

Comment le caractère dual, macroscopique-microscopique, de la chimie s'incarne-t-il dans son enseignement ?

Cet article* propose quelques réflexions sur l'enseignement des bases de la chimie. Il met en lumière les difficultés induites par une approche rigoureuse au collège conjuguant la distinction entre transformation chimique et réaction chimique, concepts macroscopiques, et leur interprétation avec un modèle microscopique de la matière. Les résultats d'une enquête récente sur la perception par les élèves du caractère dual des noms et formules chimiques montrent que l'enseignement actuel ne favorise guère la reconnaissance de cette dualité macroscopique-microscopique.

Une caractéristique de la chimie : la dualité macroscopique-microscopique

La chimie regorge de concepts macroscopiques et microscopiques⁽¹⁾. Dans un article visant à préciser les spécificités épistémologiques et didactiques de la chimie, science et discipline universitaire (ou scolaire), Roger Barlet précise que « *Le chimiste doit posséder la double culture du microscopique et du macroscopique* » et que « *La dualité microscopique-macroscopique constitue l'une des difficultés didactiques majeures de [l'enseignement de] la chimie.* » « *Le passage de cette modélisation microscopique à la réalité macroscopique caractérise fortement l'épistémologie de la chimie* » [1]. Le sens de ces propos est clair ; il reprend d'ailleurs ce qu'il a écrit par ailleurs [2] : le macroscopique est observable, tangible, et résulte de ce qui se passe au niveau microscopique inaccessible, qui est modélisable, alors que la réalité macroscopique ne semble pas l'être.

Transformations chimiques et dualité macroscopique-microscopique

Les transformations de la matière

Si l'on considère que la chimie est la science des transformations de la matière, faire comprendre la distinction entre transformations chimiques et transformations physiques (changements d'état physique, réalisations de mélange) est primordial. Toute la difficulté de l'enseignement des bases de la chimie consiste à faire acquérir ces concepts qui se construisent en parallèle avec celui de substance (ou corps pur, ou espèce chimique – on trouve d'ailleurs les trois termes dans le programme de collège). Des études ont montré que si le concept de substance n'est pas construit, celui de transformation chimique ne l'est pas correctement [3-5], et qu'une caractérisation macroscopique des substances (par exemple : température de changement d'état, couleur) ne permet pas aux élèves de reconnaître un changement de substance ; ce changement est cependant reconnu en utilisant un modèle particulaire [3-4]. Et quel concept compliqué que celui de substance, puisqu'une substance se caractérise par ses propriétés chimiques invariantes, donc ses relations à d'autres substances, et ses propriétés physiques, dont certaines varient selon l'état physique de la substance (masse volumique par

exemple). Un modèle particulaire permet de définir une substance comme un ensemble considérable d'entités identiques en mouvement continu plus ou moins prononcé selon l'état physique. Cependant, commencer à faire modéliser les élèves avec des objets qu'ils ne peuvent percevoir présente des difficultés qui ont été signalées [6] ; il paraît alors préférable d'avoir abordé la notion de modèle avec les élèves avant d'envisager la modélisation de la matière et de ses transformations.

Les transformations chimiques : une description macroscopique

L'utilisation du concept de transformation chimique introduit une étape dans la construction des savoirs ; il s'agit de s'attarder sur le repérage des changements de substance avant de passer à la modélisation et à son résultat : la réaction chimique. D'une description en termes d'objets et d'événements (par exemple : au départ le liquide est incolore et le solide est rose-rouge, à la fin le liquide est bleu et on voit un solide gris-blanc fait de petites aiguilles), il faut passer à une description en termes d'espèces chimiques qui seule permet de dire s'il y a transformation chimique ou pas. Pour l'exemple qui vient d'être évoqué, une description chimique mentionnera, pour l'état initial du système, les espèces constituant une solution aqueuse de nitrate d'argent et du cuivre solide. La première description est faite dans la réalité expérimentale telle qu'un observateur la perçoit (la réalité perçue) ; la seconde, le recensement des espèces chimiques, dans une réalité idéalisée, que l'observateur construit avec des savoirs succincts (nom, état physique, couleur) sur les espèces chimiques. La figure 1 donne un exemple de deux transformations chimiques (considérées comme totales) pour des systèmes ayant une composition qualitative initiale identique, mais une composition finale différente, le réactif limitant n'étant pas le même.

Modélisation d'une famille de transformations chimiques

En continuant avec l'exemple des transformations chimiques mettant en jeu une solution aqueuse de nitrate d'argent et du cuivre solide, on peut faire varier les proportions, masse du solide et volume de la solution de concentration variée, de façon très importante, de sorte qu'on se trouve face à une véritable famille de transformations chimiques⁽²⁾. Elles sont différentes quant aux quantités mises en jeu, mais elles ont une caractéristique commune : elles donnent toutes lieu à la formation des mêmes espèces chimiques et dans un rapport qui est toujours le même. Elles sont modélisées par la même réaction chimique qu'on énonce très rarement, et dont on donne la représentation symbolique $\text{Cu}_{(s)} + 2 \text{Ag}^+_{(aq)} \rightarrow \text{Cu}^{2+}_{(aq)} + 2 \text{Ag}_{(s)}$. Cette réaction chimique a un domaine de validité limité aux mélanges de solution aqueuse de nitrate d'argent et de cuivre solide.

Transformation chimique : interprétation microscopique

Le passage de la réalité perçue à la réalité idéalisée nécessite un apprentissage qui se réalise à moyen terme. En effet, cela

peut aller de pair avec la construction d'une carte d'identité des espèces chimiques, à élaborer au long de la scolarité à partir d'activités expérimentales pour que les élèves aient un vécu empirique auquel se raccrocher. Cependant, la notion de substance se construit aussi avec l'introduction d'un modèle particulière élémentaire qui a déjà permis d'interpréter les changements d'état physique au collège [7] et qui donne une définition d'une substance comme constituée d'un nombre gigantesque de molécules ou d'atomes ou d'unités anions-cations, particules dont on n'envisage pas qu'elles puissent se couper. Le programme actuel de collège propose d'interpréter les transformations chimiques « comme une redistribution d'atomes ». Il s'agit donc d'accoler au modèle macroscopique qu'est la réaction chimique, un modèle microscopique de la matière constitué de particules sécables (figure 2) pour interpréter le modèle macroscopique⁽³⁾ et pour interpréter la situation expérimentale dans la réalité idéalisée. La modification du modèle est une conséquence du changement de champ expérimental auquel on s'intéresse [7]. Un modèle est valide pour un champ expérimental délimité.

Les difficultés d'un double regard macroscopique-microscopique au collège

Il est difficile, pour ne pas dire impossible, de ne pas faire une « lecture microscopique » de l'équation de réaction au collège. En effet, quelle signification donner aux nombres stœchiométriques dans la mesure où le concept de quantité de matière

n'est pas vu ? On ne peut pas dire que l'équation a la signification suivante : lorsque le cuivre réagit avec les ions argent, la quantité de cuivre consommée est toujours égale à la moitié de la quantité d'ions argent consommée, et la quantité d'ions cuivre formée est toujours égale à la moitié de la quantité d'argent formée, qui est elle-même égale à la quantité d'ions argent ayant réagi. Le terme quantité désigne ici la quantité de matière ; il ne peut s'agir des masses. Si on restreint le champ des transformations chimiques étudiées à celles mettant en jeu des gaz, alors il devient possible de parler des nombres stœchiométriques en termes de volumes. Par exemple, un volume de gaz dihydrogène réagit avec un volume égal de gaz dichlore et forme un volume de gaz chlorure d'hydrogène égal au double de chacun des volumes des réactifs.

L'un des attendus du programme est la conservation de la masse lors d'une transformation chimique, l'équation de réaction étant fournie. Quel lien peut-il être fait entre les nombres stœchiométriques de l'équation et les masses ? Aucun puisque les masses molaires et les quantités de matière ne sont pas connues des élèves. Le seul savoir qu'on puisse attendre est que la somme des masses des espèces consommées est égale à la somme des masses des espèces formées. Il est vraisemblable qu'il perdure dans les programmes pour son caractère historique, mais en quoi aide-t-il à la compréhension de l'équation de réaction ? À moins de le « transposer » au niveau atomico-moléculaire et de s'intéresser à la masse des entités en jeu.

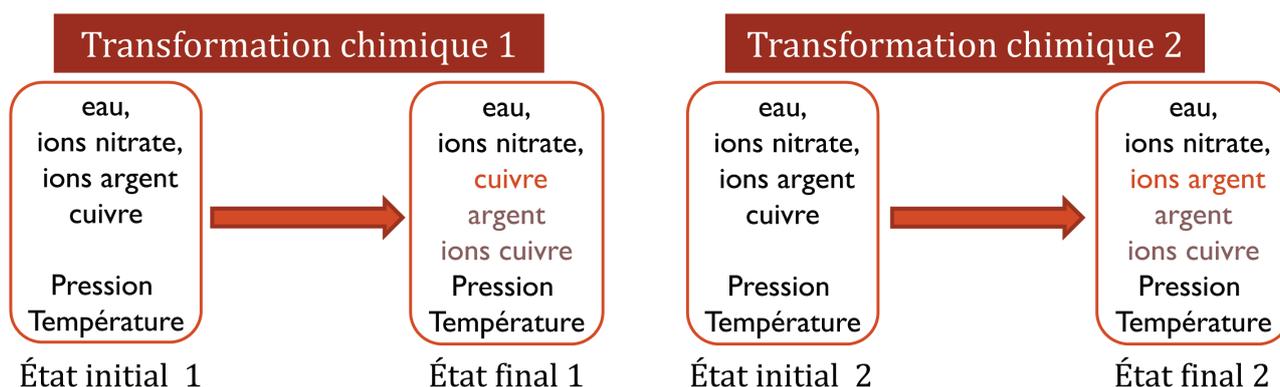


Figure 1 - Deux transformations chimiques mettant en jeu les mêmes espèces initialement, mais conduisant à un résultat final différent (schémas à construire en classe).

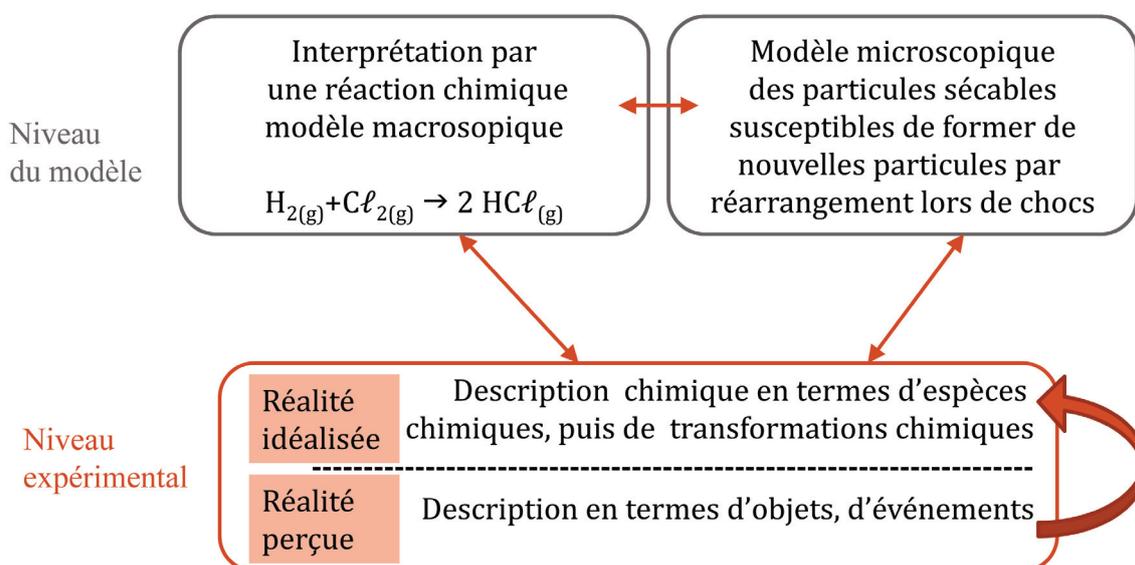


Figure 2 - Articulation des différents niveaux de savoirs : modèle macroscopique, modèle microscopique et niveau expérimental.

Tableau I - Pourcentage de réponses correctes par niveau scolaire pour chaque nom sur l'ensemble des critères (corps pur, mélange, molécule, atome) (N : nombre d'élèves interrogés).

	Collège (N = 233)	Seconde (N = 178)	Première et terminale (N = 147)	Licence 1 (N = 45)
Carbone	9 %	21 %	22 %	40 %
Eau	8 %	19 %	16 %	18 %
Dioxygène	11 %	8 %	14 %	33 %
Dioxyde de carbone	4 %	3 %	5 %	7 %
Méthane	3 %	2 %	7 %	11 %
Cyclohexane	3 %	2 %	4 %	9 %

Plusieurs questions se posent alors :

- Faut-il continuer ainsi et laisser l'interprétation microscopique de la réaction chimique s'imposer au collège alors même qu'il s'agit d'un concept macroscopique ?
- Faut-il interpréter les transformations chimiques au collège en termes de réaction chimique et écrire l'équation de réaction (ou la donner) ?
- Peut-on se contenter d'une interprétation microscopique des transformations chimiques, définies comme des changements de substance, interprétés au niveau particulaire, et ne pas introduire la réaction chimique, modèle d'une famille de transformations ?

Le caractère dual de la chimie s'incarne aussi dans le langage

La dualité macroscopique-microscopique de la chimie s'exprime à travers les modèles dont elle est constituée, mais aussi à travers la dénomination et la désignation des concepts qui appartiennent à ces modèles. Selon le contexte, un nom tel que dioxyde de carbone peut désigner le gaz ou la molécule, tout comme la formule ; une même représentation désigne donc deux concepts différents : la substance ou la molécule.

Que sait-on des acquis des élèves ?

Une recherche récente a déterminé quelle(s) signification(s) les élèves assignent aux noms et aux formules chimiques (formules brutes) [9-10]. Plusieurs noms (dioxygène, eau, cyclohexane, méthane, carbone, dioxyde de carbone) et formules simples (O_2 , H_2O , C, CO_2 , C_2H_6O , Fe) leur ont été proposés et pour chacun il fallait choisir⁽⁴⁾ parmi quatre réponses : corps pur, mélange, molécule et atome. Les résultats sont portés dans les *tableaux I et II*. Les réponses correctes sont peu nombreuses et n'augmentent pas de façon significative avec le niveau d'étude.

Par exemple, moins d'un quart des élèves de première et terminale scientifiques interrogés répond correctement pour toutes les formules ou pour tous les noms proposés. Une analyse fine montre que la vision microscopique des formules et des noms augmente avec le niveau d'étude (plus le niveau d'étude augmente, plus un critère microscopique est choisi alors qu'un critère macroscopique l'est moins). Cette difficulté à associer deux concepts (l'espèce et l'entité) à une formule brute avait déjà été repérée à l'étranger [11-12]. Par contre, qu'elle apparaisse aussi pour les noms constitue un résultat nouveau qui montre que le caractère dual du langage

Tableau II - Pourcentage de réponses correctes par niveau scolaire pour chaque formule sur l'ensemble des critères (corps pur, mélange, molécule, atome) (N : nombre d'élèves interrogés).

	Collège (N = 233)	Seconde (N = 178)	Première et terminale (N = 147)	Licence 1 (N = 45)
C_2H_6O	2 %	2 %	4 %	7 %
CO_2	5 %	3 %	6 %	4 %
H_2O	6 %	8 %	12 %	16 %
O_2	15 %	15 %	16 %	33 %
Fe	7 %	25 %	22 %	36 %
C	13 %	29 %	22 %	49 %

symbolique (nom et formule) n'est pas spontanément reconnu par les élèves en fin de cursus scientifique. Autant ces difficultés peuvent se concevoir en début d'apprentissage, au collège, autant elles étonnent au lycée. Ces résultats tendent à faire penser que l'enseignement actuel ne permet pas de mobiliser spontanément un double regard macroscopique-microscopique au vu d'une formule brute ou d'un nom, et qu'il en favorise une vision microscopique.

Certaines expressions malheureuses (molécules colorées, synthèse d'une molécule) qu'on peut trouver dans le libellé du programme de première ou de terminale scientifique vont dans le sens d'un accent (involontaire) mis sur une vision microscopique. Ces expressions peuvent peut-être correspondre à des expressions entendues, mais les écrire néglige les difficultés que les élèves éprouvent en phase d'apprentissage à distinguer ce qui relève du macroscopique et ce qui relève du microscopique [13-14]. Pour la matière colorée, il s'agit d'expliquer les propriétés de la matière (macroscopique) par sa structure microscopique, ce qu'on désigne souvent par l'expression « relation structure-propriétés ». L'enjeu de la relation structure-propriétés est de faire comprendre que les propriétés des entités du niveau moléculaire ne sont pas celles des objets du niveau macroscopique, mais qu'elles permettent l'explication de propriétés des substances par la structure des entités du niveau atomico-moléculaire ou par les interactions de celles-ci entre elles ou avec d'autres objets du niveau microscopique (par exemple les photons). Lors de la synthèse d'une substance, pour apprécier qualitativement le degré de pureté de ce que l'on obtient, l'échantillon de matière⁽⁵⁾, on mesure une température d'ébullition, ou une température de fusion, ou encore un indice de réfraction, qui sont toutes des grandeurs macroscopiques qui n'ont aucune signification pour une molécule.

Renoncer provisoirement, rectifier plus tard

Aux réflexions présentées qui se sont orientées autour de la place des modèles, du langage et de la dualité macroscopique-microscopique dans l'enseignement des bases de la chimie, il convient d'ajouter que l'apprentissage des élèves s'effectue petit à petit. Il est peut-être parfois nécessaire de renoncer provisoirement à une présentation totalement satisfaisante du savoir (réaction chimique modèle macroscopique au collège), quitte à le rectifier plus tard, mais il est souhaitable de ne pas favoriser des amalgames (confusion macroscopique-microscopique) qui risquent de retarder des clarifications ultérieures.

* Cet article est adapté de la publication de l'auteur parue dans le 1 000^e numéro du *Bup* (janvier 2018, p. 95), avec l'aimable autorisation de la Rédaction.

Notes et références

- (1) Le terme submicroscopique serait préférable puisqu'il s'agit de l'échelle atomico-moléculaire. Ce texte se conforme à l'usage qui prévaut dans l'enseignement de la physique-chimie et qui ne correspond pas au microscopique dans les sciences de la vie, par exemple.
- (2) Les transformations chimiques évoquées sont considérées comme totales.
- (3) On peut caractériser un modèle aussi par l'usage que l'on en a. Franck Varenne cite Marvin Minsky ([8], p. 134) : « Pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A dans la mesure où B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent au sujet de A » ; alors il est tout à fait possible d'interpréter le modèle macroscopique A à l'aide du modèle microscopique A*.
- (4) Il était spécifié qu'il était possible de cocher une ou plusieurs réponses pour un nom ou une formule.
- (5) Ce qui souligne bien au passage que l'idée de substance ou d'espèce chimique est abstraite : une substance (pure) n'existe pas, il n'y a pour s'en convaincre qu'à regarder les étiquettes des flacons de produits chimiques. Cela nécessite un apprentissage dédié [15].
- [1] Barlet R., L'espace épistémologique et didactique de la chimie, *L'Act. Chim.*, **1999**, 223, p. 23.
- [2] Barlet R., Plouin D., L'équation-bilan en chimie, un concept intégrateur source de difficultés persistantes, *Aster*, **1994**, 18, p. 27.
- [3] Johnson P., Children's understanding of substances - Part 1: Recognizing chemical change, *Int. J. Sci. Educ.*, **2000**, 22, p. 719.
- [4] Johnson P., Children's understanding of substances - Part 2: Explaining chemical change, *Int. J. Sci. Educ.*, **2002**, 24, p. 1037.
- [5] Solomonidou C., Stavridou H., Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique, *Aster*, **1994**, 18, p. 75.
- [6] Morge L., Doly A.-M., L'enseignement de la notion de modèle : quels modèles pour faire comprendre la distinction entre modèle et réalité ?, *Spirale*, **2013**, 52, p. 149.
- [7] Larcher C., Chomat A., Modélisation de la matière en cycle central du collège : construction de modèles par la production et la discussion de dessins, en référence à des observations communes, *Le Bup*, **2000**, 94(826), p. 1341.

- [8] Varenne F., *Théorie, réalité, modèle*, Éditions Matériologiques, Paris, **2013**.
- [9] Canac S., Kermen I., Exploring the mastery of French students in using basic notions of the language of chemistry, *Chem. Educ. Res. Pract.*, May **2016**, p. 452.
- [10] Canac S., Kermen I., Les difficultés des élèves face au langage du chimiste, Actes des 9^e Rencontres de l'Ardist (Lens, 30 mars-1^{er} avril 2016), **2016**, p.1 (<https://ardist2016lens.sciencesconf.org/81456/document>).
- [11] Mzoughi-Khadhraoui I., Dumon A., L'appropriation par des élèves tunisiens débutants du langage permettant de représenter la réaction chimique, *Recherches en didactique des sciences et des technologies*, **2012**, 6, p. 89.
- [12] Taskin V., Bernholt S., Students' understanding of chemical formulae: a review of empirical research, *Int. J. Sci. Educ.*, **2014**, 36, p. 157.
- [13] Ben-Zvi R., Eylon B.-S., Silberstein J., Is an atom of copper malleable?, *J. Chem. Educ.*, **1986**, 63, p. 64.
- [14] Harrison A.G., Treagust D.F., The particulate nature of matter: challenges in understanding the submicroscopic world, in *Chemical Education: Towards Research-Based Practice*, J.K. Gilbert, O. de Jong, R. Justi, D.F. Treagust, J.H. Van Driel (eds), Kluwer Academic Publishers, **2002**, p. 189-212.
- [15] Le Maréchal J.-F., Barbe E., Roux M., Jean-Marie O., Roue B., Vincent D., Difficultés des élèves sur l'utilisation des ions dans le cadre des nouveaux programmes, *Le Bup*, **2004**, 98(867), p. 1399.

Isabelle KERMEN,

maîtresse de conférences en sciences de l'éducation à l'Université d'Artois, où elle enseigne la chimie, et chercheuse au sein du Laboratoire de Didactique André Revuz (LDAR).

Elle est l'auteure de *Enseigner l'évolution des systèmes chimiques au lycée - Savoirs et modèles, raisonnements d'élèves, pratiques enseignantes*, paru en juin 2018 aux éditions des Presses universitaires de Rennes.

* isabelle.kermen@univ-artois.fr



L'Union des professeurs de physique et de chimie

Une association d'enseignants au service des enseignants

Tous les *Bup* de 1907 à ce jour
en téléchargement gratuit pour toute adhésion et abonnement

Publication numérique mensuelle
avec impression papier trimestrielle



Consultation du *Bup* en ligne
par articles et par numéro avec BupDoc

- ◆ Pour tous : 1907 → 2014
- ◆ Pour les abonnés : 2015 → 2019



Un congrès organisé chaque année
par une académie différente



Le site : <http://www.udppc.asso.fr>

Espace Labo
Textes statutaires et documents
Gestion du laboratoire...

Espace Collège
Programmes
Liens intéressants

Espace Lycée
Enquêtes
Programmes...

Documents thématiques
Autour de la classification périodique
Métrologie...

Siège social et courrier : 42 rue Saint-Jacques - 75005 PARIS
Tél. : 01 40 46 83 80 - Fax : 01 46 34 76 61 - secretariat.national@udppc.asso.fr