

RESEARCH OUTPUTS / RÉSULTATS DE RECHERCHE

Vers une nouvelle approche de l'apprentissage de l'équation de réaction

Dehon, Jérémy; Snauwaert, Philippe

Published in:
Journées d'étude S-TEAM

Publication date:
2011

Document Version
Première version, également connu sous le nom de pré-print

[Link to publication](#)

Citation for pulished version (HARVARD):

Dehon, J & Snauwaert, P 2011, Vers une nouvelle approche de l'apprentissage de l'équation de réaction. dans *Journées d'étude S-TEAM*. iufm.ujf-Grenoble.

General rights

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

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

Take down policy

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

Vers une nouvelle approche de l'apprentissage de l'équation de réaction

Jérémy Dehon – Philippe Snauwaert

FUNDP Namur

Unité didactique de la chimie

jdehon@fundp.ac.be – philippe.snauwaert@fundp.ac.be

Mots-clés : Modèles moléculaires, équation de réaction, niveaux de savoir

Résumé

L'apprentissage de l'équation de réaction est un moment important dans l'enseignement de la chimie pour les jeunes de 14 à 15 ans. L'équation de réaction comporte en effet nombre de conventions symboliques utilisées tout au long du cursus en chimie jusqu'aux premières années à l'université. De nombreux élèves éprouvent des difficultés à comprendre ces codes ainsi qu'à les traduire dans une transformation macroscopique plus complexe que les informations contenues dans l'équation de réaction. Afin d'améliorer la compréhension fine de cette symbolique, une approche en deux phases réalisées en parallèle a été développée : une phase diagnostique permettant de cerner les difficultés majeures rencontrées par les élèves dans la compréhension de l'équation de réaction, et une phase pratique consistant au développement, au test et à la mesure de l'impact d'un outil didactique basé sur l'utilisation de modèles moléculaires en aveugle.

Contexte de l'étude, cadre conceptuel et question de recherche

Dans l'enseignement en Belgique francophone, les élèves de troisième année du secondaire (14-15 ans) éprouvent généralement des difficultés à appréhender la réaction chimique et sa modélisation par l'équation de réaction. De nombreuses études démontrent que ces difficultés de compréhension des codes de l'équation de réaction se répercutent ensuite dans tout le reste du secondaire ainsi que dans les premières années universitaires (Barlet et Plouin, 1994 ; Laugier et Dumon, 2004). Il est en effet souvent difficile pour le jeune apprenant d'accepter la réduction de la réalité réactionnelle complexe à une simple équation constituée de quelques lettres et de quelques chiffres. Inversement, les conventions de l'équation de réaction comprises, il est parfois ardu de développer les informations contenues dans l'équation jusqu'à retrouver les caractéristiques de la transformation observée (Savoy et Steeples, 1994 ; Huddle et

Pilary, 1996). Ce va-et-vient entre le monde visible expérimental et le monde construit théorique devenant fréquent à partir de la quatrième année du secondaire, il sera compliqué pour le jeune n'ayant pas saisi toutes les subtilités de l'équation de réaction, en tant que modèle construit mais limité, de comprendre en profondeur des matières plus complexes telles que les différents processus réactionnels impliquant la rupture et la formation de liaisons chimiques. C'est donc au début de l'apprentissage de la chimie, à ce moment décisif où se construit le lien entre l'observable et l'invisible via l'équation de réaction, que des solutions didactiques concrètes doivent être apportées. Bien que ces constats aient été également établis dans de nombreux pays européens, rares sont les études proposant des pistes didactiques testées en classe et confirmées par des mesures solides dans de domaine de la chimie (Sirhan, 2007). Ce projet s'inscrit donc dans une optique de concrétisation d'un outil didactique réalisé, testé et confirmé dans le cadre scolaire.

Avant de préciser notre hypothèse de recherche, il est utile de rappeler le cadre conceptuel dans lequel s'inscrit ce travail, celui des trois niveaux de savoir. En effet, bon nombre de contenus d'enseignement de la chimie, au début du secondaire, peuvent se répartir dans l'un des trois niveaux de savoir suivants : le niveau expérimental, phénoménologique ou macroscopique, le niveau microscopique ou moléculaire et le niveau de l'écriture symbolique (figure 1). Plus particulièrement, les trois niveaux coexistent intimement dans l'étude des structures moléculaires et des transformations, et ce afin d'assurer une communication efficiente entre chimistes. Chaque niveau de savoir possède ses caractéristiques propres. Tout d'abord, le niveau macroscopique est associé à l'expérimentation et recouvre ce que l'on peut appeler le monde « perceptible ». À ce niveau, il est possible d'effectuer des descriptions qualitatives et quantitatives sur base d'observations, et de préciser des changements de propriétés chez les composés chimiques de début et de fin de réaction. Ce niveau, aussi appelé phénoménologique, constitue donc la première étape d'approche de la chimie : l'observable par l'expérience (Houart, 2009). Les deux autres niveaux appartiennent pour leur part à ce que l'on peut appeler le monde « construit » et s'inscrivent de ce fait dans le domaine de la modélisation. Les molécules et atomes étant invisibles à l'œil nu, il est nécessaire de proposer des représentations susceptibles d'expliquer au mieux les observations macroscopiques et capables d'être comprises par la communauté scientifique. Si le niveau microscopique est caractérisé par le recours à la représentation iconique des molécules, atomes et ions via des modèles divers (modèles grossissant à trois dimensions, dessins, animations...), le niveau symbolique se base quant à lui

sur un véritable langage chimique et mathématique dont les principaux représentants sont les symboles atomiques et l'équation de réaction (Houart, 2009). Ces représentations, bien que porteuses d'informations, ont par définition un champ de validité limité, qu'il est important d'explicitier en des termes intelligibles pour l'apprenant.

< Insérer la figure 1 environ ici >

Figure 1: Modèle des trois niveaux de savoir de la chimie, de leurs modes de représentation et de leurs connexions

La distinction entre les niveaux de savoir en chimie offre ainsi un véritable outil à la didactique de la chimie. Comme dans quelques études précédentes se basant sur un cadre théorique comparable (Larcher, Chomat et Lineatte, 1994 ; Le Maréchal et Bécu-Robinault, 2006 ; Davidowitz et Chittleborough, 2009), nous avons émis les hypothèses suivantes :

- Les concepts chimiques prennent d'autant plus de sens pour les étudiants s'ils sont inclus dans une circulation entre les niveaux de savoir ;
- Les concepts sont d'autant plus opérationnels s'ils sont mis en œuvre par les étudiants dans les niveaux macroscopique, microscopique et symbolique.

En conséquence, l'établissement de liens entre les trois niveaux de savoir constituerait une démarche favorable à une compréhension en profondeur des concepts de base en chimie. Nous

nous proposons de vérifier ces hypothèses dans le cadre de l'apprentissage de l'équation de réaction en troisième année du secondaire.

En effet, au début de l'apprentissage de la chimie, le passage de la démonstration expérimentale (niveau macroscopique) à l'équation de réaction constituée de formules brutes (niveau symbolique) se fait généralement sans construction personnelle de l'élève et sans passer par des modèles moléculaires ou atomiques (niveau microscopique). Bien entendu, certains professeurs ont déjà introduit un début d'utilisation de modèles moléculaires (essentiellement des dessins selon le modèle en boules) mais l'immense majorité des enseignants de chimie n'y ont pas recours, confortés par le contenu des manuels scolaires qui ne prônent pas une telle approche (Pirson et al., 2002). Afin d'assurer la construction progressive de l'équation de réaction et l'approche de la symbolique associée par l'élève lui-même, nous proposons un outil didactique basé sur l'utilisation de modèles moléculaires « en aveugle » pour installer les symboles et conventions à la base de la structure de toute équation de réaction. En construisant son savoir par lui-même via ses sens (ici, le toucher) sur base des informations qu'il tire de la démonstration expérimentale, des modèles moléculaires proposés et des indications judicieuses du professeur, l'élève n'est plus ce vase vide que le professeur remplit de concepts sans apport actif. Cette démarche est encouragée dans la plupart des livres de didactique des sciences (Astolfi et al., 2008) et s'inscrit résolument dans une pédagogie par compétences ayant pour but de donner du sens aux apprentissages. Plus généralement, notre recherche s'inscrit dans la démarche européenne d'investigation dans l'enseignement des sciences qui, entre autres buts, poursuit l'objectif suivant : rompre avec le modèle de l'élève comme sujet apprenant et le remplacer par un modèle dans lequel l'élève est l'auteur agissant de ses propres apprentissages (Lebeaume, 2009 ; Grangeat, 2011). En outre, la séquence proposée engage l'élève dans l'intensification de l'argumentation de ses choix et de l'explicitation des buts et des savoirs acquis, qui constituent deux axes structurant les démarches d'investigation (Grangeat, 2011).

La simplicité de la méthode garantit également son aspect universel et son application dans toutes les écoles, quels que soient leurs moyens financiers. Les atomes et molécules demeurant invisibles aux yeux des élèves, il est nécessaire de passer par une étape intermédiaire entre la réalité macroscopique expérimentale et la dimension symbolique. L'utilisation de modèles moléculaires « en aveugle » afin de caractériser les atomes et molécules impliquées, et donc d'explorer la dimension microscopique des réactions chimiques, pourrait constituer de ce

fait une aide substantielle à une compréhension plus fine de la réaction chimique et de l'équation correspondante. En outre, le passage direct de la réaction chimique à l'équation symbolique vide aussi la réaction de sa dimension mécanistique. Il est en effet important que l'élève ne perde pas de vue que la réaction chimique comprend la rupture de liaisons dans les molécules de départ et la formation de liaisons dans les molécules finales. L'utilisation des modèles moléculaires « en aveugle » constitués de sphères reliées entre elles (pour les corps purs simples et composés) et de sphères isolées (pour les corps purs élémentaires) induit et souligne cette réalité mécanistique.

Méthodologie

Notre méthodologie comprend deux phases menées en parallèle : une phase diagnostique et une phase pratique. La phase diagnostique consiste en une évaluation de la compréhension de la symbolique de l'équation de réaction par des élèves à différents stades de l'apprentissage de la chimie. Le premier test a été soumis à une centaine d'élèves de cinquième année du secondaire, en options scientifiques ou non, et les premiers résultats de l'analyse de ces tests sont présentés dans la troisième partie de cette communication. À l'avenir, ce même type de test sera, à nouveau, proposé à des élèves du secondaire à différents moments de leur cursus scolaire et présenté à des étudiants en régendaat de chimie de trois Hautes Écoles différentes ainsi qu'à leurs professeurs afin de comprendre au mieux les pratiques des enseignants du supérieur et leurs influences sur celles des futurs enseignants du secondaire. La phase diagnostique initiale permettra de cerner les problèmes majeurs et durables rencontrés par les élèves et étudiants dans la compréhension de la symbolique de l'équation de réaction.

Parallèlement à cette phase diagnostique, nous avons entamé une phase pratique, consistant à proposer, construire, présenter et tester un outil didactique susceptible d'améliorer la compréhension de l'équation de réaction, d'en expliciter les nombreux symboles et de favoriser la circulation entre les trois niveaux de savoir. Notre hypothèse de travail est la suivante : nous pensons que l'utilisation judicieuse de modèles moléculaires statiques et dynamiques permettra une assimilation plus profonde des concepts fondamentaux de la chimie tels que l'équation de réaction, la réaction chimique, la mole et les liaisons chimiques, et ce en intensifiant l'apprentissage au niveau microscopique. En ce sens, une séquence de leçon comprenant trois étapes correspondant aux trois niveaux de savoir a été mise au point dans le

cadre de l'enseignement de l'équation de réaction. Au niveau microscopique, nous avons proposé l'utilisation de modèles moléculaires « en aveugle », respectant ainsi l'invisibilité des molécules au niveau macroscopique.

La séquence de leçon proposée commence par une phase d'action pendant laquelle l'élève est mis au contact de modèles moléculaires. La phase d'action est introduite par la démonstration expérimentale de la combustion du carbone (niveau macroscopique) avec mise en évidence du produit de réaction, le gaz carbonique, au moyen de l'eau de chaux. Les élèves notent leurs observations et une mise en commun est effectuée. Le professeur demande alors aux élèves un moyen de transmettre ces informations à quelqu'un qui n'aurait pas vu l'expérience. Les élèves, aidés par le professeur, conviennent alors de la nécessité d'un langage commun, qui, pour être correct, doit respecter la structure des composés sous leur forme atomique ou moléculaire (niveau microscopique). Dans ce but, le professeur distribue aux élèves, formant des groupes de deux à trois individus, des sacs contenant des modèles en bois des réactifs et produits de la réaction de combustion du carbone. Ici commence l'exploration au niveau microscopique de la réaction chimique. Les molécules ou atomes, réactifs et produits, sont modélisés via des sphères en bois de différentes tailles, sans liaisons apparentes. Ces modèles sont placés dans des sacs opaques fermés, laissant le passage pour une main (figure 2). À l'état initial (réactifs) et final (produits) de la réaction correspond un sac contenant les modèles moléculaires appropriés. L'élève plonge une main dans chaque sac et dessine grossièrement ce qu'il croit toucher. Ainsi, comme les scientifiques, l'élève ne « voit » pas les molécules mais réalise une représentation de la structure des composés au niveau microscopique à l'aide de l'un de ses cinq sens, ici le toucher. À la fin de la phase d'action, l'élève possède donc les observations de l'expérience de combustion (macroscopique) et la structure des composés de départ et d'arrivée (microscopique).

< Insérer la figure 2 environ ici >

Figure 2: Images de l'outil didactique (modèles moléculaires et sacs opaques) dans le cadre de la réaction de combustion du carbone

Suit alors la phase de formulation pendant laquelle l'élève propose une symbolique pour exprimer les caractéristiques des molécules ou atomes qu'il a touchés. Grâce aux indications de son professeur, l'élève associe à chaque sphère un symbole chimique, propose des formules moléculaires, les place sur un axe de temps (avant et après la réaction chimique) et tente enfin d'écrire lui-même l'équation de réaction de combustion. Il est probable que les élèves ne proposent pas la même symbolique, spécialement si la nomenclature n'a pas encore été vue, et utilisent le français pour lier observations macroscopiques et structures microscopiques.

Le traitement de la réaction de combustion du carbone se clôture par une phase de vérification pendant laquelle les élèves discutent de leurs différentes propositions, et, tout en étant soutenus par des guidages à la charge du professeur, s'entendent sur la symbolique conventionnelle. Dans le cas des formules moléculaires du dioxygène et du dioxyde de carbone, le professeur insiste sur la notion d'indice en tant que convention pour exprimer le nombre d'atomes dans une molécule donnée et sur la notion de symbole atomique, lettre ou groupe de lettres représentant un atome donné. Les formules moléculaires déterminées, le professeur

explicite alors les quatre conventions majeures de l'équation de réaction :

- Le temps s'écoule de gauche à droite, les réactifs sont donc notés à gauche et les produits à droite ;
- Si on observe plusieurs réactifs (ou plusieurs produits), ils sont reliés par un signe « + » traduit en français par « et » et indiquant la présence simultanées des réactifs (ou des produits) formant un ensemble ;
- Une flèche de réaction est ajoutée entre réactifs et produits afin de souligner le fait qu'il y a réaction ;
- La loi de Lavoisier, vue précédemment, est vérifiée car on trouve le même nombre de chaque atome de part et d'autre de la flèche de réaction.

À ce stade, l'élève a donc « traduit » les informations collectées en observant l'expérience de combustion du carbone et en touchant les modèles moléculaires, dans un langage symbolique commun à tous les chimistes : celui utilisé dans l'écriture des équations de réaction. En comparant avec les observations, les élèves et le professeur distinguent les informations reprises par l'équation de réaction (réactifs et produits, formules moléculaires, présence d'une réaction chimique) et les informations qu'on ne retrouve pas dans l'équation de réaction (flamme, fumée, mise à feu, cendres, états de la matière, structures moléculaires). Cette explicitation de l'équation de réaction en tant que modèle limité est essentielle à la bonne compréhension de la notion de modèle et à une circulation plus aisée entre les trois niveaux de savoir.

Cette activité est répétée pour la réaction de combustion du magnésium. Les trois phases d'action, de formulation et de vérification sont réalisées plus rapidement, avec dans ce cas la présence de deux atomes de magnésium chez les réactifs et de deux molécules d'oxyde de magnésium chez les produits. Le professeur présente alors le coefficient stœchiométrique en se limitant à sa signification microscopique (nombre de molécules ou d'atomes impliqués dans la réaction chimique). La signification du coefficient stœchiométrique en tant que proportion sera abordée au début de l'apprentissage de la mole, pont entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique. La séquence de leçon se clôt par la réaction d'électrolyse de l'eau, déjà présentée précédemment dans le cadre de la loi des proportions définies de Proust. De nouveau, les trois phases sont réalisées, avec pour seule différence, la présence d'un seul type de molécule chez les réactifs et de deux types de molécules chez les produits. Le professeur peut alors insister sur la signification du signe « + » en tant qu'ensemble des réactifs ou ensemble des

produits. Une phase ultérieure permettra de revenir à la dimension macroscopique expérimentale sur base des informations contenues dans l'équation de réaction en passant par une modélisation des atomes et molécules impliqués dans la réaction. Cette phase de retour à la dimension macroscopique, doublée d'une introduction à la pondération, est en cours d'élaboration. Pour confirmer notre hypothèse de travail, nous allons réaliser trois mesures à court, moyen et long terme. Tout d'abord, un test permettant d'évaluer l'impact direct de l'outil didactique sur la compréhension fine de l'équation de réaction sera soumis aux élèves après la séquence de leçon. Ensuite, un test, centré sur la circulation entre les niveaux de savoir, sera proposé un mois plus tard aux mêmes élèves. Enfin, un test reprenant les conventions de l'équation de réaction et la circulation entre les niveaux symbolique, microscopique et macroscopique sera soumis aux élèves dans le courant de leur quatrième année. Cette séquence de leçon sera présentée et testée en mai 2011 dans une école secondaire auprès de 120 élèves (quatre classes-test et une classe-témoin).

En fonction des résultats de ces mesures, nous adapterons l'outil didactique afin de répondre aux problèmes qui ne manqueront pas d'être soulevés. Il est à noter que l'outil didactique sera présenté prochainement aux futurs professeurs de chimie du secondaire inférieur et soumis à leurs critiques dans le but d'en optimiser les paramètres d'usage ainsi que les discours encadrant sa pratique.

Résultats obtenus et escomptés

Un test, joint en annexe, a été soumis à une centaine d'élèves de cinquième année du secondaire de deux écoles appartenant à deux réseaux différents d'enseignement en Belgique. L'échantillon actuel regroupe 64 élèves de classes scientifiques (sciences générales) et 39 élèves de classes non-scientifiques (sciences de base). Ce test, initialement prévu en fin de la séquence de leçon destinée aux élèves de troisième année du secondaire, est constitué de 8 questions ouvertes portant sur la compréhension de la symbolique utilisée dans une équation de réaction (combustion du sodium par le dioxygène et formation de l'oxyde de sodium). Le fait de sonder des élèves de cinquième année permet de vérifier si la compréhension des différentes symboliques est pérenne deux ans après leur enseignement en troisième année du secondaire. Les premiers résultats du dépouillement ont permis de confirmer les difficultés précédemment soulignées dans d'autres études, et de mettre en évidence quelques priorités d'action.

Les deux premières questions du test portent sur l'identité des réactifs et des produits. 92 % des élèves testés proposent une réponse correcte, identifiant les réactifs à la gauche de la flèche de réaction et les produits à droite de la flèche de réaction. Cette distinction est donc assimilée dans les deux groupes (options scientifiques et options non-scientifiques). Néanmoins, une étude plus approfondie des résultats permet de mettre en évidence deux éléments : la présence du coefficient stœchiométrique dans l'identité des réactifs et des produits, ainsi que l'utilisation limitée de la nomenclature. En effet, une majorité d'élèves des deux groupes introduit le coefficient stœchiométrique (4Na et O_2) dans l'identité des réactifs, traduisant soit une lecture littérale de l'équation de réaction, soit un accent porté sur la proportion entre composés réagissant. Inversement, 34 % des élèves d'options scientifiques n'introduisent pas le coefficient stœchiométrique (Na et O_2) contre 13 % des élèves d'options non-scientifiques. Ce phénomène est observé dans les mêmes proportions pour l'identité des produits. L'identité des réactifs et celle des produits se détacheraient donc des coefficients stœchiométriques par une pratique plus intense de la discipline, même si une majorité le considère comme partie intégrante d'une substance impliquée dans une réaction chimique. Par ailleurs, si aucun des élèves d'options non-scientifiques n'utilisent la nomenclature pour décrire l'identité des réactifs et produits, 20 % des élèves d'options scientifiques répondent en terme de sodium, dioxygène et oxyde de sodium. Cet emploi de la nomenclature par les élèves scientifiques s'explique certainement par une pratique plus fréquente de la nomenclature usuelle, soit via la matière vue, soit via une implication plus forte du professeur dans la connaissance des règles de nomenclature. Il est à noter qu'à aucun moment l'élève ne répond en des termes associés au niveau microscopique (des atomes de sodium, des molécules de dioxygène) ou au niveau macroscopique (un morceau de sodium, un volume de dioxygène). En effet, le terme « sodium » apparaît moins comme une référence à la substance au niveau macroscopique que comme une traduction du symbole Na , l'élève s'inscrivant ainsi toujours dans le niveau symbolique. L'élève semble donc bloqué dans une boucle symbolique dans laquelle l'identité des réactifs et celle des produits se situent entre les registres de langage naturel et de langage symbolique.

La troisième question porte sur la signification du signe « + » dans l'équation de réaction. On observe dans ce cas trois grilles de lecture : le « + » en terme d'addition, le « + » en terme de contact et le « + » en terme de réaction :

- Environ 30 % des élèves des deux groupes considèrent en effet que le « + » signifie « réagit avec ». Cette interprétation est très intéressante en ce qu'elle donne au signe « + » la signification que l'on prête habituellement à la flèche de réaction. Manifestement, la conséquence précède ici la cause, comme si le fait de mettre en contact des substances disparaissait dans l'ombre de la réaction chimique s'en suivant. Cette interprétation se nourrit également de la lecture habituelle d'une équation de réaction en une phrase-type comme « le réactif A réagit avec le réactif B pour former le produit C et le produit D ». Dans ce cas, on remarque que les élèves se retrouveraient alors face à deux interprétations différentes du signe « + » : l'une en terme de réaction entre réactifs (« réagit avec ») et l'autre en terme d'ensemble des produits formés (« et »). Le test proposé ne permet actuellement pas d'explorer plus avant la question.
- Une deuxième grille de lecture du signe « + » consiste à lui assigner un sens d'addition, de somme des réactifs (20 à 30 % des élèves selon les groupes). Cette interprétation s'inscrit dans la conceptualisation de l'équation de réaction en tant qu'équation mathématique répondant à la loi de conservation de masse de Lavoisier. Si cette réponse reste correcte dans le cadre de la loi de Lavoisier et de son application concrète- la pondération des équations chimiques -, il est dangereux de limiter l'équation de réaction, qui constitue avant tout la symbolisation d'une transformation macroscopique, à une simple équation vérifiant des égalités.
- Enfin, une troisième grille de lecture est utilisée par certains élèves : le « + » en tant que contact. L'élève se place ici dans une approche se situant au niveau macroscopique, en utilisant des termes tels que « mis en présence de », « mis en contact de », « accompagné de », « ajouté à », « mélangé à », qui s'inscrivent dans une réalité expérimentale. Cette interprétation est d'ailleurs plus fréquente chez les élèves d'options scientifiques (citée à hauteur de 50 %) que chez les élèves d'options non-scientifiques (35 %). Par ailleurs, les termes « ajouté à » dénoteraient chez l'élève une conceptualisation des réactifs en deux unités distinctes : le patient, substance inerte, et l'agent, substance active (Solomonidou et Stavridou, 1994). Dans tous les cas, le sodium est cité comme patient et le dioxygène comme agent, niant ainsi toutes les propriétés réactionnelles actives du sodium.

Pour conclure, le signe « + » se situe donc au carrefour des conceptions que charrie l'équation de réaction et symbolise, aux yeux des élèves, à la fois le contact entre réactifs, la réaction en elle-même et les égalités qui la régissent.

La quatrième question porte sur le sens donné à la flèche de réaction. Plus de 80 % des élèves répondent correctement en conférant à la flèche le sens de « (les réactifs) réagissent pour donner, pour former (les produits) ». La signification de la flèche est donc largement assimilée, même s'il est à noter que 10 % des élèves, majoritairement d'options non-scientifiques, voient dans la flèche de réaction une indication de lieu ! En effet, à leurs yeux, la flèche « *montre les produits* », « *indique le résultat de la réaction* ». Cette réponse, bien que minoritaire, reflète les dangers d'une explicitation insuffisante d'un symbole polysémique. Notons aussi que seuls quatre élèves ont confondu la flèche de réaction et le signe égal, indiquant que ce n'est pas au niveau de la flèche de réaction mais bien au niveau des coefficients et indices que la confusion entre équation de réaction et équation mathématique émerge.

La cinquième question porte sur le sens donné au coefficient stœchiométrique. Comme le signe « + », le coefficient stœchiométrique se situe au carrefour des trois niveaux de savoir. Il est en effet un chiffre dans une équation symbolique mais peut aussi signifier une quantité réelle au niveau microscopique (abordé en troisième année du secondaire dans le cadre de l'équation de réaction) ou constituer encore une relation de proportionnalité au niveau macroscopique (abordé en quatrième année du secondaire via la séquence consacrée à la mole). On observe ainsi deux types de réponses associées plus particulièrement aux niveaux de savoir microscopique et macroscopique, correspondant au niveau des connaissances normalement acquises par des élèves de cinquième année :

- D'abord, 20 % du total des élèves (33 % des élèves d'options scientifiques) répondent que le coefficient stœchiométrique indique le nombre de moles du composé, s'inscrivant ainsi dans le niveau macroscopique.
- Par contre, 85 % des élèves d'options non-scientifiques et 45 % des élèves d'options scientifiques répondent que le coefficient stœchiométrique nous informe sur le nombre d'atomes ou le nombre de molécules, au niveau microscopique.

De manière assez surprenante, la moitié de ces élèves, et ce dans les deux groupes, considère l'atome de Na comme une molécule ! Cette distinction entre atome et molécule, pourtant opérée en 3^{ème} année, est peu effective dans l'enseignement secondaire, la confusion se retrouvant même chez les étudiants dans les premières années universitaires. Bien qu'il n'y ait pas de cours de chimie avant la troisième année du secondaire, le programme de sciences demande d'aborder l'étude et les propriétés des états de la matière. Le concept de molécules est défini et est, surtout, représenté par des formes géométriques (cercle, triangle, carré...) dans les modèles de la matière. Cette modélisation semble induire des préconceptions tenaces dans l'appropriation ultérieure de la distinction entre atome et molécule. Notons enfin que 10 % des élèves voient dans le coefficient stœchiométrique un « *chiffre pour pondérer l'équation* », réduisant le coefficient à la solution d'un exercice mathématique de pondération.

La sixième question porte sur le sens donné à l'indice. Moins associé à l'équation de réaction qu'à la nomenclature, l'indice est globalement bien assimilé par les élèves des deux groupes comme le nombre d'atomes dans une molécule (plus de 80 %) même si la confusion entre atome et molécule reste présente. 25 % des élèves citent aussi l'indice comme étant lié aux valences de l'oxygène et du sodium, se rappelant ainsi de la technique du chiasme permettant de former les formules moléculaires à partir des valences des atomes.

La septième question porte sur le sens donné aux signes (s) et (g). 95 % des élèves répondent correctement en citant les termes « solide » et « gazeux ». Le terme « état » n'est portant cité que dans 35 % des réponses, soulignant ainsi la frilosité des élèves à trancher entre plusieurs termes proches. Ainsi, les termes « forme », « milieu », « nature » sont également cités à la place du terme « état ». Il est à noter aussi que l'introduction de ces signes, associés au niveau macroscopique, dans une équation de réaction lue au niveau microscopique, induit des conceptions erronées telles que « l'atome est gazeux ».

La huitième et dernière question porte sur la compréhension du processus réactionnel. Souvent, l'élève se sent incapable de décrire le processus réactionnel comme le rapportent Laugier et Dumon (2000) : « *on nous demande de raconter ce qui se passe, mais on ne voit pas ce qui se passe. On voit des couleurs, on sent, mais on ne voit rien... Moi, je vois le début, je vois la fin mais je ne vois pas le milieu* ». En effet, les multiples forces régissant le processus d'une réaction chimique dépassent la compréhension globale de l'élève à ce stade de son apprentissage

et il est donc normal de rencontrer une grande diversité de réponses, à la mesure de la complexité variable du réseau de connaissances construit par l'élève. D'une part, 20 % des élèves ne répondent tout simplement pas à la question, se sentant incapables de fournir quelques informations pertinentes. D'autre part, 35 % des élèves considèrent que la réaction chimique est le siège d'une transformation, d'un réassemblage, d'un changement de structure. Cette réponse est correcte mais reste délibérément vague, l'élève ne précisant pas ce qui change concrètement chez les réactifs. Enfin, seuls 15 % des élèves scientifiques font références à la rupture de liaisons chez les réactifs et éventuellement à la formation de nouvelles liaisons chez les produits. Les liaisons chimiques étant abordées en quatrième année d'un point de vue majoritairement statique, les élèves n'ont donc pas, en grande majorité, effectué de lien entre les liaisons chimiques et la réaction chimique. Ce point essentiel sera exploré à l'avenir dans le cadre de nos recherches.

Ces premiers résultats confirment le diagnostic émis par de nombreuses études et précisent les points d'achoppement entre les différents niveaux de savoir. Il serait donc utile d'explicitier les symboles utilisés dans l'équation de réaction afin d'améliorer la distinction entre atome et molécule, ou encore dans le but de distinguer plus clairement l'aspect mathématique de l'équation de réaction de son aspect purement chimique. Dans ce cadre, la place du coefficient stœchiométrique (et de l'équation de réaction en général) est centrale en ce qu'il se situe au carrefour des trois niveaux de savoir. C'est pour cette raison que, afin d'améliorer la circulation entre les trois niveaux de savoir et répondre ainsi aux problèmes liés à l'équation de réaction, nous proposons d'utiliser des modèles moléculaires dès la troisième année du secondaire au début de l'apprentissage de l'équation de réaction. La technique des modèles « en aveugle », explicitée ci-avant, constitue une première démarche expérimentale et sera testée dans le courant du mois de mai 2011 sur une centaine d'élèves. Nous espérons que la mesure en trois temps (court, moyen et long terme) confirmera notre hypothèse de travail et permettra une optimisation de notre outil didactique. Deux nouveaux défis seront alors à relever : renforcer le lien entre microscopique et macroscopique dans l'enseignement de la mole, et clarifier le concept de réaction chimique via des modèles moléculaires dynamiques centrés sur les liaisons chimiques.

Encart pratique

La séquence de leçon comprenant l'outil didactique se divise en trois phases :

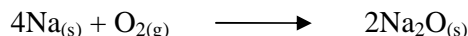
- La phase d'action : elle débute par l'expérience de combustion ou d'électrolyse, les élèves notent leurs observations, et le professeur effectue une mise en commun. Le professeur distribue alors l'outil didactique (des sacs opaques contenant des modèles moléculaires en bois), les élèves plongent la main dans les sacs, touchent les modèles et dessinent une représentation des molécules et atomes.
- La phase de formulation : les élèves proposent une symbolique pour rendre compte de leurs observations et des structures des composés.
- La phase de vérification : Après une mise en commun, le professeur indique aux élèves la symbolique choisie par les chimistes. Il explicite en profondeur les conventions : position des réactifs et produits, le signe « + », la flèche de réaction, le coefficient stœchiométrique.

La séquence est appliquée à trois réactions différentes de complexité croissante.

Annexe

Test soumis aux élèves de cinquième secondaire :

Pendant le cours, nous avons observé les réactions de combustion du carbone et du magnésium et nous les avons modélisées par une équation de réaction. Le sodium Na réalise aussi une réaction de combustion en présence de dioxygène O₂. Cette réaction est modélisée selon l'équation de réaction suivante :



- Quels sont les réactifs ?
- Quels sont les produits ?
- Que signifie le « + » à gauche de la flèche ?
- Que signifie la flèche de réaction ?
- Que signifie le chiffre 4 devant le symbole Na ?
- Que signifie le chiffre 2 dans Na₂O ?
- Pourquoi écrit-on les symboles (s) et (g) dans cette réaction ?
- Selon toi, que se passe-t-il chez les réactifs pendant la réaction chimique ?

Références

Astolfi, J-P., Darot, E., Ginsburger-Vogel, Y. & Toussaint, J. (2008). *Mots-clés de la didactique des sciences – Repères, définitions, bibliographies*. Paris : De Boeck.

Barlet, R. & Plouin, D. (1994). L'équation-bilan en chimie. Un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, 18, 27-55.

Davidowitz, B. & Chittleborough, G. (2009). Linking the macroscopic and sub-microscopic levels : diagrams, dans Gilbert, John and Treagust, David (dir.), *Multiple representations in chemical education* (p.169-191). Dordrecht : Springer.

Grangeat, M. (2011) (Dir.). *Les démarches d'investigation dans l'enseignement scientifique Pratiques de classe, travail collectif enseignant, acquisitions des élèves*. Lyon : Ecole Normale Supérieure.

Grangeat, M. (2011, mai). *Méthodologie de recherche à propos de l'enseignement des sciences*. Conférence présentée aux deuxièmes journées d'études S-TEAM, Grenoble. Repéré à <http://iufm.ujf-grenoble.fr/index.php/component/content/article/294-deuxiemes-journees-detude-s-team.html?start=4>.

Houart, M. (2009). *Etude de la communication pédagogique à l'université à travers les notes et les acquis des étudiants à l'issue du cours magistral* (mémoire de thèse). Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix : Namur.

Huddle, P.A. & Pillay, A.E. (1996). An in-depth study of misconceptions in stoichiometry and chemical equilibrium at a South Africa university. *Journal of Research in Science Teaching*, 33, 65-77.

Larcher, C., Chomat, A. & Lineatte, C. (1994). D'une représentation à une autre pour modéliser les transformations de la matière au collège. *Aster*, 18, 119-139.

Laugier, A. & Dumon, A. (2000). Travaux pratiques en chimie et représentation de la réaction chimique par l'équation-bilan dans les registres macroscopique et microscopiques : une étude en classe de seconde (15-16 ans). *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, 1, 61-75.

Laugier, A. & Dumon, A. (2004). L'équation de réaction : un nœud d'obstacles difficilement franchissable. *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, 5, 51-68.

Lebeaume, J. (2009, octobre). *L'investigation pour l'enseignement des sciences, actualité des enjeux*. Conférence présentée aux premières journées d'études S-TEAM, Grenoble. Repéré à <http://iufm.ujf-grenoble.fr/index.php/component/content/article/188.html?start=5>.

Le Maréchal, J. F. & Bécu-Robinault, K. (2006). La simulation en chimie au sein du projet Microméga. *Aster*, 43, 81-108.

Pirson, P., Bordet H., Castin D. & Van Elsuwe, R. (2002). *Chimie 3^e/4^e, Sciences 1^{er} et 2^e niveau*. Bruxelles : De Boeck.

Savoy, L.G. & Steeples, B. (1994). Concept hierarchies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, 75, 97-103.

Sirhan, G. (2007). Learning difficulties in chemistry: an overview. *Journal of Turkish Science Education*, 4, 2-20.

Solomonidou, C. & Stavridou, H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, 18, 75-95.

Présentation des auteurs

Jérémy Dehon – Auteur principal

Assistant-chercheur

Unité didactique de la chimie – Département de chimie

Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur (FUNDP)

61, rue de Bruxelles B-5000 Namur (Belgique)

0032(0)81724525 – jdehon@fundp.ac.be

Licencié en sciences chimiques aux FUNDP Namur en 2004 et agrégé de l'enseignement secondaire supérieur (AESS) à l'Université Libre de Bruxelles (ULB) en 2005 où il a effectué du tutorat pour étudiants en difficulté, Jérémy Dehon a exercé pendant 5 ans le métier de professeur de chimie et biologie dans l'enseignement secondaire auprès d'écoles en discrimination positive (équivalent des ZEP en France) de la région bruxelloise. En parallèle à ses charges dans le secondaire, il a assumé les cours préparatoires de chimie à l'université ainsi que des charges de collaborateur didactique en faculté des sciences appliquées à l'ULB. Depuis septembre 2010, Jérémy Dehon occupe un poste d'assistant-chercheur à mi-temps aux FUNDP Namur et a entrepris une thèse en didactique de la chimie. Il a conservé un mi-temps de professeur dans l'enseignement secondaire à l'Athénée Royal de Rixensart.

Philippe Snauwaert

Professeur

Unité didactique - Département de chimie,

CEFOSCIM

Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix Namur (FUNDP)

61, rue de Bruxelles B-5000 Namur (Belgique)

0032(0)81724533 - philippe.snauwaert@fundp.ac.be

Docteur en sciences chimiques en 1992 et agrégé de l'enseignement secondaire supérieur (AESS) aux FUNDP Namur 1996, Philippe Snauwaert a exercé pendant 10 ans le métier de professeur de chimie dans l'enseignement secondaire à l'Institut Saint-Joseph de Charleroi. Chargé de cours en chimie dans la formation initiale des futurs enseignants à l'ENS-HELHa

Loverval et aux FUNDP Namur, il est engagé comme professeur, en 2007, aux FUNDP pour assurer les cours de chimie générale en BAC1 (équivalent licence 1 en France) et les cours de didactique et d'épistémologie de la chimie en masters à finalité didactique et en AESS. Il crée et dirige un centre de formation continuée en sciences et mathématiques (CEFOSCIM) aux FUNDP. Depuis 2010, il dirige également l'unité didactique au sein du département de chimie.