

André LAUGIER et Alain DUMON
IUFM d'Aquitaine, DAEST- Université Bordeaux 2

**TRAVAUX PRATIQUES EN CHIMIE ET REPRESENTATION
DE LA REACTION CHIMIQUE PAR L'EQUATION-BILAN
DANS LES REGISTRES MACROSCOPIQUE ET MICROSCOPIQUE:
UNE ETUDE EN CLASSE DE SECONDE (15 – 16 ANS)**

Received: 21 September 1999; revised: 4 December 1999; accepted: 6 December 1999

ABSTRACT: The subject of this work concerns the construction of a representation of a chemical reaction in macroscopic and microscopic forms by secondary-school pupils in the 15-16 year age range. All the surveys on this subject have revealed many unsolved difficulties among pupils. The balanced equation enables a chemical reaction to be represented in a microscopic form, but it can be read at a macroscopic level (that of the observed phenomena) or at a microscopic level (that of particles and the imagined phenomena). A study of the history of chemistry reveals that the necessity of representing a chemical reaction at these two levels presented chemists with an intellectual (epistemological) obstacle until the end of the nineteenth century. Our study revealed such difficulties among pupils and the recurrence and persistence of some of these difficulties enabled us to identify them as genuine epistemological obstacles which will require much work to overcome. Pupils must have educational experiences designed to allow them to move freely between these levels to appreciate the significance of the balanced equation. [*Chem. Educ. Res. Pract. Eur.*: 2000, 1, 61-75]

KEY WORDS: *chemical reaction; representation in equations; phenomenology; macroscopic level; microscopic level; epistemological obstacle*

RESUME: Ce travail concerne la construction d'une représentation de la réaction chimique, dans les registres macroscopique et microscopique, par des élèves en classe de seconde (15-16 ans). Toutes les études sur ce sujet ont fait apparaître chez les élèves, l'existence de difficultés, nombreuses et non résolues. L'équation bilan permet, dans le registre symbolique, de représenter une réaction chimique, mais sa lecture peut se faire au niveau macroscopique (celui de la phénoménologie observée) ou au niveau microscopique (celui des particules et de la phénoménologie imaginée). L'étude historique révèle que la nécessité de représenter la transformation chimique dans ces deux niveaux a constitué pour les chimistes un obstacle épistémologique qui n'a pu être franchi qu'à la fin du XIX^e siècle. Notre étude didactique montre que lorsque les élèves sont face à une phénoménologie macroscopique et doivent imaginer une phénoménologie microscopique explicative, ils heurtent eux aussi à de nombreux obstacles. L'enseignement doit leur proposer un curriculum adapté pour leur permettre de circuler entre ces deux niveaux de représentation grâce à l'équation bilan.

MOTS CLES : *réaction chimique; niveau de représentation; phénoménologie; niveau macroscopique; niveau microscopique; obstacle épistémologique*

INTRODUCTION

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux conceptions que se font les élèves des transformations chimiques de la matière et aux difficultés qu'ils rencontrent dans les différents niveaux d'appréhension.

Des difficultés liées au niveau macroscopique

L'identification d'une transformation de la matière comme réaction chimique passe par la distinction transformation chimique / transformation physique. Solomonidou et Stavridou (1989) ont montré comment, pour faire cette distinction, des élèves Grecs, âgés de 8 à 17 ans, utilisent non pas des critères scientifiques mais des critères qui leur sont propres, hérités de la vie de tous les jours. Ils considèrent comme physique tout ce qui se transforme "naturellement", et comme chimique tout ce qui est provoqué par l'homme.

Stavridou (1990) a souligné que tant que les concepts de substance chimique et de substance chimique nouvelle obtenue au cours d'une transformation chimique, n'ont pas de signification scientifique, le concept de réaction chimique ne peut pas fonctionner d'une manière pertinente du point de vue chimique.

Un des premiers problèmes que rencontrent les jeunes élèves réside dans leur incapacité à "*appréhender le changement des substances en d'autres substances à partir du changement de leurs propriétés*" (Solomonidou, 1991). Ceci est dû à ce que la reconnaissance des substances et des phénomènes se fait à partir des perceptions éprouvées face à ces substances et phénomènes (Pfundt, 1981a; De Vos, 1985b; Anderson, 1990).

Des difficultés liées au niveau microscopique

Pour Ben-zvi, Eylon et Silberstein (1982), la source de nombreuses difficultés des étudiants provient d'une part de leur mauvaise compréhension des concepts de base du modèle atomique et, d'autre part, de leur incapacité à les utiliser pour interpréter les propriétés macroscopiques des substances ainsi que les lois de la chimie. De nombreux étudiants pensent que la particule caractéristique d'une substance chimique, atome ou molécule, doit avoir les propriétés macroscopiques de cette substance : la rigidité pour un solide, l'odeur ou la couleur pour un gaz (De Vos, 1987). Anderson, (1990), pour résoudre ce problème du transfert des propriétés du monde macroscopiques au monde microscopique, suggère de faire nettement la distinction entre le modèle, hypothétique, libre construction de l'esprit humain, et l'observation de la substance au niveau macroscopique. Mais expliquer le visible compliqué par de l'invisible hypothétique nécessite un changement de registre. Lee, Eichinger, Anderson et al (1993) soulignent la difficulté des élèves à effectuer ce changement. Nakhled (1992), note que même lorsque les étudiants connaissent le modèle scientifique d'une matière faite de particules en mouvements constants, séparées par du vide, ils ne sont pas pour autant capables de l'utiliser comme outil de représentation, d'interprétation et de prédiction des phénomènes chimiques.

Des difficultés liées à l'utilisation du registre symbolique

L'ensemble de ces difficultés se concrétise dans l'utilisation par les étudiants du registre symbolique. Dans ce registre il y a à la fois des concepts qui renvoient exclusivement au niveau macroscopique (masse, volume, nom), au niveau microscopique (représentation d'un atome, d'une molécule) et aux deux niveaux (symbole de l'élément ou de la particule, formule). C'est par le registre symbolique que se fait le lien entre les niveaux macroscopique et microscopique. Yaroch a mis en évidence que sur 14 étudiants qui arrivaient à équilibrer correctement une

équation-bilan (du type $N_2 + H_2 \rightarrow NH_3$), neuf ne réussissaient pas à faire le lien entre ces deux niveaux. Dans le niveau le plus élevé de compréhension l'étudiant perçoit les différentes significations des symboles chimiques et des coefficients numériques alors que dans le niveau le plus bas il s'agit d'une simple manipulation mathématique de signes. Ce décalage entre réussir à équilibrer une équation-bilan et comprendre sa signification aux niveaux macroscopique et microscopique a été largement confirmé par d'autres recherches comme celles de Savoy et Steeples (1994) ou Huddle et Pillay (1996). Dans ce registre symbolique le concept de mole permet de lire une équation-bilan à la fois au niveau macroscopique et au niveau microscopique. Une étude suédoise (Tulberg, 1994) montre que la majorité des étudiants ne fait pas la distinction entre la masse molaire et la masse atomique et conçoit la mole comme un nombre et pas comme une quantité de matière. Quand le mot "quantité" est utilisé à propos d'une équation chimique les étudiants le comprennent comme un synonyme soit du nombre de moles, soit du volume. Ces confusions sont à l'origine des erreurs des élèves lorsqu'il s'agit de lier le rapport des masses des différents éléments à la formule du composé (Schmidt, 1990).

Malgré ces difficultés la capacité des élèves à identifier une transformation de la matière comme réaction chimique progresse au cours des premières années de chimie. Mais, comme le note Stavridou (1990), même lorsque les élèves commencent à établir un lien entre la phénoménologie observée et les changements dans la structure de la matière, "*à aucun moment les élèves n'ont parlé en termes de réarrangement des atomes qui aboutirait à la formation d'une ou de plusieurs molécules nouvelles*". Dans les conclusions de sa thèse, Stavridou estime que cette incapacité des élèves à concevoir la réaction chimique aux deux niveaux, macroscopique et microscopique, par la médiation du registre symbolique justifie une recherche sur la mise en œuvre d'activités permettant "d'assurer les conditions d'une meilleure correspondance entre faits observés au niveau manipulateur (phénoménologie) et leurs représentations du niveau atomique (modèles moléculaires)".

Depuis quelques années, aux Etats-Unis, des recherches ont été réalisées autour de l'articulation de l'enseignement entre ces deux niveaux. Initiées par Nurrenbern et Pickering (1987), elles ont été poursuivies par Sawrey (1990), Nahkled et Mitchel (1993). Le travail que nous avons mené (Laugier, 1998) s'inscrit dans cette perspective : Comment se comportent les élèves lorsqu'il s'agit d'identifier et de lier les deux phénoménologies (macroscopique et microscopique) ? quelle est l'origine des difficultés rencontrées par les élèves ? quelles activités de classe sont susceptibles de permettre cette liaison macroscopique / microscopique ?

LA METHODOLOGIE

Nous avons fait l'hypothèse que ces difficultés des élèves sont en fait la manifestation contemporaine d'obstacles liés au savoir lui-même et nous en avons recherché les origines dans l'histoire de la construction d'une représentation de la réaction chimique. Notre travail s'est effectué suivant deux axes : un axe historique et un axe didactique.

Conduire une étude historique

Nous ne présentons ici qu'une courte synthèse de cette partie de la recherche, qui se proposait d'identifier et catégoriser les obstacles rencontrés par les chimistes. Quels étaient les savoirs utilisés, pour résoudre quels problèmes ? comment, à un moment donné ces savoirs qui ont fait la preuve de leur efficacité ne permettent plus de résoudre de nouveaux problèmes ? comment réagissent les chimistes à ce moment là ? comment élaborent-ils de nouveaux savoirs ? qu'est ce qui, selon le mot de Bachelard, provoque *des lenteurs et des*

troubles et résiste à ces changements (Bachelard, 1938) ? Notre étude fait apparaître que dès l'origine, deux écoles de pensée, deux points de vue vont s'opposer pour représenter, à des fins d'explication, la matière et ses transformations :

- Un point de vue mécaniste, initié par Platon, va tenter de mathématiser la nature, afin de réduire la diversité des objets du monde sensible à une diversité de forme et de taille entre des particules constituantes. Cette problématique, reprise par les atomistes, va se retrouver, récurrente pendant des siècles, chez tous ceux qui considèrent que la chimie est avant tout une science de la matière, au sens de branche de la physique mathématique qui met l'accent sur la phénoménologie microscopique. L'épistémologie de cette science de la matière, présuppose que les mystères du Monde et les transformations de la matière doivent pouvoir s'expliquer “ *en termes d'une physique résolument et strictement mécaniste, dépourvue de toute finalité, ne mettant en jeu que des principes matériels et leurs interactions* ” (Pullman, 1995)

- Un point de vue substantialiste, défendu par Aristote, va dès le IV^{ème} siècle avant J.C. récuser le mécanisme physico-mathématique de la science de la matière, et privilégier la phénoménologie sensible, telle qu'elle est perçue au niveau macroscopique. Aristote associe aux qualités des corps un substrat matériel et leur attribue un rôle essentiel dans notre perception du monde. La chimie doit être une science des réactions dont le seul objet permis est l'étude de la phénoménologie macroscopique.

Notre étude révèle que les divergences entre ces deux points de vue s'enracinent dans des convictions dont la nature est avant tout épistémologique, philosophique, voire religieuse. De ce fait, ces deux cadres théoriques ne seront pas seulement concurrents, ils seront exclusifs l'un de l'autre sur de nombreux points (pluralité des mondes, rôle de Dieu, existence du vide, etc.). Les textes historiques révèlent la violence de l'opposition entre ces deux systèmes de pensée et permettent de comprendre la rigidité épistémologique des phénoménologues auxquels Boltzmann reprochera “ *de se vanter de ne pas dépasser l'expérience* ” et celle des mécanistes qui eux seront accusés “ *de s'aveugler sur les images et d'y voir les faits* ”.

Chacune de ces deux conceptions sur la matière va développer une famille d'obstacles de nature épistémologique, dont les tentatives de dépassement se traduiront jusqu'au XIX^{ème} siècle par des affrontements vigoureux au sein de la communauté des chimistes. Il faudra attendre les travaux de Cannizzaro au congrès International de Chimie de Karlsruhe en 1860 puis le coup de force épistémologique de Mendeleev (1869) pour clarifier, au niveau macroscopique les concepts jusqu'alors confondus d'élément et de corps simple ainsi que ceux d'atome et de molécule pour le niveau microscopique. C'est la mise en réseau de ces concepts qui permettra enfin aux chimistes de franchir l'obstacle constitué par la nécessité d'identifier et de circuler entre les deux niveaux pour représenter correctement une transformation chimique. Nous présentons ci-dessous les principaux obstacles que notre étude historique de la construction d'une représentation de la transformation chimique a mis à jour.

Une famille d'obstacles pour le point de vue macroscopique

Un obstacle substantialiste, qui pour être dépassé, exigera que les chimistes abandonnent l'idée que les propriétés des substances sont des éléments doués d'une matérialité qui permet leur échange dans les réactions (voir le paradigme alchimiste). La recherche de l'élémentaire devra se faire du côté des substances, et pas du côté des propriétés.

Un obstacle perceptif, dû aux “ *ravages de l'attribution directe à la substance des données immédiates de l'expérience sensible.* ” (Bachelard, 1938), que les chimistes ne pourront dépasser qu'en refusant de se laisser perturber par les phénomènes sensibles qui masquent la transformation chimique. Ils devront percevoir ce qui se conserve derrière

l'observation de ce qui change (dans l'interprétation de la combustion ce qui est important c'est la consommation d'oxygène ce n'est pas la flamme).

Sous leur forme la plus triviale ces obstacles conduiront les chimistes à l'impasse de la transmutation puis à celle du phlogistique.

L'obstacle positiviste : pour le dépasser les chimistes devront abandonner l'idée que l'expérience est la seule activité permise au chimiste. Les chimistes de la science des réactions devront vaincre "*l'illusion phénoménologique de pouvoir bâtir la science sans le secours d'abstractions*" (Bachelard, 1979).

Une famille d'obstacles pour le point de vue microscopique

L'obstacle mécaniste trivial : pour le franchir les chimistes devront renoncer à expliquer les perceptions du niveau macroscopique par les propriétés mécaniques des particules du niveau microscopique. Ce sera l'obstacle majeur auquel se heurteront les chimistes des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles.

L'obstacle réaliste : pour le franchir les chimistes devront renoncer à l'idée qu'il est possible d'accéder à une description de la réalité au niveau microscopique. La tâche du chimiste est d'imaginer un modèle de ce réel, qui "*représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés*" (Bachelard, 1979).

C'est à partir des résultats de cette étude historique que nous avons conduit une étude didactique avec les élèves.

Conduire une étude didactique

Il s'agissait d'identifier les difficultés rencontrés par les élèves lorsqu'ils doivent construire une représentation de la réaction chimique dans les deux niveaux, macroscopique et microscopique, et caractériser celles qui sont de véritables obstacles épistémologiques au sens de Bachelard. Où vont se situer les difficultés pour les élèves : à l'intérieur de chaque registre ou bien lors du passage d'un registre à l'autre ? quelle sera leur nature, difficulté passagère ou véritable obstacle dont le franchissement réclamera un travail de même nature que la mise en place d'une connaissance ?

Construire un curriculum d'enseignement

Nous avons travaillé dans quatre classes de seconde (112 élèves) pendant une année scolaire en organisant le curriculum d'enseignement de chimie en fonction de choix liés :

- *Au cadre épistémologique qui privilégie l'identification des deux niveaux macroscopique / microscopique et la circulation entre ces niveaux.*

- *Au cadre didactique retenu, fondé sur une hypothèse constructiviste, qui propose aux élèves la résolution de problèmes expérimentaux et l'élaboration, à travers un débat scientifique, d'une phénoménologie microscopique explicative : qu'a-t-on observé ? qu'en pense-t-on ? comment interprète-t-on la formation de produits nouveaux ?*

Des contraintes institutionnelles ont été prises en compte dans la mise en place de ce curriculum (respect du temps d'enseignement, respect du programme). Enfin une autre contrainte forte liée à ce type d'expérimentation en classe est intervenue. Les enseignants des quatre classes concernées même s'ils se déclarent prêt à participer à une

expérimentation sur l'année scolaire, souhaitent que leurs élèves apprennent. Dans ces conditions l'échec total, possible sur une expérimentation qui porterait sur une séquence isolée, n'est plus ici envisageable.

Méthodologie pour chaque séquence d'enseignement

Il s'agit de :

- *Choisir dans les résultats de l'étude historique l'obstacle dont on souhaite étudier la manifestation éventuelle chez les élèves.*
- *Construire une séquence d'enseignement organisée autour d'un problème expérimental dont la résolution conduira les élèves à affronter l'obstacle choisi.*
- *Faire une analyse a priori pour mettre en évidence et expliciter en quoi et comment la séquence envisagée va permettre d'étudier le comportement des élèves face à cet obstacle.*
- *Fournir à l'enseignant une fiche pédagogique faisant apparaître l'activité attendue de l'enseignant et des élèves pendant la séance. Cette fiche permet de contrôler le guidage apporté aux élèves.*

Pendant la séance nous avons enregistré puis transcrit les échanges enseignant / élèves ainsi que les échanges entre les élèves à l'intérieur des groupes, afin de les analyser du point de vue des conjectures de la recherche.

LES RESULTATS

Avant de présenter les principaux résultats de notre travail, nous ferons deux remarques :

1 - Les élèves, à la différence des philosophes et des chimistes, ne sont pas guidés par des options philosophiques ou religieuses, de ce fait ils ne s'inscrivent pas a priori dans un des deux cadres, que ce soit celui de la science des réactions (approche macroscopique) ou celui de la science de la matière (approche microscopique).

Une des conséquences est que le même élève, à qui l'enseignement va imposer de circuler entre ces deux cadres, va se heurter à des obstacles appartenant aussi bien au niveau repéré comme macroscopique qu'au niveau repéré comme microscopique.

2 - Les entretiens de début d'année avec les élèves ont montré qu'ils ont une certaine conscience de l'origine de leurs difficultés. Ces élèves de seconde savent que des relations existent entre le monde des phénomènes tel qu'il le perçoivent au niveau macroscopique et un autre monde, celui des particules, qui leur a été présenté par l'enseignement.

Cela ne signifie nullement qu'ils ont commencé à construire des relations conscientes entre ces deux niveaux, mais simplement, ils ont repéré l'existence de ces relations dans le discours de l'enseignant.

Les élèves face à l'identification des deux niveaux

Lorsque les élèves doivent décrire une transformation de la matière qu'ils étiquettent comme transformation chimique, les obstacles liés à la phénoménologie macroscopique (obstacles substantialiste et perceptif) se manifestent dès la première séance de TP.

Dans cette séance il s'agissait de mettre en œuvre une série d'expériences, classiques dans l'enseignement, au cours desquelles le cuivre métal "disparaît" sous l'action de l'acide nitrique, puis après action d'une solution d'hydroxyde de sodium et déshydratation par chauffage du précipité (hydroxyde de cuivre), "réapparaît" par action du carbone à chaud sur ce précipité sec. Les élèves devaient décrire ce qu'ils observaient, essayer de l'expliquer en imaginant une phénoménologie personnelle et confronter leurs interprétations pour élaborer une phénoménologie socialement partagée, proche de celle des chimistes.

Nous avons alors observé que le fonctionnement de *l'obstacle substantialiste* les conduisait dans la première expérience (réaction entre l'acide nitrique et le cuivre métal) à attribuer aux réactifs un changement de leurs propriétés : *l'acide devient bleu, le cuivre devient liquide, le cuivre se transforme en gaz roux.*

Dans la troisième expérience (décomposition par chauffage du précipité d'hydroxyde de cuivre) c'est *l'obstacle perceptif* qui les conduit à affirmer la formation de carbone à partir de l'apparition de la couleur noire : *ça noircit, ça crame, c'est du carbone, il y a de la fumée qui vient du précipité, quand on le chauffe ça devient noir et c'est la propriété des corps qui contiennent du carbone.*

De même dans cette expérience la présence du cuivre sera ignorée parce que sa couleur brun-rouge caractéristique n'est plus perçue.

Leur fonctionnement dans cette situation d'observation (de la phénoménologie macroscopique) s'apparente aux schèmes d'action décrits par Vergnaud (1990). Pour décoder le réel, les élèves utilisent des règles, largement inconscientes, qui fonctionnent pour eux sur le mode de l'évidence. Pour les élèves la couleur noire est associée automatiquement à la formation de carbone, mais l'apparition de gouttes d'eau par chauffage du précipité sec ne les surprend pas : *"de toutes façons, en biologie, quand on chauffe quelque chose, même si c'est sec, il y a toujours de l'eau"*. Le fonctionnement de ces schèmes (phénoménologiques) va ainsi les conduire à élaborer une phénoménologie privée qui va s'opposer à la phénoménologie savante, socialement partagée des chimistes.

Si les élèves ne succombent pas aux *"ravages de l'attribution directe à la substance des données immédiates de l'expérience sensible"* (Bachelard, 1938) ils se retrouvent dans l'impossibilité d'imaginer seuls une phénoménologie différente : *"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."*

Lorsque la situation, et la pression de *l'enseignant*, les obligent à se tourner vers la phénoménologie microscopique (comment expliquez-vous la formation d'eau par chauffage du précipité préalablement séché, d'hydroxyde de cuivre ?) ils contournent *l'obstacle mécaniste* et refusant d'envisager une explication au niveau microscopique se contentent d'affirmer que *"le produit était pas bien sec"*. Si l'enseignant insiste *"mais si il était absolument sec"*, alors ils imaginent ce niveau microscopique comme une image en réduction du niveau macroscopique : *"l'eau devait être captive quelque part... je vois ça avec de l'eau enfermée au milieu d'autres molécules... Il y a du cuivre accroché avec autre chose et au milieu il y a l'eau"*.

Ce jour là, pendant la discussion qui accompagne la séance de travaux pratiques, aucun élève ne fait référence à une possibilité de réorganisation au niveau microscopique.

Le même *obstacle mécaniste* se manifestera encore un mois plus tard, lorsqu'il s'agira d'expliquer la libération de gaz par action d'un acide sur un métal. L'apparition d'un gaz n'est pas interprétée comme la formation de nouvelles particules, résultant d'une réorganisation interne, mais comme la libération de micro-bulles, emprisonnées, coincées dans le métal et assimilées aux particules du gaz. Quand les élèves pensent la matière au niveau microscopique, les particules des différentes substances sont inaltérables et conçues comme des fragments du niveau macroscopique, des micro gouttes dans le cas d'un liquide ou des micro bulles pour un gaz. La réaction chimique est alors imaginée comme une séparation de ces particules avec éventuellement l'organisation d'une nouvelle association qui n'est pas sans rappeler *l'agglutination* des anciens chimistes.

Au cours de la lecture immédiate, spontanée, de la phénoménologie par les élèves, le fonctionnement de ces obstacles, les conduit à élaborer des connaissances qui leur permettent d'expliquer localement ce qui est perçu (changement de couleur, apparition de corps nouveaux). Ces connaissances s'organisent dans une phénoménologie macroscopique "privée", qui n'est pas la phénoménologie savante, socialement partagée des chimistes. Cette phénoménologie privée se traduit par une confusion entre les niveaux macroscopique et microscopique. Au cours de cette séance d'enseignement les élèves ne pourront pas construire une phénoménologie proche de la phénoménologie savante, même après discussion. Pour y parvenir ils devront passer par l'élaboration modélisante.

Un fonctionnement difficile du modèle

Dans la séance sur le cycle du cuivre, les élèves ont été invités à proposer leur interprétation des phénomènes. L'obstacle positiviste qui interdisait aux anti-atomistes du XIX^e siècle de recourir au niveau microscopique n'est pas présent chez les élèves. Ils ne savent pas utiliser ce niveau mais ils ne le refusent pas : "*on sent, on voit des couleurs, mais je n'arrive pas à me servir de ça [les particules] pour expliquer ce que je vois*". Les élèves savent qu'il existe un autre monde que celui de la phénoménologie macroscopique, mais ils sont incapables de s'en servir et de le mettre en relation avec ce qu'ils observent : "*Il y a un précipité, des gaz qui se dégagent, un changement de couleur ... le produit il va forcément passer d'un stade de départ à autre chose, il va forcément changer. Mais moi ce que je me demande, c'est comment les ions font ça ? qu'est ce que ça représente les ions, les atomes tout ça ? je sais que c'est une réaction chimique, mais je ne vois pas trop ce qui change et ce qui ne change pas*".

Les élèves face à l'utilisation de l'équation-bilan

Les entretiens menés en début d'année nous ont montré à quel point l'équation-bilan représente pour les élèves une véritable "bête noire" sur laquelle se cristallisent leurs difficultés en chimie. Les élèves savent qu'ils doivent traduire une transformation chimique par une équation bilan mais celle-ci, en début d'année est pour eux un exercice purement mathématique dépourvu de toute signification chimique : "*l'an dernier on nous disait 'on a de l'eau et de l'hydrogène' alors nous dessous on mettait H_2O et H_2 , mais pour moi ça ne représente rien de voir des chiffres, des lettres qui bougent ...*".

Dans notre curriculum nous avons proposé aux élèves une séquence de travail expérimentale sur l'approche de la stœchiométrie. Notre objectif était d'étudier la capacité des élèves à identifier l'existence des deux niveaux de représentation d'une réaction chimique avec une double lecture de l'équation bilan, lecture dans le niveau macroscopique celui des quantités de matière, et lecture dans le niveau microscopique, celui des ions. Les réactions chimiques rencontrées jusque là par les élèves l'ont été d'un point de vue qualitatif (les réactifs réagissent ou non). La résolution du problème posé dans cette séquence doit les

conduire à considérer la réaction d'un point de vue quantitatif. Le problème, posé aux élèves dans le registre macroscopique, concerne une réaction chimique totale qu'ils ont déjà rencontrée (réaction entre le sulfate de cuivre et l'hydroxyde de sodium) : comment réaliser cette réaction pour que après réaction il ne reste plus dans la solution aucun des deux réactifs de départ (les deux tests de présence d'ions Cu^{2+} et OH^- doivent être négatifs) ?

Dans la première partie de la séquence expérimentale tous les élèves disposent des mêmes solutions de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de sodium. Le problème qui leur est posé consiste à prévoir ce qui se passe lorsqu'une solution d'hydroxyde de sodium et une solution de sulfate de cuivre sont mises en présence.

Première question : *Vous allez mettre en présence ces deux solutions. D'après vous, que va-t-il se passer ?*

TABLEAU 1. Les réponses des élèves à la première question (total 52 élèves).

une réaction chimique	12 élèv.
formation d'un précipité	16 élèv.
formation d'un précipité d'hydroxyde de cuivre	16 élèv.
formation d'un précipité de sulfate de sodium	18 élèv.
formation d'un précipité d'oxyde de cuivre	02 élèv.
dégagement gazeux	06 élèv.

Comment pourriez vous le représenter ?

TABLEAU 1 BIS. Les réponses des élèves à la première question (total 52 élèves).

Essaie d'écrire la réaction avec le nom des corps qui réagissent.	00 élèv.
N'écrivent aucune formule correcte.	26 élèv.
Essaie d'écrire l'équation-bilan.	24 élèv.
Ecrivent l'équation-bilan correctement.	08 élèv.

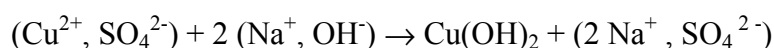
L'équation bilan est un objet d'enseignement depuis plusieurs mois mais pour près de la moitié

des élèves ce n'est pas encore un outil de communication pour représenter ce qui se passe.

C'est

l'enseignante qui doit faire rappeler par un élève l'équation bilan déjà écrite en classe quelques

semaines plus tôt :



Deuxième question : *d'après vous si vous versez la solution de sulfate de cuivre et celle d'hydroxyde de sodium dans un bécher restera-t-il des ions cuivre II ou hydroxyde dans la solution ?*

TABLEAU 2. Les réponses des élèves à la deuxième question (total 52 élèves).

Pas de prévision	02 élèv.
Il n'en reste pas car sont ils tous dans le précipité d'hydroxyde de cuivre.	46 élèv.
Il n'en restera pas si les quantités sont égales.	02 élèv.
Il n'en restera pas sinon l'équation-bilan serait faussée.	02 élèv.

Lorsque le guidage de l'enseignante les conduit à se tourner vers l'équation bilan la lecture qu'ils en font est erronée.

Pour la grande majorité des élèves (46 élèves sur 52) le fait que dans le membre de droite de l'équation bilan les ions cuivre II et hydroxyde soient associés pour représenter la formule de l'hydroxyde de cuivre prouve qu'ils sont tous liés et qu'il ne peut donc y en avoir d'isolés dans la solution : *“ il ne restera pas des ions cuivre II ni des ions hydroxyde puisque c'est un précipité constitué à partir de ces deux entités ; ils seront donc tous dans le précipité et non dans la solution ”*. Deux élèves précisent même que *“ il ne restera aucun des deux ions car l'équation bilan de la réaction serait faussée ”*.

Lorsque la même question est posée aux élèves, après qu'ils aient réalisé l'expérience et observé le résultat, l'observation de cette phénoménologie macroscopique les conduit à modifier leur prévision.

TABLEAU 3. Les réponses des élèves à la deuxième question après expérience (total 52 élèves).

Pas de prévision.	00 élèv.
Il n'en reste pas car ils sont tous dans le précipité d'hydroxyde de cuivre.	12 élèv.
Il reste des ions cuivre II car la solution est bleue après décantation.	30 élèv.
Il ne reste aucun ion car la solution est incolore.	09 élèv.
Il reste peut-être des ions hydroxyde dans leur solution incolore.	15 élèv.
Cela dépend des proportions dans lesquelles on les a mis.	12 élèv.

Ceux qui obtiennent une grande quantité de précipité d'hydroxyde de cuivre (12 élèves sur 52) pensent que *“ tous les ions sont accrochés dans le précipité, donc il n'y en a pas dans la solution ”*. La quasi totalité des élèves (39 élèves sur 52) se réfère à la couleur de la solution pour prédire la présence d'ion cuivre II ou hydroxyde. Pour 15 d'entre eux *“ Il ne restera plus d'ions cuivre mais pour l'ion hydroxyde on en est pas sûrs. Car l'observation du résultat de l'expérience montre qu'il reste une solution incolore sur la phase supérieure du précipité. ”*

Quelques élèves (12 élèves) commencent toutefois à s'interroger sur les proportions dans lesquelles les ions ont été mis en présence. *“ Il restera de l'hydroxyde ou des ions cuivre suivant les proportions de chacun car si l'on met plus d'hydroxyde que de cuivre il en restera qui n'aura pas réagit. Idem pour l'autre. ”*

Il s'agit d'une avancée intéressante mais dans la discussion qui suivra il apparaîtra que ces élèves pensent que pour mettre ces deux ions en présence dans les *“ bonnes proportions ”* il faut verser *“ moitié moitié ”* c'est à dire des volumes égaux de chaque solution.

Après avoir réalisé leur propre expérience les élèves constatent qu'ils n'obtiennent pas tous le même résultat (celui-ci dépend bien sûr des quantités versées, et des concentrations des deux solutions). C'est la première fois que dans un TP de chimie tous les groupes ne

trouvent pas la même chose. Cela intrigue les élèves qui se demandent en outre comment des résultats différents peuvent être représentés par la même équation bilan. Il est très difficile pour eux de comprendre que celle-ci correspond à la modélisation d'une situation idéale, qui fait apparaître les proportions dans lesquelles les quantités de matière doivent être mises en présence pour que, dans le cas d'une réaction totale, en fin de réaction la totalité des réactifs ait disparu. Or dans le cas d'une situation plus générale, telle que celle rencontrée aujourd'hui en classe les quantités de matière sont mises en présence dans des proportions quelconques et réagissent dans les proportions stœchiométriques, la réaction totale dans le sens direct s'arrêtant par épuisement du réactif limitant

Au cours de la discussion entre les élèves un nouveau problème expérimental se pose : *comment faire pour que après réaction il ne reste plus dans la solution ni ion cuivre II ni ion hydroxyde ?*

S'il reste des ions OH^- ou Cu^{2+} les élèves se doutent que " *c'est une histoire de proportions* ", mais ils ne se tournent pas pour autant vers l'équation-bilan écrite au tableau. Leur première idée fait appel à ce qui leur paraît être une question de bon sens, c'est " *on N'a pas pris les bons volumes* ". Si on veut " *que ça tombe juste.* " il faut " *faire moitié moitié* ", " *parce que avec des volumes égaux ça doit tomber juste* ". Ce type de raisonnement se retrouve dans les deux classes observées et a pu être aussi noté dans les autres classes ayant participé à l'expérimentation. Comme l'expérience leur montre que ce n'est pas la bonne solution (il reste des ions hydroxyde) et sous l'insistance de l'enseignante ils se tournent enfin vers l'équation bilan, mais voyant le coefficient 2 devant NaOH ils continuent à raisonner au niveau macroscopique et pensent qu'il faut deux fois plus de soude que de sulfate de cuivre. Pour eux deux fois plus signifie un volume deux fois plus grand de solution. Ce raisonnement réapparaîtra plusieurs fois au cours de la séquence et ne pourra être abandonné spontanément par les élèves. L'enseignante doit intervenir à nouveau pour attirer l'attention des élèves sur l'équation bilan écrite au tableau.

Mais leur lecture de cette équation n'est pas celle attendue par l'enseignante. Les élèves perçoivent bien que la signification du coefficient 2 devant NaOH est importante, mais pour eux ce coefficient signifie qu'il faut " *mettre deux fois plus de soude que de sulfate de cuivre* ". La discussion tourne alors autour de la signification de ce " *deux fois plus* ".

- Dans une des deux classes, ce " *deux fois plus de soude* " relance l'élaboration et la mise en œuvre des protocoles avec deux volumes de soude pour un volume de sulfate de cuivre. Pourtant ces protocoles venaient d'être testés et infirmés quelques minutes auparavant.

- Dans l'autre classe, un groupe propose une lecture en masse : il suffirait de prendre une masse d'hydroxyde de sodium deux fois plus importante que celle de sulfate de cuivre.

Au cours de la discussion les élèves restent au niveau macroscopique et l'enseignante doit intervenir pour débloquer la situation. Elle repose la question de la signification des coefficients de l'équation bilan. Peu à peu les élèves vont prendre conscience qu'il faudrait pouvoir " *compter les ions* " et prendre deux fois plus d'ions hydroxyde que d'ion cuivre II. A la suite de ces réflexions des élèves le concept de mole est introduit en classe à travers des activités manipulatoires.

Dans la deuxième partie de la séquence expérimentale les élèves disposent d'hydroxyde de sodium et de sulfate de cuivre en cristaux. Ils doivent déterminer et peser les quantités de matière nécessaires et les mettre en solution pour que après réaction il ne reste aucun des deux ions cuivre II ou hydroxyde en solution.

En fait lors de cette deuxième séance les élèves oublient leurs tentatives de raisonnement au niveau microscopique, ébauchées à la dernière séance. Abandonnant leurs propositions sur le nombre d'ions à mettre en présence pour déterminer les proportions à utiliser, la quasi totalité d'entre eux revient au raisonnement en masse de la première séance. Ils font la confusion entre les mots et les concepts de mole, quantité, volume ou masse. Plusieurs élèves ne comprennent toujours pas qu'il puisse rester des ions cuivre II ou hydroxyde dans la solution alors que l'équation-bilan que l'enseignant leur demande d'utiliser pour comprendre ce qui se passe ne les mentionne pas. Le "deux fois plus" d'hydroxyde de sodium indiqué par l'équation-bilan est lu par les élèves comme une masse deux fois plus grande. S'ils finissent par se tourner vers le niveau microscopique pour déterminer les proportions stœchiométriques ce n'est à nouveau que sous l'action pressante de l'enseignante et ils n'abandonnent leur raisonnement au niveau macroscopique qu'à contre cœur. A ce moment là ils identifient les entités du niveau microscopique, commencent à entrevoir qu'il existe un lien entre ces entités et les grandeurs macroscopiques comme la masse, mais n'arrivent pas à utiliser la mole, unité de quantité de matière et à l'appliquer à l'équation-bilan pour circuler entre le microscopique et le macroscopique afin de déterminer les masses de substances à utiliser.

Sur l'ensemble des 52 élèves observés seulement 3 groupes (11 élèves) réussissent le passage du niveau microscopique (proportions dans lesquelles les ions réagissent) au macroscopique (masse de réactifs à utiliser). L'obstacle qui s'oppose à la liaison macroscopique / microscopique résiste et n'est toujours pas franchi après cette séquence d'enseignement.

DISCUSSION

Les séquences conçues pour notre étude didactique se proposaient d'explorer les différentes manifestations possibles, chez les élèves, de l'obstacle qu'a constitué pour les chimistes la liaison macroscopique / microscopique.

Dans la première séquence

Il s'agit de réaliser des expériences autour de l'élément cuivre et de s'appuyer sur l'observation de la phénoménologie macroscopique pour commencer à construire une certaine représentation de la transformation chimique. Nous avons pu observer que les élèves utilisent dans cette tâche des schèmes phénoménologiques qui sont la manifestation "en acte" de l'obstacle phénoménologique macroscopique de type perceptif. Pour le dépasser les élèves devront suivre Bachelard et refuser de "*se précipiter au réel*" pour interpréter celui-ci (l'apparition de la couleur noire par chauffage ne signifie pas à coup sûr la formation de carbone). Nous retrouvons dans ce comportement les résultats obtenus par Solomonidou (1991) qui soulignait que chez les élèves, nombreux sont ceux qui dissocient une substance de ses propriétés et considèrent que les propriétés des substances peuvent changer sans affecter leur identité. Lorsqu'ils sont conduits, sous la pression de l'enseignant à se tourner vers le niveau microscopique ils ne le refusent pas. L'élève de 1998 n'est pas un équivalentiste anti-atomiste du XIX^e siècle. L'obstacle positiviste si présent au XIX^e siècle, ne fait pas partie des obstacles rencontrés par les élèves. Mais les particules du niveau microscopique telles qu'ils les imaginent sont des grains de matière possédant déjà les propriétés de la substance au niveau macroscopique. Ils n'arrivent pas à concevoir la formation de substances nouvelles en faisant fonctionner une réorganisation des particules (formation de l'eau dans la décomposition de l'hydroxyde de cuivre). L'étude historique nous

a montré combien le franchissement de cet obstacle avait été difficile pour les chimistes des XVIII^e et XIX^e siècles.

A cette manifestation de l'obstacle phénoménologique microscopique s'ajoute chez les élèves la croyance que, pour imaginer les caractéristiques du niveau microscopique, il faut pouvoir les déduire de l'observation du niveau macroscopique. Ce n'est pas que les élèves imaginent, comme le faisaient les chimistes du XVII^e siècle, que la forme des particules doit rendre compte des propriétés macroscopiques des substances. Cette manifestation de l'obstacle mécaniste que nous avons qualifié de trivial, n'est pas présente chez les élèves. Simplement, ils pensent que pour connaître l'organisation de la matière au niveau microscopique il faut avoir la possibilité de l'observer. C'est toute l'activité de modélisation qui est ici absente du raisonnement des élèves.

Dans la deuxième séquence

L'élaboration du protocole expérimental se fait dans le cadre de la résolution d'un problème par les élèves. Il s'agit de passer d'une étude qualitative de la réaction choisie, à une étude quantitative. Avec les moyens dont les élèves disposent, pour réussir, ils doivent circuler du macroscopique au microscopique afin de déterminer dans quelles proportions les substances

réagissent, puis revenir au macroscopique en utilisant le concept de mole pour déterminer les quantités de matière nécessaires. Cette circulation entre les niveaux se fait en utilisant l'équation-bilan. L'activité conduit les élèves à s'interroger sur la signification des nombres placés devant les formules des différents composés. Nous avons alors observé la très grande résistance des élèves à cette circulation entre les niveaux, lorsqu'il s'agit de lire l'équation-bilan. Leur lecture se fait dans le registre macroscopique (volume et masse) et quand, sous l'action d'un guidage serré de l'enseignant, ils doivent lire l'équation-bilan au niveau microscopique ils se révèlent incapables de revenir dans le niveau macroscopique. A l'issue de cette séance les élèves semblent capables d'identifier les deux niveaux, mais ils n'arrivent toujours pas à les mettre en relation.

De plus, il est apparu au cours de cette séquence que l'équation-bilan n'est pas adaptée à la représentation d'une réaction chimique effectuée, comme c'était le cas ici, dans des proportions quelconques. A plusieurs reprises des élèves se sont étonnés que des substances puissent se trouver dans le milieu réactionnel en fin de réaction alors que l'écriture ne les fait pas apparaître. L'équation-bilan traduit la conservation de la matière et fournit des informations sur les proportions dans lesquelles les réactifs réagissent pour donner les produits. Mais la même équation-bilan peut servir à représenter des situations expérimentales effectives très différentes. Il y a là une difficulté supplémentaire qui complique la tâche des élèves.

CONCLUSION

Les résultats obtenus par notre étude didactique rejoignent ceux des chercheurs dont nous avons rappelé les travaux au début de cette étude : difficulté à construire une phénoménologie dans le niveau macroscopique à partir des changements observables, difficulté à imaginer la possibilité d'une réorganisation dans le niveau microscopique, difficulté enfin à lier la phénoménologie microscopique imaginée et la phénoménologie macroscopique observée. L'ensemble de ces difficultés se traduit par l'incapacité des élèves à utiliser correctement le registre symbolique pour rendre compte de la transformation chimique. L'obstacle qui, pendant des siècles, a interdit aux chimistes de lier les niveaux

macroscopique et microscopique s'avère être également un obstacle majeur et résistant pour les élèves. Lié à la nature même du savoir à construire il apparaît comme un véritable obstacle épistémologique.

Mais nos travaux montrent aussi l'importance de l'organisation de l'enseignement dans le franchissement de cet obstacle. Des progrès ont pu être observés chez les élèves au cours de l'année: progrès dans la mise en œuvre et dans la lecture de la phénoménologie macroscopique, progrès conceptuels, que ce soit dans l'identification du niveau microscopique, ou dans le statut du modèle. Les questionnaires et les entretiens avec les élèves nous permettent de penser que cette évolution des élèves est directement liée à la mise en place d'un curriculum construit autour du travail de cet obstacle. Laisser aux élèves le temps de construire une phénoménologie macroscopique et d'avoir de l'expérience au sujet de l'expérience, faire débattre les élèves sur le sens qu'ils donnent à cette phénoménologie macroscopique, faire élaborer et discuter des phénoménologies microscopiques explicatives pour la transformation physique et la transformation chimique, surtout ne pas introduire l'équation-bilan avant que le statut de la phénoménologie microscopique ne soit construit.

Ces aller-retour entre l'expérimentation et la spéculation, l'organisation systématique de discussions dans la classe de chimie ont également permis de changer le regard des élèves sur cette discipline. Des possibilités liées à la mise en place d'une autre façon d'enseigner la chimie existent. Le travail fait dans les classes de seconde a montré qu'il est possible de faire bouger les choses dans ce domaine, tout en respectant les contraintes pédagogiques et institutionnelles de cette classe. Cela faisait davantage partie des hypothèses de travail que des conjectures soumises à validation, mais il apparaît après la recherche qu'il s'agit là d'un résultat extrêmement intéressant.

REFERENCES

- Anderson, B. (1990). Pupil's conceptions of matter and its transformations (age 12 - 16). *Studies in Science Education*, 18, 53-85 .
- Bachelard, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique. Pour une psychanalyse de la connaissance objective*. Paris, Vrin.
- Bachelard, S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles in *Elaboration et justification des modèles*. Delattre et Thellier, Paris, Maloine.
- Ben Zvi, R., Eylon, B.S., & Silberstein, J. (1982). Student conceptions of gas and solid. Difficulties to function in a multi-atomic context. Paper presented in *NARST conference*.
- De Vos, W. & Verdonk, A. (1985a). A new road to reactions - 1. *Journal of Chemical Education*, 62, 238-240.
- De Vos, W. & Verdonk, A. (1985b). A new road to reactions - 2. *Journal of Chemical Education*, 62, 648-649.
- De Vos, W. & Verdonk, A. (1987). A new road to reactions - 4. *Journal of Chemical Education*, 64, 692-694.
- 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.
- Laugier, A. (1998). Représentation de la réaction chimique dans les registres macroscopique et microscopique. Contribution au repérage des obstacles épistémologiques. Un exemple en classe de seconde. Thèse, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- Lee O., Eichinger D.C, Anderson C.W., Berkheimer, G.D., & Blakeslee, T.D. (1993). Changing middle school students' conceptions of matter and molecules. *Journal of Research in Science Teaching*; 30, 249-270.

- Mendeleev (1869). *Principes de chimie*, tome 1. Traduction de la 5^{ème} édition russe, édition anglaise, London, 1891.
- Nahkled, M. & Mitchel R. (1993). Concept learning versus problem solving: There is a difference. *Journal of Chemical Education*, 70, 190-192.
- Nahkled, M. (1992). Why some students don't learn chemistry? *Journal of Chemical Education*, 69, 191-196.
- Nurrenbern, S. & Pickering, M. (1987). Concept learning versus problem solving: Is there a difference? *Journal of Chemical Education* 64, 508-510.
- Ouvrage collectif (1994). La réaction chimique. *ASTER, Recherches en didactique des sciences expérimentales*. N° 18. Paris: INRP.
- Ouvrage collectif (1997). Obstacles : Travail didactique. *ASTER, Recherches en didactique des sciences expérimentales*. N° 24. Paris: INRP.
- Pfundt, H. (1981a). The atom - The final link in the division process or the first building block? *Chemical Didactica*, No. 7, 75-94.
- Pullman, B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris: édition Fayard.
- Recherches non publiées citées dans Renström L., Anderson B., et Marton F., (1990) Student's conceptions of matter. *Journal of Educational Psychology*, 82, 555-569.
- Savoy, L.G. & Steeples, B. (1994). Concept hierarchies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, 75, 97-103.
- Sawrey, B. (1990). Concept learning versus problem solving: Revisited. *Journal of Chemical Education*. 67, 253-257.
- Schmidt, H-J., (1990). Secondary school student's strategies in stoichiometry. *International Journal of Science Education*, 12, 4, 457-471.
- Solomonidou, C. (1991). *Comment se représenter les substances et leurs interactions*. Thèse, p. 255. Paris VII.
- Stavridou, H. & Solomonidou, C. (1989). Physical phenomena - chemical phenomena: Do pupils make the distinction? *International Journal of Science Education*, 11, 83-92.
- Stavridou, H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Etude des conceptions des élèves*. Thèse, Paris VII.
- Tulberg, A., Stromdahl, H., & Lybeck L., (1994). Students' conceptions of 1 mole and educators' conceptions of how they teach 'the mole'. *International Journal of Science Education*, 16, 145-156.
- Vergnaud, G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10, No 23, 133-170.

