formules chimiques des molécules et des espèces chimiques.

- Proposition pour les définitions à donner en conclusion aux élèves :

Les espèces chimiques sont formées au niveau microscopique de particules. Ces particules sont toutes identiques pour une même espèce chimique. Pour les espèces chimiques étudiées cette année, ces particules sont soit des atomes soit des molécules. Les molécules sont elles-mêmes des assemblages d'atomes.

Quand une molécule est constituée du même type d'atome, l'espèce chimique associée est un corps simple. Quand une molécule est constituée de plusieurs types d'atome, l'espèce chimique associée est un corps composé. Celui-ci est alors décomposable chimiquement.

Un atome est représenté par un symbole. Une molécule est représentée par une formule chimique. On utilise soit le même symbole soit la même formule pour représenter l'espèce chimique au niveau macroscopique dans les réactions chimiques.

Certaines espèces chimiques peuvent réagir entre elles : cela signifie que lorsqu'on les met en présence, une espèce chimique (ou plusieurs) peut disparaître et il se forme alors une ou plusieurs nouvelles espèces chimiques. Les espèces chimiques présentes au début de la mise en contact, et après changement ne sont pas les mêmes. On dit qu'il y a eu une transformation chimique.

Pour interpréter les transformations chimiques, les chimistes ont construit le modèle de la réaction chimique. À l'échelle microscopique, les molécules présentes dans les espèces

chimiques changent. Les atomes des molécules constituant les réactifs se réarrangent pour former les molécules constituant les produits. On dit qu'il y a eu réaction chimique. Et donc au cours d'une réaction chimique, les atomes sont indivisibles et ne peuvent être ni créés ni détruits. Ils peuvent se recombinaison pour former de nouvelles molécules.

Travail possible par la suite :

- Revenir sur les cartes d'identité des espèces rencontrées dans ces dialogues (dihydrogène, dioxygène, eau, dichlore,). Revenir sur les formules des molécules, les formules de l'espèce chimique, sur les noms scientifiques associés et sur la notion de corps simple ou composé
- Faire les cartes d'identité de quelques espèces chimiques différentes mais avec des formules chimiques « proches » :
 - H_2O et H_2O_2
 - O_2 et O_3
 - CH_4 et CH_3OH : un groupe OH à la place d'un H
 - $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ et $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$: un O à la place de 2H
 - C_2H_4 et C_6H_{12} et C_3H_6 et C_6H_{12} (proportionnel)
 - O_2 et O_3 ; H_2O et H_2O_2 ; $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ et $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$; CH_4 et CH_3OH .

Objectif : montrer l'importance du type et du nombre d'atomes constituant la molécule pour distinguer les espèces chimiques.

- Écrire les équations de réaction de synthèse de l'ammoniac et du méthane écrites : au niveau macroscopique avec les formules des espèces chimiques en faisant le lien entre nombre stœchiométriques et volumes de gaz et au niveau microscopique en faisant observer le réarrangement des atomes.
- Introduire la notion de valence par les formules avec l'hydrogène en lien avec les colonnes du tableau périodique.
- Travail possible en lien avec les modèles moléculaires.

Annexe : Les espaces de contraintes et de nécessités

Nous reprenons les différentes propositions des équivalentistes et des atomistes qui ont été faites pour la formule de l'eau puis pour celles des corps simples gazeux. Nous cherchons pour chaque proposition, ce qui, du registre empirique et du registre des modèles, a créé les contraintes pour l'élaboration de ces formules. Les flèches d'une même couleur symbolisent une mise en tension des différents registres. Pour faciliter la compréhension des espaces, nous introduisons une lecture chronologique des mises en tension à partir d'un code couleur. Dans le cadre épistémique, nous indiquons les registres explicatifs qui ont permis le développement des modèles. Certains de ces registres sont nécessaires pour l'élaboration de la formule chimique mais ne correspondent à aucun modèle. Dans ce cas, une flèche part directement du registre explicatif vers le registre symbolique.

Formule de l'eau

Celle-ci va osciller entre HO et H₂O.

Formule de l'eau pour les équivalentistes

Cadre épistémique (Figure 5)

Les équivalentistes basent tout leur raisonnement à partir des lois des proportions chimiques qui permettent de différencier les mélanges et les transformations chimiques au début du XIX^e siècle. Nous pouvons les qualifier de positiviste, au sens donné par Serres et Farouki (1997).

D'une manière générale, on qualifie de positiviste toute personne qui, dans le cadre de la recherche scientifique, souhaite éliminer du discours scientifique tout ce qui ne relève pas directement de l'observation et de l'expérience. (Serres & Farouki, 1997, p. 745)

Registre empirique (Figure 5)

Pour les équivalentistes, la formule chimique est un outil de représentation permettant d'illustrer observations et mesures expérimentales. La première contrainte est empirique. Depuis la fin du XVIII^e, l'eau n'est plus un corps simple. Les chimistes connaissent deux combinaisons possibles contenant uniquement les éléments²⁵ hydrogène et oxygène. Ceux-ci diffèrent par les rapports pondéraux d'oxygène et d'hydrogène.

Registre symbolique : contraintes (Figure 5)

Les équivalentistes ont une contrainte symbolique. Ils prennent l'oxygène comme référence qu'ils représentent par O.

Registre symbolique : nécessités (Figure 5)

Les équivalentistes posent comme règle que le premier équivalent, ou nombre proportionnel 1 ou encore celui à qui on associe le symbole, est celui qui se combine dans le composé le moins oxygéné. Dans le cas des combinaisons oxygène-hydrogène, l'équivalent hydrogène, symbole H, est donc nécessairement celui qui se combine avec l'équivalent oxygène dans l'eau et sa valeur pondérale est 12,5 ou 100/8. Ainsi HO est la formule de l'eau, et HO² ou

²⁵ Le mot élément est pris ici au sens de Lavoisier.

$H^{1/2}O$ celles de l'eau oxygénée. Ces dernières correspondent à un rapport de 1/16. La référence pondérale a plusieurs fois varié. Les équivalentistes, notamment les organiciens, ont choisi dans un souci de simplification de prendre comme référence pondérale l'hydrogène à 1 à la place de l'oxygène à 100. Dans ce cas, l'équivalent de l'oxygène a une valeur pondérale de 8.

Registre des modèles (Figure 5)

Nous ne plaçons pas de contrainte dans le registre des modèles pour justifier la formule. La formule des équivalentistes est arbitraire et peut changer en fonction du choix qui est fait pour la définition du nombre proportionnel (premier degré d'oxygénation). Il suffit en effet de changer la règle pour le choix du premier équivalent, et donc du symbole, pour changer la formule. Si nous décidons de définir l'équivalent d'hydrogène comme celui correspondant à l'espèce chimique avec la proportion pondérale d'oxygène la plus importante, la formule de l'eau oxygénée devient HO et celle de l'eau H^2O . Avec le registre explicatif utilisé par les équivalentistes, la formule de l'eau est tout aussi bien HO que H^2O^2 . Les chimistes faisaient à l'époque le choix de de la combinaison minimale comme nous pouvons le faire actuellement avec les solides ioniques ou métalliques.

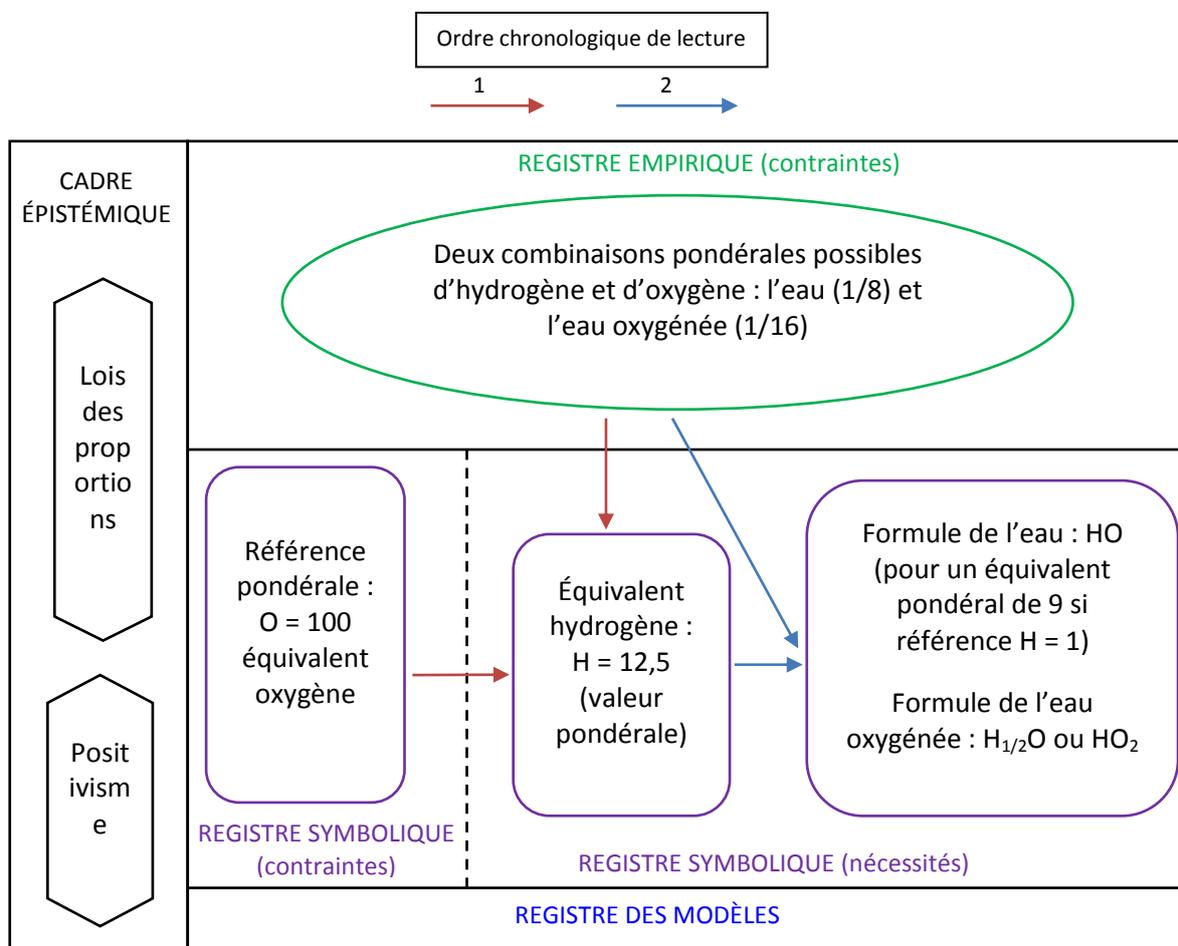


Figure 5 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour les équivalentistes

Une autre raison va amener les équivalentistes, dont Gerhardt, à proposer H_2O pour la formule de l'eau (Figure 6).

Registre empirique et registre symbolique : contraintes (Figure 6)

Gerhardt observe que toutes les réactions libèrent un multiple pondéral de 18 pour l'eau. Or si la formule de l'eau est HO, l'équivalent pondéral de l'eau est 9 (H = 1 et O = 8). On arrive à un résultat empirique qui semble absurde pour Gerhardt (Flèche rouge - Figure 6). Les transformations chimiques donnant de l'eau, ce que les organiciens réalisent couramment à cette époque, doivent libérer systématiquement un nombre pair d'équivalent pondéral d'eau et jamais un nombre impair.

Registre empirique et registre symbolique : nécessités (Figure 6)

La formule H_2O devient alors nécessaire pour faire disparaître ce qui paraît absurde. Cette dernière correspond en effet à un équivalent pondéral de 18 (H = 1 et O = 16). Ainsi la quantité pondérale d'eau produite dans les transformations chimiques correspond, avec cette nouvelle formule, à un multiple quelconque d'équivalents d'eau (Flèche noire - Figure 6).

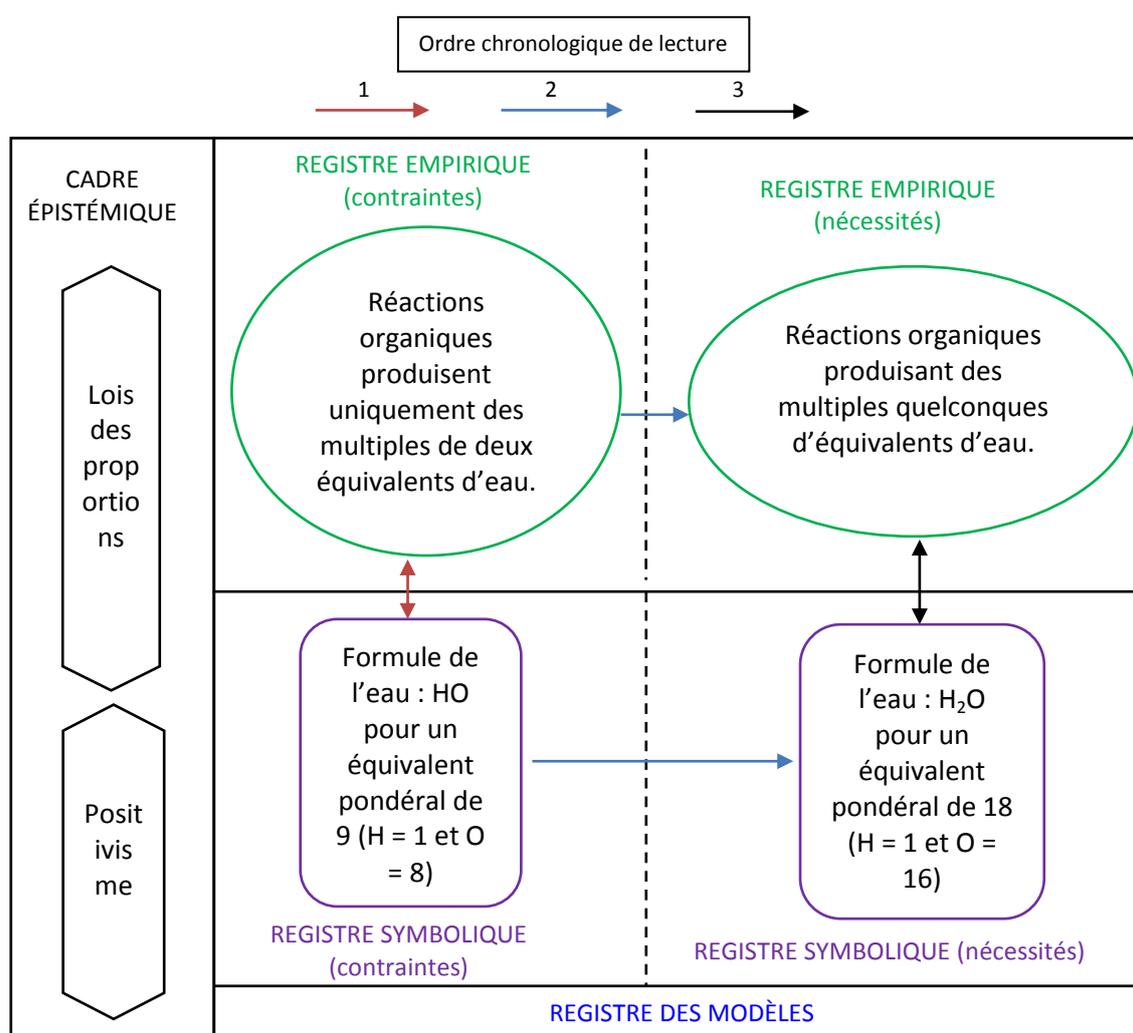


Figure 6 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Gerhardt (équivalentiste - organicien)

Les formules pour les équivalentistes ont ainsi évolué au gré des définitions choisies pour les équivalents.

Formule de l'eau pour les atomistes (Dalton – Berzelius – Les organiciens)

Parmi les atomistes, trois cas sont à considérer : les formules proposées par Dalton (Figure 7), celles de Berzelius (Figure 8) et enfin celles des atomistes organiciens du milieu du XIX^e siècle (Figure 9). Dans le cas de l'eau, Dalton propose la formule HO. Berzelius et les atomistes organiciens proposent H₂O mais pour des raisons différentes. Dans les trois cas, on trouve des points communs.

Cadre épistémique (Figure 7, Figure 8 et Figure 9)

Les chimistes utilisent comme registre explicatif une interprétation particulière de la matière qui permet d'interpréter les transformations chimiques et les différentes lois obtenues au début du siècle dont celles utilisées par les équivalentistes.

Registre des modèles : contraintes (Figure 7, Figure 8 et Figure 9) :

Pour l'établissement des formules, ils partent tous les trois de la même contrainte dans le registre des modèles : des espèces chimiques constituées de particules qui sont des combinaisons d'atomes différents dans des proportions pondérales fixes.

Registre empirique (Figure 7, Figure 8 et Figure 9) :

Comme les équivalentistes, ils ont au départ la même contrainte empirique : deux combinaisons d'hydrogène et d'oxygène dont l'eau dans les proportions pondérales de 1/8. La formule de l'eau est donc nécessairement constituée d'atomes d'hydrogène et d'atomes d'oxygène, ce que nous traduisons par la nécessité de deux symboles, H et O, dans la formule. Nous avons indiqué cette nécessité dans le registre symbolique pour marquer la différence avec les équivalentistes pour qui les symboles correspondent à des règles arbitraires, donc des contraintes, sans lien avec le modèle particulière.

Registre des modèles : nécessités (Figure 7, Figure 8 et Figure 9)

Enfin, à partir de leur formule de l'eau et de la combinaison pondérale connue, Dalton, Berzelius et les organiciens peuvent déterminer le poids²⁶ de l'atome d'oxygène en fixant comme référence celui de l'atome d'hydrogène à 1. Dalton, à partir de la formule HO, obtient une valeur deux fois plus petite que Berzelius ou les organiciens avec la formule H₂O.

Dalton, Berzelius et les organiciens ne vont pas utiliser le même cadre explicatif ce qui permet d'expliquer les différences observées dans les trois registres : empirique, symbolique et des modèles (Figure 7, Figure 8 et Figure 9).

Formule de l'eau pour Dalton

Cadre épistémique (Figure 7)

Dans le cas de Dalton, un critère arbitraire est nécessaire pour déterminer les formules chimiques : le critère de simplicité. En lien avec aucune théorie scientifique, nous ne pouvons le considérer comme un modèle scientifique et décidons de le placer dans son cadre épistémique (Figure 7).

²⁶ Terme utilisé par les chimistes dans cette première partie du XIX^e siècle.

Registre symbolique (Figure 7)

Dalton applique le critère de simplicité pour déterminer la formule de l'eau à partir des observations pondérales réalisées sur les composés contenant uniquement de l'hydrogène et de l'oxygène (Flèche verte, Figure 7). La proportion pondérale hydrogène – oxygène étant 1/8 et celle de l'eau oxygénée 1/16, la formule de l'eau correspond alors nécessairement à HO.

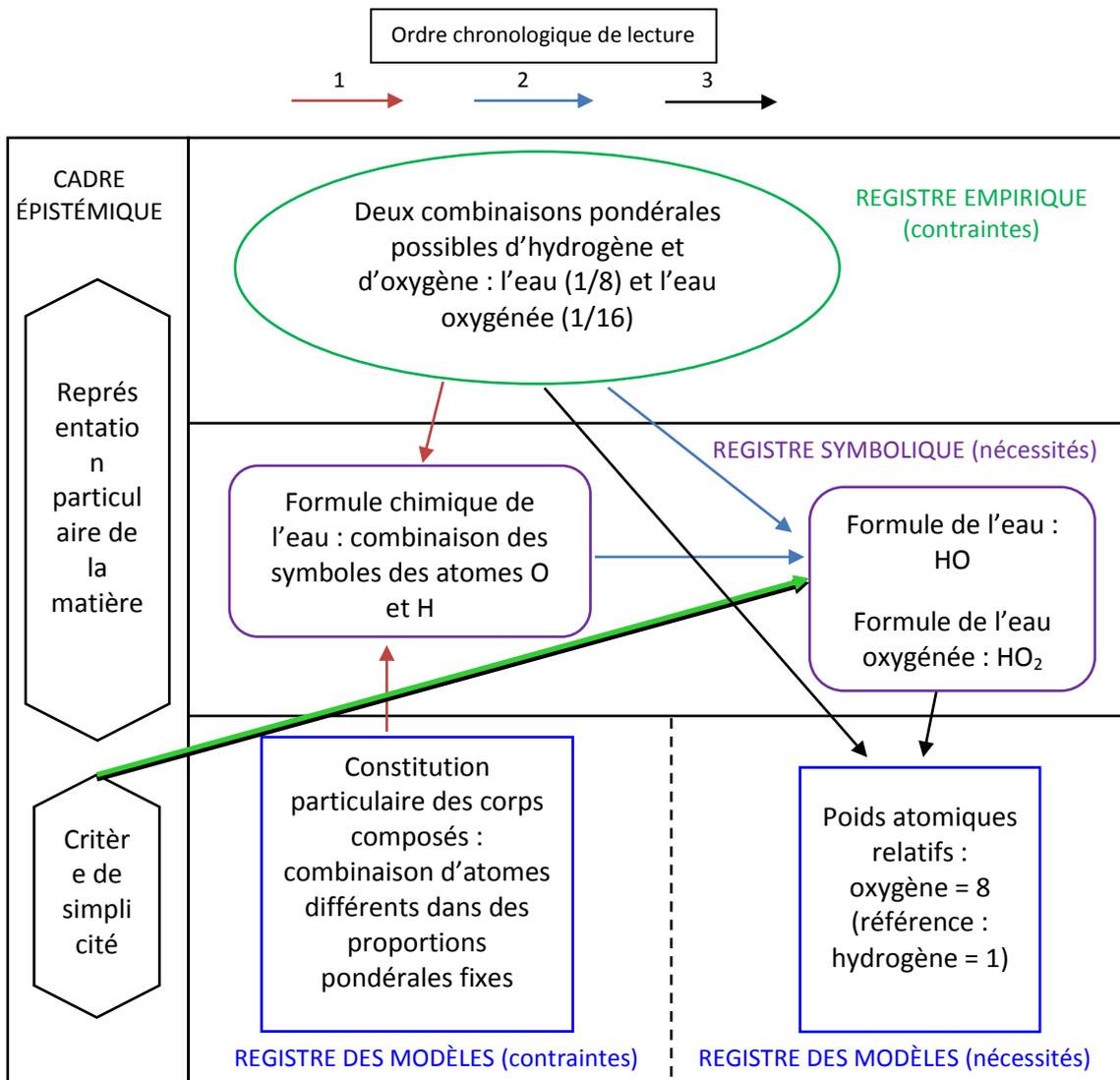


Figure 7 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Dalton

Formule de l'eau pour Berzelius

Cadre épistémique (Figure 8) :

Berzelius ne fait pas la distinction entre atome et molécule. Dans sa représentation des gaz, c'est l'atome qui est équivalent au volume. Nous plaçons donc cette interprétation dans son cadre épistémique.

Registre empirique (Figure 8) :

Berzelius utilise les lois volumétriques de Gay-Lussac dans la détermination de la formule de l'eau. Nous l'ajoutons dans les contraintes empiriques en plus de la contrainte pondérale.

L'équivalence volume de gaz / atome en lien avec les résultats de Gay-Lussac permet à Berzelius d'aboutir à la nécessité d'une formule pour l'eau en H₂O (Flèches verte et bleue, Figure 8).

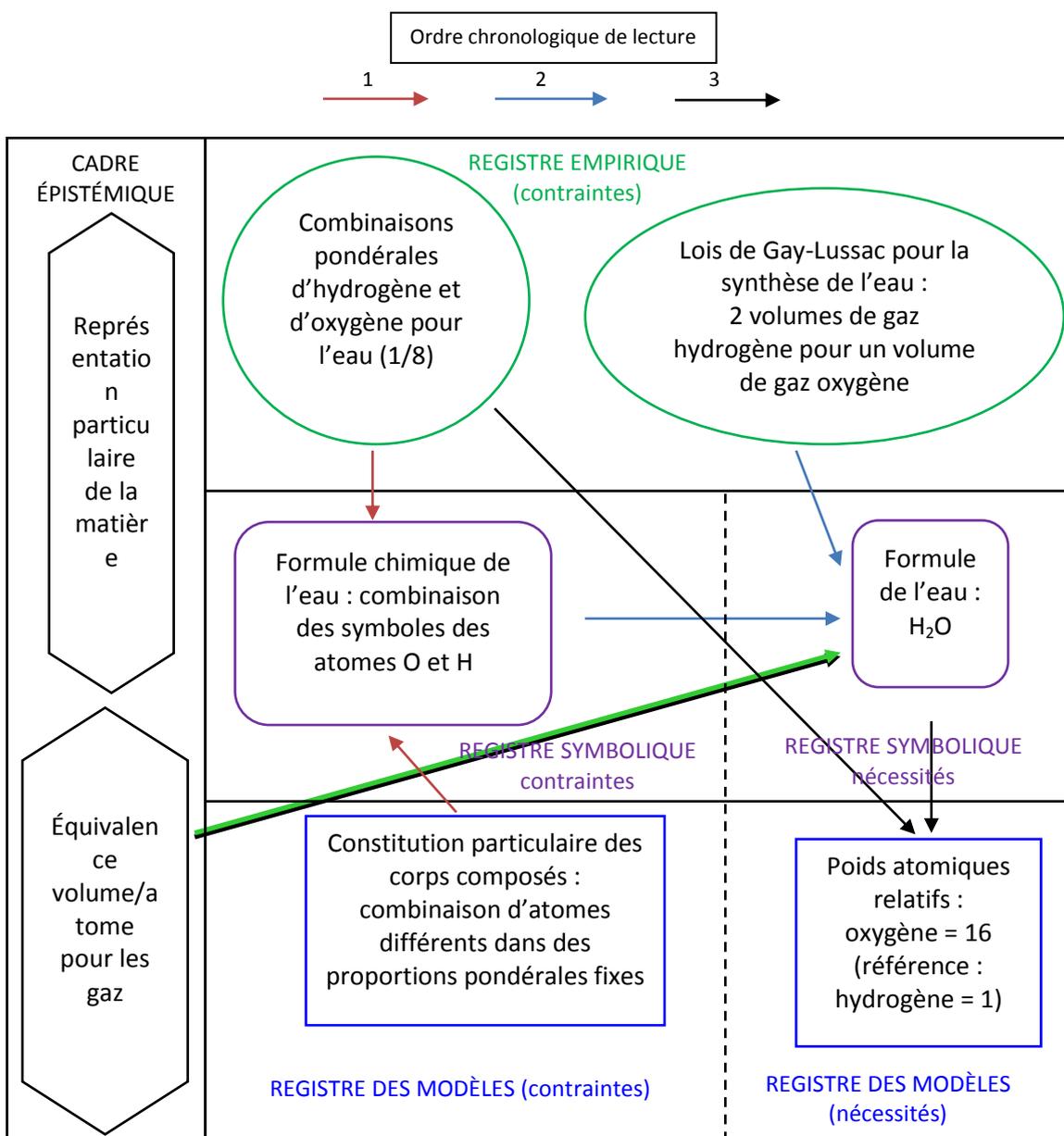


Figure 8 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour Berzelius

Formule de l'eau pour les atomistes - organiciens

Cadre épistémique (Figure 9) :

La représentation particulière des organiciens évolue par rapport à celles de Dalton et de Berzelius. Ils font la distinction atome/molécule en admettant le rôle joué par l'arrangement des atomes au sein de la molécule.

Registre des modèles : contraintes (Figure 9) :

À partir de ce registre explicatif, les atomistes-organiciens se réfèrent au modèle des gaz d'Avogadro-Ampère. Ils font évoluer le modèle de l'atome en lui ajoutant une nouvelle propriété : l'atomicité.

Registre empirique : contraintes (Figure 9) :

L'atomicité est déterminée pour chaque atome en croisant les nombreux résultats expérimentaux obtenus dans les synthèses organiques, notamment les réactions de substitutions, et l'observation des isomères. Comme pour Berzelius, les organiciens utilisent les lois volumétriques de Gay-Lussac pour la détermination de la formule de l'eau.

Registre symbolique : contraintes (Figure 9) :

Les organiciens peuvent alors déterminer l'atomicité de l'hydrogène et de l'oxygène. Nous avons donc une nouvelle contrainte symbolique : l'atome d'hydrogène peut donner une liaison²⁷ et celui d'oxygène deux liaisons. La molécule est donc caractérisée par le type et le nombre d'atomes qui la constituent, ce qui donne la formule empirique, mais également par l'arrangement des atomes entre eux, ce qui donne une nouvelle formule : la rationnelle.

Registre symbolique : nécessités (Figure 9) :

La formule de l'eau est alors nécessairement H₂O pour la formule empirique ou HOH pour la formule rationnelle. La formule de l'eau n'évoluera plus après le congrès de Karlsruhe.

²⁷ Les chimistes utilisaient aussi les termes capacité de combinaison ou valence.

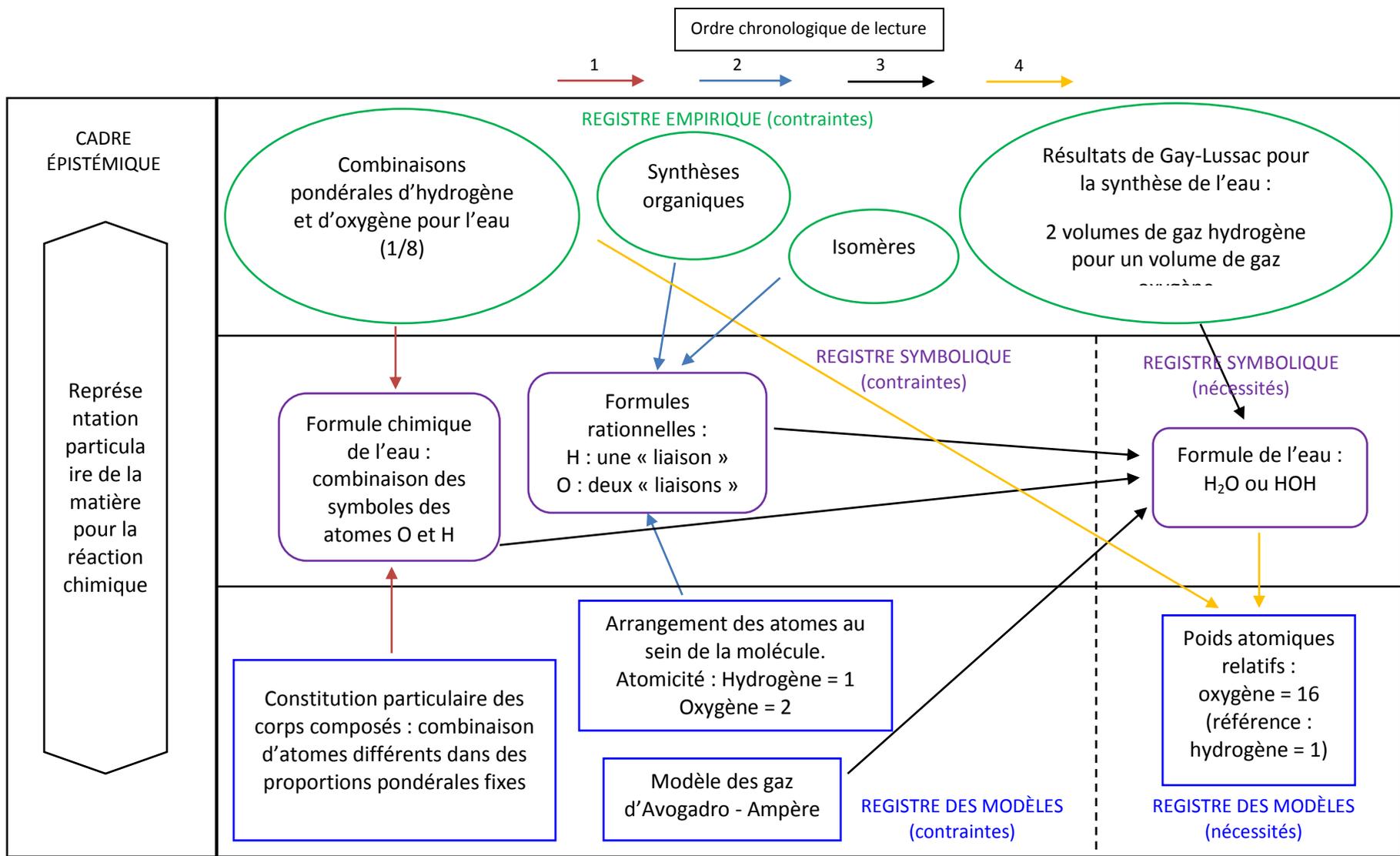


Figure 9 Espace des contraintes et nécessités : formule de l'eau pour les atomistes après le congrès de Karlsruhe

Formule des corps simples

La formule des corps simples est ce qui divise encore les chimistes au congrès de Karlsruhe. Pour les équivalentistes, la question ne se pose pas. Nous ne présentons donc pas d'espace pour ces chimistes. Dans le cas de l'eau, une fois l'équivalent de l'hydrogène défini à partir de l'équivalent d'oxygène, on associe les symboles aux équivalents qui sont de fait les symboles des corps simples. Pour les atomistes, la question est liée à l'identification des deux concepts : atome et molécule et au développement de la chimie organique. Nous n'indiquerons pas dans le registre des modèles les nécessités pour les valeurs pondérales des corps simples sauf pour le dernier espace. Celles-ci sont en effet obtenues de proche en proche à partir des corps composés avec au départ le choix d'une référence (soit $O = 100$ soit $H = 1$), sauf pour les organiciens-atomistes qui, une fois établie la formule du corps simple, peuvent à partir des densités déterminer les poids atomiques relatifs.

Formule des corps simples pour Dalton

Cadre épistémique (Figure 10) :

Le registre explicatif de Dalton est applicable aussi bien pour les corps composés que pour les corps simples. La Figure 7 est intégralement transposable dans le cas des corps simples. Dalton utilise à nouveau le critère de simplicité pour justifier la formule des corps simples.

Registre empirique (Figure 10) :

Au niveau empirique, on retrouve la non-décomposition de certaines espèces chimiques qui peuvent alors être considérées comme des corps simples.

Registre des modèles (Figure 10) :

Au niveau particulière dans le registre des modèles, les corps simples ne sont donc constitués que d'un seul type d'atome. Et en appliquant le critère de simplicité, la formule est nécessairement H pour le gaz hydrogène et O pour le gaz oxygène (Figure 7).

Formule des corps simples pour Berzelius

Cadre épistémique (Figure 11) :

Entre Dalton et Berzelius, seul le cadre épistémique change pour les corps simples. Pour Berzelius, les phénomènes électrochimiques sont à l'origine de la cohésion des combinaisons des atomes en fonction de leurs polarités différentes. Une molécule est nécessairement constituée d'un groupe d'atomes de polarité positive et d'un groupe d'atomes de polarité négative. Nous ajoutons donc dans son cadre épistémique sa vision dualistique liée aux phénomènes électrochimiques. La combinaison de deux atomes identiques est donc impossible.

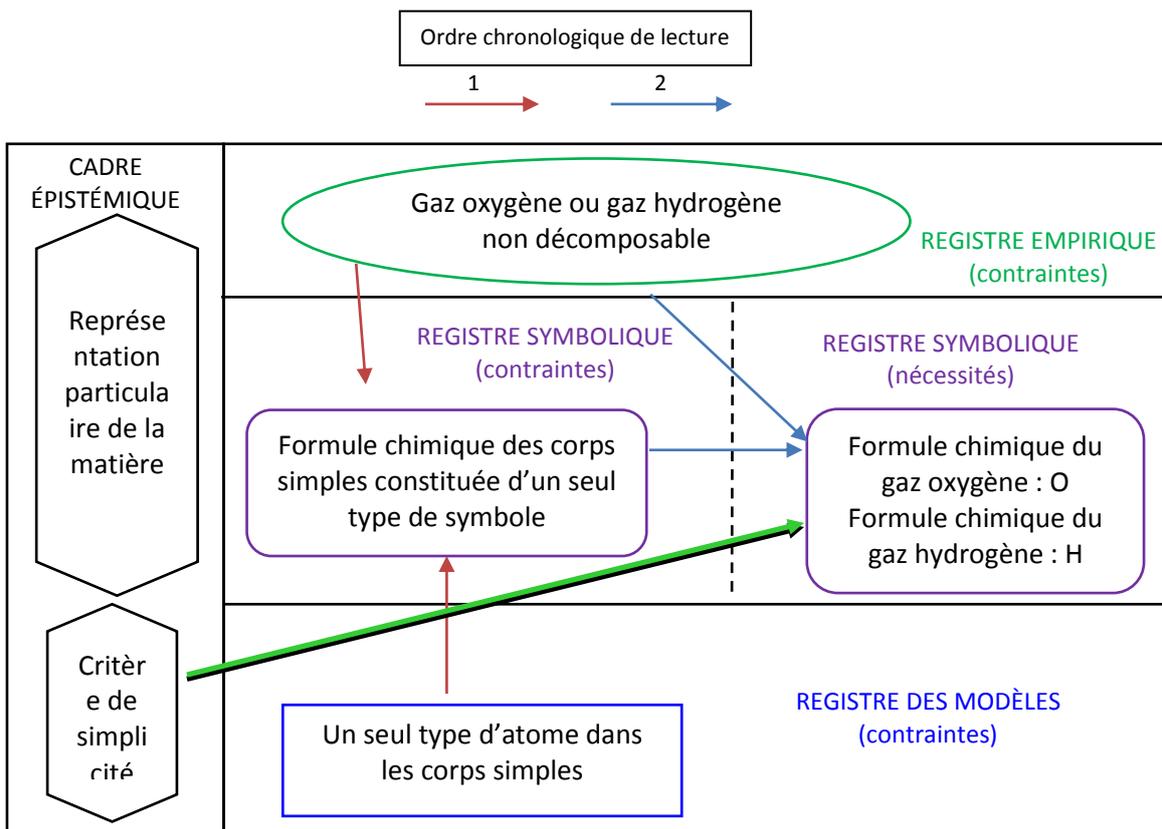


Figure 10 Espace des contraintes et nécessités : formule des corps simples pour Dalton

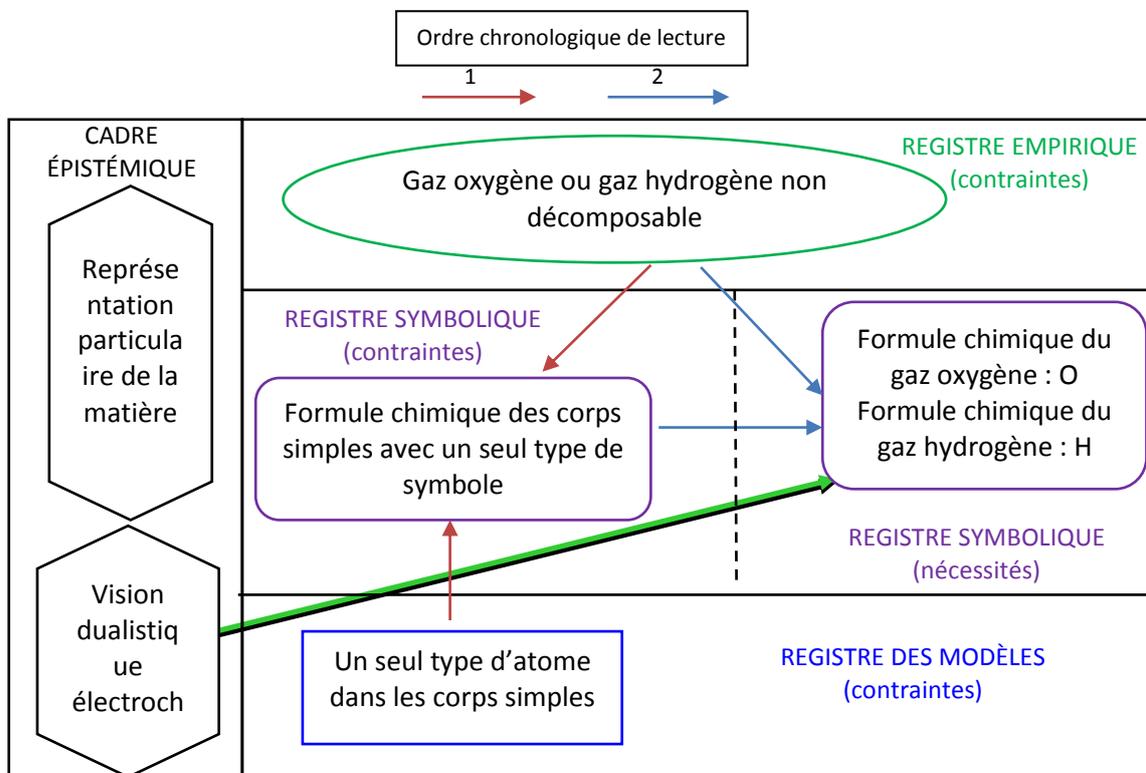


Figure 11 Espace des contraintes et nécessités : formules des corps simples pour Berzelius

Formule des corps simples pour les atomistes - organiciens

Cadre épistémique (Figure 12) :

Les organiciens retirent de leur registre explicatif la vision dualistique et y ajoutent la distinction atome-molécule ce qui permet d'imaginer dans le registre symbolique des corps simples composés de deux atomes du même type

Registre empirique (Figure 12) :

C'est l'étude des réactions de substitution qui amène les organiciens à changer de point de vue par rapport à Berzelius. On intègre alors une nouvelle contrainte empirique : un chlore électro-négatif peut se substituer à un hydrogène électro-positif au cours d'une transformation chimique. Les chimistes, comme pour les corps composés vont partir des lois de Gay-Lussac pour la détermination des formules des molécules de gaz. Ils ont à leur disposition les mesures des densités de ces gaz

Registre des modèles : contraintes (Figure 12) :

Comme nous l'avons déjà signalé avec la formule de l'eau, les organiciens, atomistes convaincus, attribuent à l'atome une nouvelle caractéristique : son atomicité. Elle permet d'établir la capacité de combinaisons de chaque atome soit avec lui-même soit avec d'autres atomes et elle est obtenue à partir des nombreuses observations réalisées en chimie organique.

Registre symbolique : nécessités (Figure 12) :

Les formules des corps simples sont donc composées d'un ou plusieurs atomes, le nombre n'étant pas limité à deux. En croisant les lois de Gay-Lussac et le modèle d'Avogadro-Ampère pour les gaz, les molécules de chlore, d'oxygène et d'hydrogène correspondent à des formules diatomiques (Figure 12).

Registre des modèles : nécessités (Figure 12) :

En repartant des densités de chaque gaz et avec la connaissance de la formule du corps simple, les chimistes peuvent déterminer ainsi les poids atomiques relatifs. Ils peuvent même envisager d'avoir plusieurs corps simples à partir du même élément, ce qui leur permet de proposer une formule chimique pour l'ozone et de ne plus considérer cette espèce chimique comme un isomère du gaz oxygène mais comme une espèce à part entière.

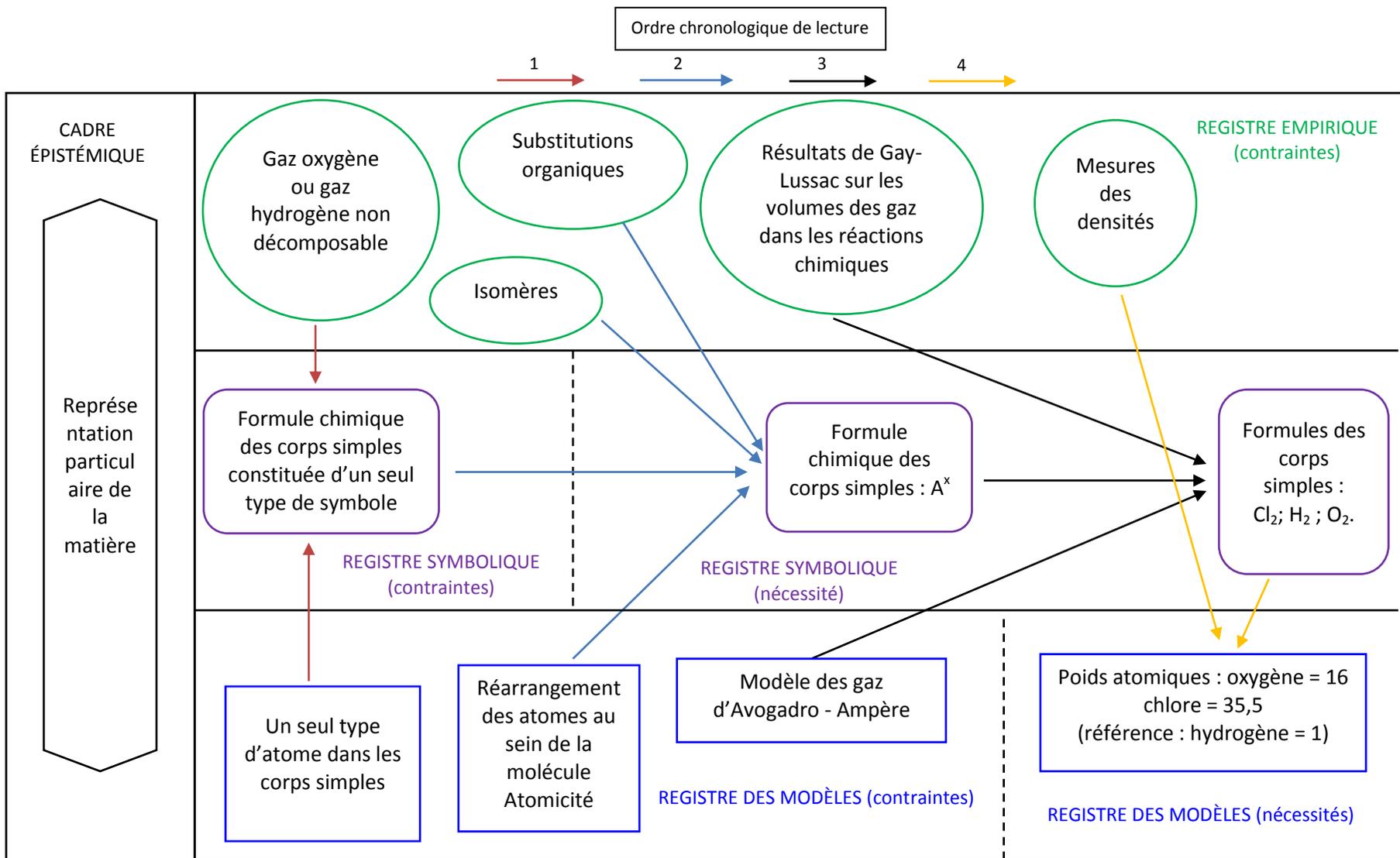


Figure 12 Espace des contraintes et nécessités : formules des corps simples pour les atomistes après le congrès de Karlsruhe

TITRE :

Conception d'une ressource didactique fondée sur l'histoire des sciences pour introduire les formules chimiques au collège

AUTEURS:

Canac Sophie et Kermen Isabelle

RÉSUMÉ :

Cette brochure expose les recherches conduites autour de l'élaboration d'une ressource fondée sur l'histoire des sciences pour l'introduction des formules chimiques au collège en classe de quatrième. Elle présente les documents constituant la ressource pilote et la ressource modifiée après une première expérimentation auprès d'enseignants.

MOTS- CLÉS :

Reconstruction didactique ; controverse historique ; modèles ; réalité ; langage de la chimie.

Éditeur: IREM de Paris

Responsable de la publication: C. Hache

IREM de Paris 7 – Case 7018

Université Paris Diderot

75205 Paris cedex 13

irem_de_paris@univ-paris-diderot.fr

<http://www.irem.univ-paris-diderot.fr/>

Dépôt légal : 2018

ISBN : 978-2-86612-388-8