

Obstacles épistémologiques et didactiques à la construction du concept d'élément chimique : quelles convergences ?

The epistemological and didactical obstacles in the building of chemical element concept

André LAUGIER, Alain DUMON

DAEST, IUFM d'Aquitaine-Université Bordeaux 2
3 ter, place de la Victoire
33076 Bordeaux cedex, France.

Résumé

Après une étude épistémologique du savoir de référence destinée à repérer les obstacles rencontrés lors de sa construction, est analysé le comportement d'élèves de seconde (15-16 ans) confrontés à une suite de situations où ces obstacles sont susceptibles de se manifester. Pour les élèves, une substance peut changer de propriétés sans changer d'identité (obstacle perceptif), la molécule est une particule homogène porteuse des propriétés de la substance (obstacle mécaniste), la description au niveau microscopique se déduit de l'observation macroscopique (obstacle réaliste). Des lacunes dans la maîtrise des concepts de base de la chimie rendent le dépassement de ces obstacles difficile.

Mots clés : *élément, obstacles épistémologiques, didactique, débat, expérimentation.*

Abstract

Following an epistemological study of the reference knowledge which aim to identify the obstacles faced during the building of chemical element concept, the behaviour of lower sixth form students who were confronted to a number of situations in which these obstacles were open to be found was studied. For these students, the properties of a substance can change without its identity changing (perceptive obstacle), a molecule is a homogeneous particle which has the same properties as the substance (mechanical obstacle), description of the microscopic level are deduced from macroscopic observations (realistic obstacle). A lack of sound understanding of the basic chemical concepts makes these obstacles difficult to overcome.

Key words : *element, epistemological obstacle, didactic, debate, experimentation.*

INTRODUCTION

Notre travail concerne la construction d'une représentation de la transformation chimique dans les registres macroscopique et microscopique, par des élèves en classe de seconde (15-16 ans). La question centrale de notre recherche était d'analyser d'une part les difficultés des élèves dans cette tâche et d'autre part celles rencontrées par les chimistes dans la construction des concepts liés à cette représentation. Notre hypothèse étant que le croisement de ces deux études devrait nous permettre d'identifier un certain nombre d'obstacles de nature épistémologique et/ou didactique.

Nous nous sommes référés à l'idée d'obstacle épistémologique telle que l'a introduite Bachelard (1938) puis l'a reprise Brousseau (1983) en didactique. L'idée d'obstacle épistémologique est consubstantielle à l'acte de connaître, son apparition a un caractère inéluctable et cet acte de connaître se fait toujours contre une connaissance antérieure. Ce qui caractérise pour Bachelard cette connaissance antérieure c'est son caractère implicite, naturel. Il s'agit toujours d'une connaissance non questionnée. C'est important, car comme le souligne Brousseau, « *le franchissement d'un obstacle exige un travail de même nature que la mise en place d'une connaissance, c'est-à-dire des interventions répétées, dialectiques de l'élève avec l'objet de sa connaissance* » (Brousseau, 1983, p. 175). Mais toutes les erreurs des élèves ne proviennent pas d'obstacles au sens que leur a donné

Bachelard et il faut faire la distinction entre obstacle et difficulté. Pour savoir si la difficulté fonctionne comme un obstacle le chercheur devra essayer de la formuler non pas en termes de manque de connaissance, mais en termes de connaissance antérieure qui s'oppose à la construction d'une nouvelle connaissance. Cette position nous conduira à formuler les obstacles non pas en termes de manque ou d'incapacité, mais en définissant le progrès intellectuel correspondant à leur éventuel franchissement.

Pour Brousseau, le cœur de la recherche des obstacles épistémologiques se situe « *dans l'analyse des résistances et dans les débats qui les ont vaincues* » et c'est là « *qu'il faut chercher les éléments qui permettront d'identifier les obstacles pour les élèves* » (Brousseau, 1983, p. 193). Selon lui, la recherche historique et la recherche didactique des obstacles doivent se faire indépendamment l'une de l'autre. C'est par la convergence des deux études et dans les zones de recouvrement que se révéleront les véritables obstacles, ceux qui doivent faire l'objet d'un traitement didactique et institutionnel. Ainsi suivant Martinand « *à condition de privilégier les obstacles persistants, rencontrés par une pensée adulte et réfléchie, ou par une activité instrumentée, obstacles bien mis à jour et interprétés par les recherches historiques, l'histoire fournit un terme de comparaison solide et suggère des hypothèses fructueuses pour l'étude des obstacles majeurs rencontrés par les étudiants...* » (Martinand, 1993, p. 92).

Dans un précédent travail (Laugier, 1998) nous avons analysé, à travers les publications de différents auteurs, les difficultés rencontrées par les élèves dans la compréhension de la réaction chimique. Celles-ci relèvent des divers niveaux d'appréhension, niveau macroscopique (Pfund, 1981 ; De Vos & Verdonk, 1985a, 1985b ; Stavridou, 1990 ; Solomonidou, 1991 ; Renström *et al.*, 1990) et niveau microscopique (Novick & Nussbaum, 1978 ; Ben Zvi *et al.*, 1982 ; Séré, 1985 ; Anderson, 1990), ainsi que de l'utilisation du registre symbolique (Cros *et al.*, 1988, Ben Zvi *et al.*, 1988 ; Savoy, 1994). L'ensemble de ces difficultés se traduit par l'incapacité des élèves à lier ces deux niveaux et à utiliser le registre symbolique pour rendre compte de la transformation chimique (Laugier & Dumon, 2000a). Les élèves de l'enseignement secondaire français disposent, en classe de seconde, de 16 h de cours et de 8 séances de travaux pratiques pour construire leur représentation de la matière et de ses transformations. En s'appuyant sur les concepts d'atome, d'ion, de molécule, de corps pur, de corps simple ou composé et sur les tests de reconnaissance d'un certain nombre de ces espèces abordées au collège, les instructions officielles recommandent de débiter cet enseignement par une approche expérimentale devant amener l'élève à « *interpréter une suite de transformations chimiques en termes de conservation d'un élément* » (BOEN, 1999, p. 13).

Cet objectif assigné à l'enseignement doit être mis en regard des deux millénaires nécessaires aux scientifiques pour se mettre d'accord sur une représentation de la matière et de ses transformations (Laugier & Dumon, 2001a). Entre les quatre éléments d'Empédocle et la classification périodique de Mendéléev, que d'affrontements, que d'obstacles ont dû être surmontés ! Il a fallu attendre la distinction entre élément et corps simple et la mise en réseau de ces deux notions avec les concepts du niveau microscopique d'atome et de molécule pour que la lecture d'une équation chimique puisse se faire dans les deux niveaux.

1. L'ÉTUDE ÉPISTÉMOLOGIQUE DU SAVOIR

1.1. L'activité de modélisation

Le scientifique travaille sur un réel auquel il va se référer et qu'il va chercher à rendre intelligible. En fait, le scientifique ne se propose pas d'expliquer le réel, mais l'idée qu'il se fait du réel. Sa description est une construction mentale, conditionnée par la problématique adoptée. Le questionnement retenu par le scientifique lui permet de définir, dans le référent, la situation physique qu'il se propose d'expliquer.

La situation physique possède une structure praxéologique (ensemble des propriétés et des relations entre les objets physiques et expérimentaux). Ces relations praxéologiques concernent la validité de la situation physique par rapport au référent.

Pour **expliquer et prédire** le réel le chimiste passe par l'élaboration modélisante. Cette élaboration modélisante fait correspondre au réel une représentation de la situation physique, entièrement construite et située dans le domaine théorique. À la structure praxéologique observée va correspondre, dans le modèle, une structure théorique inventée. Chacune de ces deux structures possède ses propres objets et sa propre syntaxe. Il existe une syntaxe descriptive qui désigne les particularités empiriques (propriétés et relations) des entités du réel. Dans le modèle, il existe une syntaxe pure, « *librement inventée* », qui définit les propriétés et les relations des objets du modèle, telles que le scientifique les imagine. Ce changement au niveau d'appréhension des phénomènes relève de ce que Halbwachs (1971, 1973) nomme la causalité bathyène c'est-à-dire une « *explication par le niveau plus profond et par les structures sous-jacentes* ». En chimie, l'expérimentation va permettre de construire une phénoménologie observée au niveau macroscopique.

Lorsque l'élève est placé face au réel, sa description phénoménologique n'est pas neutre, elle correspond déjà à une certaine conceptualisation

de ce réel. Confronté aux phénomènes l'élève ira au-delà de la simple description et, interprétant ses perceptions, dira par exemple « *l'acide attaque le cuivre et se transforme en gaz roux* ». D'où la distinction nécessaire entre la phénoménologie privée (celle de l'élève) et la phénoménologie sociale (celle des chimistes), et l'activité de modélisation que proposera l'enseignement devra permettre chez l'élève la substitution de cette phénoménologie privée par une phénoménologie socialement partagée, celle des chimistes. C'est le passage par l'élaboration d'une phénoménologie microscopique qui permettra cette substitution (voir figure 1).

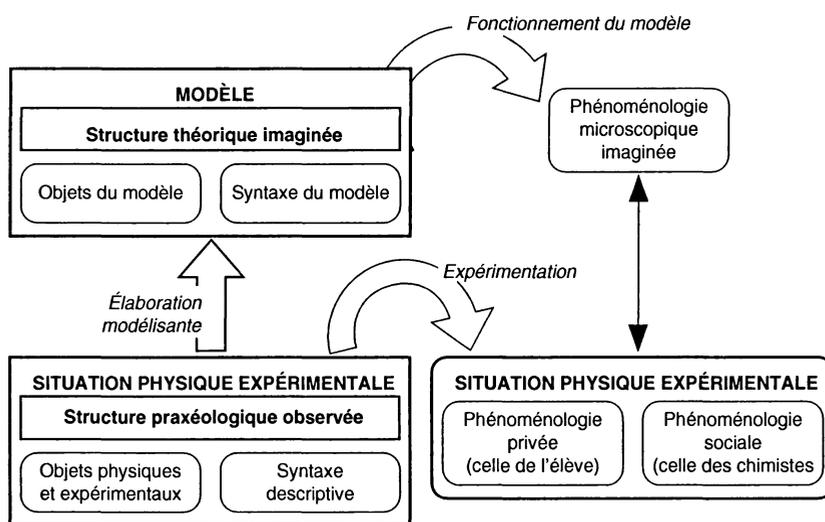


Figure 1 : Schéma de l'activité de modélisation en sciences utilisé dans nos travaux

Cette description du réel par un modèle porte en elle les germes d'une difficulté pour les élèves. La description de la matière dans le registre du modèle particulière peut devenir si familière qu'elle acquiert un caractère réaliste. Or, en aucun cas le modèle en science n'est une copie du réel. Pour S. Bachelard « *il représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés. Il a une fonction sélective des données ou pseudo-données de l'expérience ; il sépare le pertinent du non pertinent par rapport à la problématique considérée* » (Bachelard, 1979, p. 9).

Cet aspect du modèle est essentiel si on veut comprendre les difficultés des chimistes à construire, utiliser et faire évoluer le modèle particulière de la matière au XIX^e siècle. Tant que les chimistes n'auront pas admis cet aspect de la modélisation, les débats seront violents entre les expérimentalistes et les atomistes. Derrière cet affrontement c'est un changement

de paradigme qui était en jeu : vouloir passer de la science œuvre de découverte du réel, à la science œuvre d'invention d'un modèle, c'est finalement poser le problème de l'explication en sciences.

1.2. L'étude du savoir de référence

Le savoir de référence pour notre étude est celui qui a été progressivement construit par les chimistes lorsqu'ils vont tenter de répondre à une des questions primordiales posées dès les VI^e-VII^e siècles avant J.-C., par les Milésiens : « *Comment se représenter la matière et ses transformations ?* » L'étude historique que nous avons réalisée (Laugier, 1998) fait apparaître que, dès l'origine, deux écoles de pensée, deux points de vue vont s'opposer.

Un point de vue mécaniste, dont Platon a été un des principaux représentants, 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, partagée 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, p. 65).

Un point de vue substantialiste, défendu par Aristote, va, dès le IV^e 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 dote les qualités d'un substrat matériel ce qui permet d'envisager leur échange dans les transformations chimiques. En échangeant des propriétés il est possible de changer de substance (transmutation). Dans ce cadre, la chimie doit être une science des réactions dont le seul objet permis est l'étude de la phénoménologie macroscopique.

L'étude conduite 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.) L'histoire de la construction d'une représentation de la transformation chimique est une compétition et une oscillation permanente entre ces deux paradigmes, chacun prenant tour à tour le dessus en fonction de

critères qui échappent à la rationalité scientifique. Le fossé créé dès les origines entre ces deux paradigmes va constituer l'obstacle central de la chimie. L'opposition entre ces deux paradigmes deviendra confrontation au XIX^e siècle entre chimistes atomistes et chimistes équivalentistes. Il faudra le coup de force épistémologique de Mendéléev pour permettre le franchissement de cet obstacle avec la synthèse entre ces deux points de vue.

1.3. Les obstacles épistémologiques et la représentation de la transformation chimique

1.3.1. Une famille d'obstacles pour le point de vue macroscopique

L'obstacle substantialiste, 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 s'est faite du côté des substances, et pas du côté des propriétés.

L'obstacle perceptif, dû aux « ravages de l'attribution directe à la substance des données immédiates de l'expérience sensible » (Bachelard, 1938, p. 104). Les chimistes ne pourront le 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. Suzanne Bachelard pense même que les chimistes de la science des réactions ont dû vaincre « *l'illusion phénoménologique de pouvoir bâtir la science sans le secours d'abstractions* » (Bachelard, 1979, p. 13). En ce qui nous concerne, cette affirmation sera tempérée par le qualificatif de modélisante accolé à l'idée d'abstraction.

1.3.2. Une famille d'obstacles pour le point de vue microscopique

L'obstacle mécaniste trivial : pour le franchir les chimistes ont dû renoncer à expliquer les perceptions du niveau macroscopique par les propriétés mécaniques des particules du niveau microscopique. C'est l'obstacle majeur auquel se sont heurtés les chimistes des XVII^e et XVIII^e siècles. « *On ne me contestera pas que l'acide n'ait des pointes, il suffit de le goûter* »

pour tomber dans ce sentiment car il fait des picotements sur la langue » (Lémeury, 1757, p. 21).

L'obstacle réaliste : les chimistes ne le franchiront qu'en renonçant 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, p. 9).

L'obstacle physicaliste : cet obstacle peut être la conséquence du franchissement de l'obstacle positiviste. Construire un modèle de la matière qui fonctionne, va conduire les chimistes à attribuer aux objets du réel modélisé, les propriétés des objets physiques chargés de représenter les objets du modèle. Cette ontologie des images, favorisée par le langage utilisé (l'atome porteur du caractère insécable, le corpuscule conçu comme un petit corps) a été dénoncée par Bachelard : « *la notion de corpuscule conçue comme un petit corps, la notion d'interaction corpusculaire conçue comme le choc de deux corps, voilà exactement des notions obstacle, des notions arrêt de culture contre lesquelles il faut se prémunir* » (Bachelard, 1951, p. 85). L'exemple prototypique de cet obstacle qui empêche pendant deux millénaires les chimistes de construire une représentation complète et cohérente de la transformation chimique est le concept d'élément. Introduit au niveau macroscopique, il ne peut être entièrement défini à ce niveau. Ce n'est pas un concept strictement macroscopique et empirique. Sa définition doit emprunter aux deux niveaux, macroscopique et microscopique. C'est ce que signifie Bachelard lorsqu'il écrit « *il existe donc bien derrière le phénomène chimique de premier examen un plan nouveau de l'être, véritable noumène chimique que nous ne touchons jamais par l'expérience mais qui nous est indispensable pour comprendre l'expérience* » (Bachelard, 1973, p. 38). Mais, comme le souligne S. Bachelard, « *le mode de pensée phénoménologique refoule l'ontologie mécaniste* » (Bachelard, 1979, p. 11). Ce refus des spéculations microscopiques, qui fonde épistémologiquement la science des réactions, fonctionnera alors comme un obstacle.

2. L'APPROCHE DIDACTIQUE DE LA CONSTRUCTION DU CONCEPT D'ÉLÉMENT CHIMIQUE

2.1. La méthodologie

L'expérimentation avec les élèves s'est déroulée dans quatre classes de seconde (112 élèves de 15-16 ans) situées dans trois lycées de la ville de Bordeaux. Les séquences ont été animées par les enseignantes respon-

sables de ces classes après une préparation en commun avec le chercheur pour fixer le cadre suivant lequel la séquence devait être conduite et analyser *a priori* les connaissances et savoir-faire requis par la tâche demandée aux élèves. Cette analyse *a priori* (annexe 1) permet d'identifier les difficultés que les élèves sont susceptibles de rencontrer et de discuter des stratégies de guidage à mettre en œuvre pour les surmonter.

Le déroulement prévu pour la séquence était le suivant :

- les élèves réalisent les expériences proposées (annexe 2). Après chaque expérience ils indiquent par écrit l'aspect des substances avant la réaction, l'aspect des substances après la réaction, ce qu'ils ont observé pendant la réaction, ainsi que la façon dont ils interprètent ce qui se passe dans le tube à essais (annexe 3) ;

- après chaque expérience, une discussion entre les élèves pour expliquer ce qu'ils viennent de faire et d'observer, est conduite par l'enseignant avec le groupe classe ;

- après la séance de TP, une séance d'une heure est consacrée à reprendre l'ensemble des quatre expériences, les interprétations proposées et à écrire les noms des corps qui se forment, dans lesquels le cuivre intervient.

Pour aider les élèves dans cette dernière tâche, l'enseignant, au fur et à mesure de l'avancement de la discussion, construit avec eux le schéma de la figure 2, synthétisant les expériences réalisées et leur observation par les élèves.

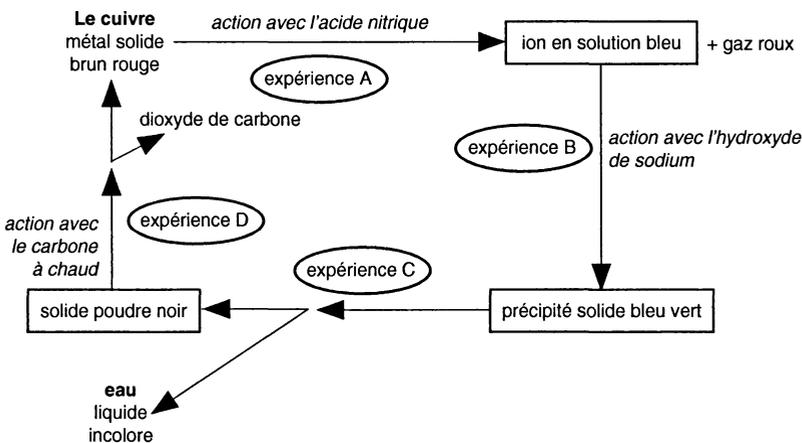


Figure 2 : Schématisation du « cycle du cuivre »

Dans l'élaboration de ce schéma, l'accent est mis sur ce qui arrive au cuivre, sur les transformations qu'il subit, sur l'aspect des substances dans lesquelles il intervient. Les noms des substances sont inscrits dans les rectangles, après discussion des expériences et en utilisant la conservation des éléments dans la réaction chimique construite à partir de la conservation de l'élément cuivre.

L'analyse de la séance de TP a reposé sur le recueil de différentes données :

- le recueil de l'ensemble des fiches d'observation des séances pour les quatre expériences,
- l'enregistrement du comportement de deux élèves pendant ces expériences,
- l'enregistrement du débat dans deux classes après chaque expérience,
- l'enregistrement dans deux classes de la discussion, après le TP, sur le cycle du cuivre.

2.2. L'analyse de la séance

Une première remarque générale concerne la qualité des observations faites par les élèves qui traduit leur réussite lors de l'exploration du réel. Sans que l'enseignant ait à intervenir pour « guider l'observation », ceux-ci notent correctement les modifications qui se produisent :

- dans l'expérience A : disparition des copeaux de cuivre, dégagement de gaz roux, coloration bleue de la solution, dégagement de chaleur ;
- dans l'expérience B : formation du précipité bleu ;
- dans l'expérience C : formation de gouttes d'eau, changement de couleur dans le tube ;
- dans l'expérience D : trouble de l'eau de chaux, formation de grains brun-roux.

Les activités nécessitant de faire appel à des connaissances déjà apprises sont correctement mises en œuvre par les élèves lorsqu'il s'agit de reconnaître une substance par ses attributs macroscopiques caractéristiques (associer la couleur bleue de la solution à la présence de l'ion cuivre II, associer la couleur brun-roux des grains au cuivre métal). Mais, pour plusieurs élèves, le contexte dans lequel la connaissance a été construite

intervient. Ainsi, si 34 élèves associent, dans l'expérience A, la couleur bleue à la présence de l'ion cuivre II dans la solution, 17 élèves pensent que cette couleur bleue indique la présence de sulfate de cuivre II. Nous interprétons cette erreur comme une non décontextualisation de cette connaissance : c'est souvent la solution de sulfate de cuivre qui est utilisée par l'enseignant comme solution prototypique pour présenter aux élèves l'ion cuivre II en solution. Par ailleurs, cette séance de TP comportait une seule activité de résolution de problèmes, « *comment sécher le précipité qui se forme dans l'expérience B ?* ». Les compétences nécessaires pour réussir appartiennent au domaine de la phénoménotéchnique et la quasi-totalité des groupes d'élèves pense à filtrer, puis sécher en étuve, ce précipité (cette opération avait déjà été rencontrée en biologie).

Une deuxième remarque concerne le besoin d'expliquer et l'envie de comprendre ce qu'il se passe. La transcription des échanges entre deux élèves pendant la réalisation des expériences, nous montre à la fois l'intérêt des élèves et la difficulté de la tâche qui leur est proposée « *comment raconter ce qui se passe dans le tube à essais ?* »

Le questionnement de ces élèves porte à la fois sur :

- la compréhension de ce qui est observé
« *Mais c'est quoi cette fumée rouge ?* » (expérience A)
« *Pourquoi c'est plus clair en haut ?* » (expérience B)
« *Mais pourquoi il remonte ?* » (Le précipité d'hydroxyde de cuivre dans l'expérience);
- la compréhension de ce qui se passe pendant la réaction chimique
« *Qu'est-ce qui se passe quand on met la soude ?* » (expérience B)
« *Mais pourquoi il y a de la vapeur d'eau ?* » (expérience C) ;
- la compréhension des conditions de la transformation chimique
« *Quand on chauffe, comment la transformation elle se fait ? Qu'est-ce qu'elle fait la chaleur ?* »

Cette interrogation spontanée des élèves s'accompagne du souci de bien faire, de ne rien oublier : « *Qu'est-ce qu'il faut voir d'autre ?* »

2.3. Analyse de la phase expérimentale

2.3.2. Par rapport au langage employé et au symbolisme chimique

Pour décrire les phénomènes observés les élèves ne possèdent pas de vocabulaire spécifique. Ils utilisent le vocabulaire de la vie de tous les jours. C'est particulièrement net dans l'observation de l'expérience A : « *le*

cuivre se dissout, se désintègre, est attaqué, est rongé, est décomposé ». Le responsable, bien sûr, c'est l'acide. Or, ce vocabulaire, inadapté, est le révélateur d'une représentation erronée de ce qui se passe dans la transformation chimique. Dans l'expérience A, parmi les élèves qui observent le dégagement du gaz brun-roux, il y en a douze pour lesquels « *le cuivre se transforme en gaz roux* ». Pour dix élèves « *l'acide devient bleu* ». Pour ces derniers il s'agit d'une transformation du cuivre, de l'acide. C'est toujours la même substance mais ses propriétés ont été modifiées au cours de la réaction chimique. Cette explication est fonctionnelle tant que l'élève reste au niveau de la perception et de la lecture immédiate du phénomène. L'étude historique a fait apparaître que cette idée, instituée par Aristote, d'une substance qui, en se « transformant », peut acquérir des propriétés nouvelles, a constitué, pour les chimistes, un obstacle à la construction du concept de substance. Pour Ostwald (1921) son franchissement ne sera possible que lorsque les chimistes se seront convaincus que c'est « *la nature de la substance qui détermine la nature de la propriété* », et que si les propriétés changent, alors, c'est que la substance a changé. Quand l'enseignant interroge les élèves sur la « *disparition* » du cuivre, les mots employés traduisent l'embarras des élèves :

- « *Il a pas le même aspect* »,
- « *C'est pas la même forme* »,
- « *C'est pas le même état* »,
- « *Ben, maintenant il est liquide, avant il était solide* »,
- « *Mais non, il est pas liquide, il aurait fallu le faire fondre* ».

De même, dans l'expérience B, huit élèves pensent que « *la soude a solidifié les ions cuivre* ». Pour ces élèves, l'action de la soude a modifié une des propriétés des ions cuivre II : ils étaient liquides et sont devenus solides.

L'analyse des productions écrites fait apparaître que, lorsqu'il s'agit de « décrire ce qu'il se passe » la plupart des élèves se contente de dessiner le dispositif expérimental en faisant apparaître les changements observés (couleur, état). La moitié des élèves utilise au moins une fois le nom des réactifs, mais aucun d'entre eux ne tente d'expliquer les phénomènes observés en utilisant les symboles chimiques. En début d'année de seconde, lorsqu'ils doivent décrire et expliquer les transformations chimiques, les élèves ne savent pas, ou ne pensent pas, à utiliser le symbolisme chimique, objet d'enseignement avec lequel ils sont pourtant confrontés depuis le début de la chimie au collège. Cet objet d'enseignement ne fonctionne pas encore comme un outil pour décrire une réaction observée.

2.3.2. Par rapport à la référence à la pratique antérieure

Au cours de la réalisation des expériences, la lecture des transformations est faite en référence à la pratique antérieure (activité de reproduction). La formation du gaz roux, récemment rencontrée par les élèves, est correctement décodée par la moitié de ceux-ci. Cette référence à la pratique antérieure peut prendre la forme d'un automatisme mental, véritable schème de lecture des phénomènes. C'est le cas pour le trouble de l'eau de chaux, immédiatement décodé par 47 élèves comme l'indicateur de la formation de dioxyde de carbone. Pour Aude et sa camarade, le fait d'utiliser de l'eau de chaux, annonce déjà la formation d'un précipité blanc :

- « – *On dirait que ça devient blanc.*
- *De toutes façons, avec l'eau de chaux, ça fait toujours blanc ! »*

Si nous rapprochons ce fonctionnement des élèves, de celui des schèmes décrits par Vergnaud (1990), c'est qu'il est, comme eux, largement inconscient. Les élèves ne s'interrogent pas pour savoir si leur décodage est cohérent avec la situation. Ainsi lorsqu'en chauffant le précipité d'hydroxyde de cuivre, une poudre noire se forme, la moitié des élèves déclare spontanément y voir l'indice de la présence de carbone. Là encore pour Aude et sa camarade il n'y a pas de doute à avoir :

- « – *Ça noircit, ça crame, c'est du carbone, il y a de la fumée qui vient du précipité.*
- *Ah oui ! il y a du carbone, c'est tout noir. »*

L'apparition de la couleur noire, associée à la flamme du bec bunsen, provoque automatiquement l'association, chauffage → couleur noire → carbone. Ce schème phénoménologique s'est construit au cours de l'enseignement antérieur (décomposition des corps organiques sous l'action de la chaleur en chimie et en biologie), mais aussi au cours des expériences de la vie courante dans lesquelles la décomposition par la chaleur d'une matière organique libère le carbone. Lors de la discussion collective de l'expérience, ce schème ne sera pas remis en cause par les 24 élèves qui font cette interprétation. Spontanément, ils se réfèrent aux perceptions immédiates :

- « – *Ben c'est noir, ça s'est calciné.*
- *Ben oui ça s'est carbonisé. »*

Face aux demandes d'explications de l'enseignant, les justifications des élèves sont alors formulées sur le mode de l'évidence :

- « – *Oui, car quand on le chauffe, ça devient noir et c'est la propriété des corps qui contiennent du carbone.*

– *Et d'ailleurs, quand on l'a chauffé, moi j'ai vu une incandescence et c'est la caractéristique du carbone. En plus, à la fin ça faisait comme des cendres.* »

C'est le même type de schème lorsque, dans l'expérience A, une solution de nitrate de cuivre se forme. Nous avons vu que, pour 17 élèves, c'est un automatisme mental qui les conduit à associer la couleur bleue de la solution à la présence de sulfate de cuivre. Pour nos deux élèves, qui n'ont pas encore construit cette association, solution bleue → sulfate de cuivre, c'est de leurs voisins que viendra la réponse :

- « – *Tu as vu, l'acide devient bleu.*
- *À côté, ils ont mis que c'est du sulfate de cuivre.*
- *Ah bon ?*
- *Oui, il paraît qu'on l'a vu au début de l'année.* »

2.3.3. Par rapport à la conservation du cuivre et des autres éléments

Dans l'expérience A, la conservation du cuivre ne pose pas de problèmes aux élèves. La moitié d'entre eux reconnaît que le cuivre est toujours présent, même si c'est sous une autre forme, la couleur bleue de la solution étant immédiatement associée à la présence d'ion cuivre II. Pour 25 élèves, cette permanence du cuivre s'apparente à une dissolution de celui-ci dans l'acide. Douze élèves affirment même reconnaître la présence de cuivre dans le gaz qui se dégage, dont ils identifient la couleur à celle du cuivre.

Dans l'expérience B, il n'y a plus que 10 élèves qui associent la couleur bleue du précipité à celle des ions cuivre II en solution. Six élèves parlent d'une « association » de la soude avec les ions cuivre II. Pour 12 élèves il s'agit d'une « *solidification* » des ions cuivre II par la soude et pour 2 élèves, au contraire, la soude « *casse* » les éléments et entraîne ainsi la formation d'un précipité. Au total, sur les 55 élèves ayant participé à ce travail, 16 élèves seulement font référence à l'existence du cuivre dans leurs explications.

Dans l'expérience C, la poudre n'est ni bleue ni brun-roux et plus aucun élève ne parle du cuivre, même pour s'interroger sur ce qu'il a pu devenir. La couleur noire n'évoque rien d'autres que du carbone, et 24 élèves en affirment la présence, tandis que 10 autres déclarent observer des cendres dans le tube.

Dans l'expérience D, le cuivre est à nouveau observé par 40 élèves. Sur ces 40 élèves 18 reconnaissent que le cuivre est présent au départ et à l'arrivée.

D'après ces résultats, la majorité des élèves semble ne concevoir la permanence du cuivre, que lorsque celui-ci est directement perçu à travers un signe macroscopique, nettement identifié (essentiellement la couleur). Ils ne sont plus que 10, pour affirmer que si le cuivre se retrouve à la fin, c'est qu'il doit être présent à chaque étape, même si on ne le voit pas. En fait, si la conservation n'est pas spontanément affirmée, son corollaire, le refus de la création spontanée est plus naturellement reconnu. Après l'expérience C, au cours de la discussion entre les élèves sur « *l'observation* » du carbone, la majorité des élèves qui s'expriment affirme la formation de carbone. Mais un premier élève s'étonne :

« *Pourtant il n'y a pas eu une diminution de volume.* »

Cet argument suivant lequel la formation de carbone avec production de cendres aurait dû s'accompagner d'une diminution du volume correspond à un de ces schèmes phénoménologiques qui permettent aux élèves de décoder l'information qu'ils reçoivent. Ici, ce schème, production de cendres → diminution du volume, va permettre de battre en brèche les certitudes des « pro-carbone ». Suite à cette réflexion un second élève exprime ses doutes au grand jour :

« *Mais moi, il y a un truc que je comprends pas : si on regarde tout ce qu'on a ajouté depuis le départ, il n'y a pas de carbone.* »

L'enseignant saute sur l'occasion pour souligner la contradiction qui vient d'être relevée. Un troisième élève énonce alors un avis péremptoire :

« *C'est contre les idées de Lavoisier : "rien ne se perd, rien ne se crée".* »

Dans le brouhaha qui suit sur cette phrase historique, un élève suggère à son camarade « *mais il y a aussi du cuivre, même si on le voit plus il s'est pas envolé !* ».

Cette réflexion faite à voix basse est ignorée par l'enseignant qui, à la fin du TP, devra revenir, pour l'institutionnaliser sur cette idée « *que quelque chose qui concerne le cuivre se conserve* ».

2.3.4. Par rapport au registre dans lequel les élèves se placent pour expliquer

Nous avons déjà noté que, si les élèves, pendant les expérimentations, se posent beaucoup de questions, celles-ci concernent essentiellement la phénoménologie observée. Par écrit, aucun élève n'a recours spontanément au registre microscopique, pour expliquer ce qui est observé au niveau macroscopique.

Un fonctionnement dans le registre microscopique qui fait obstacle à la réorganisation

Dans la discussion sur l'origine de l'eau formée par décomposition de l'hydroxyde de cuivre, les élèves sont troublés car ils savent que le précipité a été séché. Spontanément, dans leurs fiches d'observation, 25 élèves s'étaient posés cette question. Nous avons choisi cette situation car la réponse à cette question doit faire intervenir le niveau microscopique. En fait la discussion entre les élèves porte sur le sens de « sec » :

« – *Le produit était pas bien sec.*

– *Si, il était bien sec, c'est que l'eau elle était coincée dans le produit et en chauffant ça l'a fait sortir.*

– *Ben alors c'est qu'il était pas bien sec !*

– *C'est sûr, moi je pense qu'elle devait être captive quelque part. Il y a du cuivre accroché avec autre chose et au milieu il y a l'eau. Moi, je vois ça avec de l'eau enfermée au milieu d'autres molécules... Mais quand même ce n'est pas clair du tout. »*

Cette idée de particules (ici l'eau), coincée dans un solide et libérée par un agent extérieur est très prégnante chez les élèves de seconde. Nous la retrouverons la semaine suivante puis un mois plus tard, lors de l'étude d'un texte historique (Laugier, 2000b). Pour ces élèves, la transformation chimique consiste à mélanger ou séparer des substances, éventuellement représentées au niveau microscopique par une particule. Mais la cassure et la réorganisation à un niveau inférieur ne sont pas envisagées. Il s'agit là de la manifestation d'un obstacle, récurrent chez les chimistes jusqu'au XIX^e siècle : quand la transformation chimique est pensée au niveau microscopique, les particules caractéristiques des substances ne sont pas considérées comme des assemblages d'entités d'un niveau inférieur. Cette conception permet d'expliquer les différents états de la matière, mais fait obstacle à l'idée de réorganisation.

De plus, dans l'expérience considérée, l'apparition de l'eau par chauffage est quelque chose de banal aux yeux des élèves. Comme le dit l'un d'eux : « *de toute façon, en biolo, chaque fois qu'on chauffe du pain, des feuilles, tout ça, même quand c'est sec, il y a toujours de l'eau qui se dégage.* »

Pourtant, les deux élèves du groupe dont nous avons transcrit les échanges, ont essayé de raisonner en se plaçant dans ce registre microscopique :

« – *Les ions, ils deviennent un solide puisqu'ils forment un précipité, mais qu'est ce qui se passe quand on met la soude ?*

– *Et bien, elle casse tout et il y a des éléments de chaque truc, de chaque solution, qui s'assemblent et ils deviennent plus solides. »*

Mais cette tentative d'explication n'ira pas plus loin :

« *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.* »

Cette incapacité à circuler, entre le niveau microscopique et le niveau macroscopique, se retrouve dans l'entretien avec cette même élève, Aude, mené après la séance. À la question « Si je te demande d'imaginer ce qui se passe dans le tube à essais comment peux-tu le représenter ? » Aude répond : « *Pas du tout, je vois une poudre bleue qui devient noire mais je ne vois pas les petits ions qu'est-ce qu'ils font. On nous a montré des ronds pour les atomes, alors moi je vois des ronds mais c'est tout. En troisième on voyait des ronds, on disait c'est des atomes, mais je n'arrive pas à me servir de ça pour imaginer ce qui se passe dans une réaction.* »

Pour cette élève, l'existence du symbolisme représentant le niveau microscopique est connue, c'est un acquis de l'enseignement antérieur, mais le modèle et son fonctionnement, objet de ce symbolisme, ne l'est pas. Dans ces conditions le lien avec le niveau macroscopique ne peut pas être réalisé.

Aude résume bien son sentiment, face à une transformation de la matière : « *Moi je vois le début, je vois la fin, mais je ne vois pas le milieu.* »

Une autre manifestation de l'obstacle mécaniste

Ces élèves de seconde savent réaliser une expérience de chimie, sont capables de prélever les indices phénoménologiques macroscopiques qui leur permettent de reconnaître qu'ils ont affaire à une réaction chimique. Mais, pour expliquer, ils restent prisonniers du registre macroscopique, celui de la phénoménologie observée. Lorsqu'ils font des tentatives pour utiliser le niveau microscopique, ils cherchent à le « déduire » de ce qui peut être observé. Il s'agit là de la manifestation d'un obstacle rencontré par les chimistes « mécanistes » : vouloir attribuer à la particule du niveau microscopique des propriétés du niveau macroscopique afin d'assurer une cohérence entre le macroscopique perçu et le microscopique conçu (par exemple, pour le chimiste Lémery, le goût piquant de l'acide s'explique par les pointes dont seraient pourvues les particules représentatives de l'acide.) D'autre part, pour l'épistémologie contemporaine le modèle ne peut être induit par l'observation des phénomènes, il doit être « *librement inventé* ». Comme le souligne Einstein « *les concepts de physique sont des créations libres de l'esprit humain et ne sont pas comme on pourrait le croire uniquement déterminés par le monde extérieur* » (Einstein & Infeld, 1983, p. 34). Au cours de cette séance les élèves ont un mode de fonctionnement encore très éloigné de ce schéma de pensée.

2.4. Analyse de la discussion après la séance de TP

Une semaine plus tard, l'enseignante, au cours d'une discussion collective, revient sur l'interprétation de ce qui a été observé pendant le TP. Son projet, tel qu'elle l'annonce à ses élèves, c'est de comprendre ce qu'il faut retenir de ces expériences et de pouvoir écrire les noms des produits formés. Pour cela, elle va s'efforcer de mettre en place une sorte de routine, pour aider les élèves à trouver les noms des produits qui se forment à partir du cuivre métal, obtenu à la fin de l'expérience D. La méthode qu'elle propose est toujours la même :

- regarder ce que l'on obtient après la réaction,
- en inférer quelle devait être la composition des réactifs de départ,
- en déduire le nom sachant que ce nom doit refléter cette composition.

Cette routine s'appuie sur la conservation des éléments, généralisée à partir de celle de l'élément cuivre.

Une idée (très) générale de conservation

Dès le début de la séance, les élèves sont d'accord sur le fait que, au cours des quatre réactions étudiées, il y a bien conservation. La difficulté commence lorsqu'il s'agit de s'entendre sur la nature de ce qui se conserve.

« – Dans une réaction c'est toujours les mêmes produits au départ qu'à l'arrivée.

– C'est Lavoisier qui a dit ça.

– Il a dit aussi tout se transforme. »

(Nous avons été frappés au cours de ce travail par les ravages que cette phrase, couverte de l'autorité de Lavoisier, et réduite à la formule lapidaire « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* », faisait chez les élèves de seconde. Ainsi mémorisée elle sert aussi bien à justifier la conservation des réactifs de départ, que la transformation des éléments. Les élèves y auront plusieurs fois recours au cours du débat). L'enseignante, reprend ce qu'elle considère comme un manque de rigueur, au niveau du vocabulaire : « *ce ne sont pas les produits mais les éléments qui se conservent* ». Mais les élèves, comme exemple de conservation, citent aussi bien l'eau « *elle se conserve aussi, on la retrouve à la fin de l'expérience* » ou les ions nitrate car « *il y en a avant et il y en a après* ». Cette confusion oblige l'enseignante à abandonner son projet initial, écrire les noms des corps, pour revenir sur la notion de corps pur et la distinction avec celle d'élément.

Une confusion corps pur composé / mélange

Lorsqu'il s'agit de définir ce qu'est un corps pur, les élèves ignorent la définition au niveau macroscopique (par les critères de pureté). Spontanément, ils se tournent vers le niveau microscopique :

- « – *C'est constitué d'atomes et ils sont tous identiques.*
- *C'est plutôt quelque chose qui est constitué des mêmes molécules.*
- *Mais alors, est ce que l'eau ça peut être un corps pur ? »*

Ils ont du mal à admettre que l'eau, constituée de deux éléments différents, soit un corps pur tandis que l'air ne l'est pas. Nous retrouvons les difficultés déjà notées par Solomonidou (1991). Lorsque le nom est composé, comme pour le nitrate d'ammonium, les élèves imaginent qu'il s'agit d'un mélange de nitrate et d'ammonium. Le concept d'élément, qui vient d'être introduit, reste encore mystérieux : « mais alors un élément c'est comment ? »

L'enseignante, tente de s'appuyer sur le langage pour faire la distinction entre l'élément hydrogène et le corps pur dihydrogène, mais les questions des élèves fusent aussitôt.

- « *L'élément, c'est un corps simple alors ? »*
- « *Mais H₂O c'est un élément ? »*

Une nouvelle fois, l'enseignante explique la différence entre les corps purs et les éléments, renvoie la compréhension finale à l'utilisation prochaine des modèles moléculaires et revient à son projet initial de trouver les noms des produits contenant du cuivre formés au cours des quatre réactions chimiques.

Un obstacle institué par le langage chimique

La recherche des éléments présents dans les composés plaît aux élèves, ils y trouvent une logique et une rigueur qui les rassurent après les difficultés d'interprétation à chaud des expériences réalisées pendant le TP. Sous la conduite de l'enseignante, les élèves remontent la filière des composés du cuivre. Mais cette réussite apparente cache un obstacle non franchi. Lorsqu'il s'agit de retrouver le nom de l'hydroxyde de cuivre un élève fait une proposition :

« *En chauffant on a obtenu de l'eau et de l'oxyde de cuivre donc il devait y avoir du... euh ! Du oxyde de hydro cuivre.* »

Comme l'enseignante lui demande de justifier sa proposition il reprend :

« *Et bien il y avait forcément de l'eau et de l'oxyde de cuivre puisqu'on peut les séparer donc je pense que le précipité bleu vert c'était de l'oxyde hydro cuivre.* »

Derrière cette réussite apparente (l'enseignante rectifiera la proposition en donnant le nom définitif hydroxyde de cuivre), nous retrouvons l'idée, exprimée dans la classe à plusieurs reprises, selon laquelle les deux substances, eau et oxyde de cuivre, étaient rassemblées, mêlées dans l'hydroxyde comme si celui-ci était un mélange dont les composants se séparent par chauffage. Malgré sa valeur heuristique certaine, et nous avons pu le vérifier au cours de cette séance d'enseignement, l'utilisation correcte du langage chimique n'exclut pas le renforcement de représentations erronées. La syntaxe du langage chimique peut conduire les élèves à l'idée que la particule constitutive d'un composé chimique est formée par la simple juxtaposition des deux particules des réactifs de départ. Et cette idée fait obstacle à la représentation de la réaction chimique en termes de réorganisation interne des particules. Les élèves reprennent ici à leur compte la représentation des chimistes, comme par exemple Thénard (1834) qui expliquait la formation de la particule de sulfate de mercure par la juxtaposition de deux particules : « l'atome » d'acide sulfurique SO_3 et « l'atome » de protoxyde de mercure HgO .

Dans un travail sur l'interprétation de la réaction de réduction de l'oxyde de cuivre par le carbone, P. Fillon (1997) a également observé que le langage chimique pouvait fonctionner comme un obstacle pour les élèves. Lorsque l'enseignant fait étudier la réaction $2 \text{CuO} + \text{C} \rightarrow 2 \text{Cu} + \text{CO}_2$, s'il nomme l'oxyde de cuivre II, monoxyde de cuivre, alors les élèves, par réciprocité, sont conduits à prévoir la formation de monoxyde de carbone en écrivant : monoxyde de cuivre + carbone \rightarrow monoxyde de carbone + cuivre. Le travail de Fillon est intéressant car, lorsqu'il s'agit d'expliquer l'origine de l'oxygène qui intervient dans la formation du dioxyde de carbone, les 3 élèves qu'il a observés ont éprouvé des difficultés, liées à une utilisation incorrecte du langage, pour admettre que l'oxygène ne venait pas de l'air : s'il se forme du dioxyde de carbone, comme le monoxyde de cuivre contient un seul oxygène, un autre oxygène doit être fourni par le dioxygène de l'air. Dans le cas de notre étude, la discussion autour de cette question s'est faite au sein du groupe classe, et c'est l'enseignante qui, par son questionnement, a guidé la réflexion des élèves. Lorsque l'enseignante pose la question de l'origine de l'oxygène, les réponses des élèves sont variées :

- « – De l'air !
- De l'acide nitrique ?
- Peut-être de la poudre noire ? »

L'enseignante : « Alors comment choisir ?
– S'il n'y avait que du cuivre elle serait pas noire ! »

L'enseignante : « Ah ? Rappelez-vous, avant de chauffer le tube qu'est ce que je vous ai dit ? »

– *Qu'il fallait faire attention pour pas que l'eau de chaux remonte dans le tube.*

– *Oui on a chauffé tout le temps, même qu'au début ça faisait des grosses bulles d'air. »*

L'enseignante : « – *Et après ?*

– *Pendant les grosses bulles ça faisait rien et après l'eau de chaux a commencé à devenir blanche. »*

L'enseignante : « – *Et alors comment vous expliquez ça ?*

– *Peut-être que l'oxygène il est venu après, quand dans le tube la poudre noire est devenue toute rouge.*

– *Alors dans la poudre noire il y avait de l'oxygène ? »*

L'enseignante : « – *C'est ce que nous allons admettre. Comment pourrait-on appeler cette poudre noire si elle contient de l'oxygène ?*

– *De l'oxyde de cuivre. »*

Cet extrait de la discussion entre les élèves et l'enseignante illustre le rôle du guidage de cette dernière. Les élèves, seuls, n'ont pas les moyens de réussir, et l'enseignante doit intervenir.

3. CONCLUSION

L'analyse *a priori* nous a permis de lister les tâches que les élèves doivent accomplir pendant le TP. L'exploration du réel sous ses diverses formes est réussie mais des difficultés se manifestent lorsqu'il s'agit de relier cette exploration à des connaissances déjà rencontrées. Certaines, comme les schèmes phénoménologiques que nous avons décrits, ont une origine didactique. C'est par référence à l'enseignement antérieur que les élèves associent le résidu noir à la formation de carbone (d'ailleurs quelques mois plus tard, lors du TP sur les substances organiques, l'enseignant demandera explicitement aux élèves de faire fonctionner ce schème pour l'ériger en méthode permettant d'inférer la présence de carbone dans les substances chauffées). Le schème phénoménologique permet à l'élève une explication immédiate de la phénoménologie observée (couleur bleue de la solution → ions cuivre II, apparition de la couleur noire → carbone, précipité blanc de l'eau de chaux → formation de dioxyde de carbone, etc.) Ces difficultés ne sont pas toutes surmontées, et sont parfois le révélateur d'obstacles récurrents.

Au niveau macroscopique, l'obstacle perceptif

C'est le cas pour l'idée qu'une substance peut changer de propriétés, sans changer d'identité. C'est toujours la même substance, mais une ou

plusieurs de ses propriétés ont été modifiées au cours de la réaction chimique (le cuivre dans l'expérience A). Cette idée est compatible avec la conceptualisation de la réaction chimique au niveau macroscopique, et si les élèves restent à ce niveau l'obstacle peut être contourné. Le comportement des élèves que nous avons observés, de ce point de vue, est conforme à ceux décrits par différents auteurs (Solomonidou, 1991 ; Pfundt, 1981 ; de Vos & Verdonk, 1985a, 1985b). Globalement les élèves partagent l'idée d'une conservation de la matière et se réfèrent, pour se justifier, au « *rien ne se perd* ». Ainsi ils approuvent l'idée de la conservation du cuivre, retrouvé sous forme métal à l'expérience D. Mais cette idée naturelle de conservation ne les empêche pas d'imaginer l'apparition du carbone au cours de l'expérience C. En fait, l'idée de conservation est directement liée à la perception. Lorsqu'il n'y a plus d'évidence perceptive (plus de couleur caractéristique pour le cuivre dans l'expérience C), la substance est ignorée, inversement quand l'évidence perceptive est forte (couleur noire attribuée au carbone dans cette même expérience C), la substance est inventée.

Au niveau microscopique, l'obstacle mécaniste

Nous souhaitons regarder comment se comportaient les élèves, lorsque la conceptualisation de la transformation chimique devait se faire au niveau microscopique. Ces élèves, à la différence des partisans de la chimie science des réactions, puis des équivalentistes du XIX^e siècle, ne refusent pas d'imaginer la transformation chimique au niveau microscopique. Mieux, au cours de cette séquence, nous observons la confirmation de ce qu'une enquête réalisée en début d'année a révélé (Laugier, 1998) : les élèves attribuent la source de leurs difficultés à leur non-maîtrise de ce niveau. Deux obstacles ont été repérés :

– un obstacle typiquement mécaniste : un seul type de particules est utilisé par les élèves, celui qui correspond au premier niveau microscopique, celui de la molécule, particule homogène porteuse des propriétés macroscopiques de la substance. C'est très net dans le cas de la formation d'eau (expérience C). Si de l'eau se forme, nécessairement les particules d'eau devaient être « coincées » dans les produits de départ ;

– un obstacle typiquement épistémologique : les élèves cherchent à déduire la description du niveau microscopique, de l'observation macroscopique. Cet obstacle repose sur la croyance selon laquelle, en science, l'observation est à la base de la connaissance, c'est elle qui doit permettre de décrire le réel : si l'observation de la transformation chimique ne me montre pas ce qui se passe au niveau micro, alors je ne peux pas réussir à utiliser ce niveau micro qui m'est inaccessible. C'est la position d'Aude : « *Moi je vois le début, je vois la fin, mais je vois pas le milieu* », sous-entendu, je ne peux pas m'en sortir.

Des avancées permises par le débat dans la classe

Tout ne se fait pas « sur la paillasse », pendant le TP. Nous avons demandé à l'enseignante de poser un certain nombre de questions et nous avons regardé comment les élèves réagissent à ces questions. C'est le cas pour la question « d'où vient l'eau ? ». Il ne s'agit pas d'une lecture imposée, elle doit permettre aux élèves d'exprimer leur représentation du phénomène, en petit groupe, puis dans le cadre de la classe et les interactions entre élèves sont très importantes. La transcription du débat montre quel est l'obstacle contre lequel bute l'élève, mais s'il ne permet pas toujours de le lui faire franchir, ce débat aide l'élève à identifier l'obstacle. À la fin de la séance, le doute s'est instauré dans la classe sur l'existence réelle des particules d'eau, « toutes faites », dans le précipité, si celui-ci était sec.

Le second type d'obstacle, rencontré par les élèves au cours de cette séquence, relève de l'obstacle mécaniste trivial, décrit dans l'étude historique, mais nous le qualifierons d'obstacle réaliste car il ne se manifeste pas exactement de la même façon. Les élèves, comme les chimistes mécanistes du XVII^e siècle (Descartes, Lémery), cherchent à déduire la description au niveau microscopique de l'observation du niveau macroscopique, mais à la différence des équivalentistes du XIX^e siècle, ils ne s'enferment pas *a priori* dans l'obstacle positiviste en refusant d'imaginer un modèle qui fonctionne. Simplement, en ce début d'année, ils butent sur cet obstacle réaliste qu'ils n'ont pu encore identifier, même à la suite du débat.

Des lacunes dans les connaissances, sources de difficultés supplémentaires

La discussion autour de l'expérimental et de son interprétation a très vite révélé la non maîtrise par les élèves des concepts de base de la chimie. La confusion corps pur simple/élément et corps pur composé/mélange, oblige l'enseignante à modifier son projet initial. Ces élèves de seconde ne disposent pas des critères macroscopiques pour caractériser les corps purs et les mélanges. Mais nous notons que, dans leurs tentatives pour clarifier ces concepts macroscopiques, ils tentent d'utiliser le registre du niveau microscopique. Même s'ils n'y parviennent pas, nous pensons qu'il s'agit là d'une indication intéressante quant à la possibilité de construction du concept d'élément chimique dont la définition emprunte aux deux niveaux. La mise en place d'activités permettant aux élèves de circuler entre ces différents niveaux, dans une démarche constructiviste de résolution de problèmes, devrait les aider à dépasser ces obstacles.

En conclusion, il nous paraît également important de revenir sur la place des discussions entre élèves dans la construction des connaissances. Ce TP sur le cycle du cuivre est un TP classique en classe de seconde. Du

point de vue des enseignants il ne pose pas de problème : la notion d'élément est naturellement déduite de la conservation du cuivre, elle-même facilement observée par les élèves. Dans un enseignement traditionnel, pour des raisons d'efficacité, de durée, les seuls échanges se font à l'initiative de l'enseignant qui guide les élèves dans l'observation et dans l'interprétation des expériences. Ce mode de fonctionnement ne permet pas aux conceptions des élèves de s'exprimer et le risque est alors grand de voir s'instaurer dans la classe un décalage entre le projet de l'enseignant et les préoccupations des élèves. La liberté qui leur a été donnée dans cette séquence d'enseignement de discuter librement entre eux, d'imaginer des interprétations possibles leur a permis de poser et se poser des questions « *productives* » sur le plan conceptuel. La construction par les élèves du concept d'élément, ce « *noumène chimique* » dont parle Bachelard, passe par une réorganisation conceptuelle qui ne se conçoit que dans la réflexion critique et dans la durée. Si la rénovation de l'enseignement de chimie passe par une rénovation des programmes elle ne pourra pas faire l'économie d'une réflexion sur ses modalités.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON B. (1990). Pupil's Conceptions of Matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, n° 18, pp. 53-85.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BACHELARD G. (1951). *L'activité rationaliste de la physique contemporaine*. Paris, PUF.
- BACHELARD G. (1973). *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*. Paris, Vrin, 2^e édition.
- BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éds), *Élaboration et justification des modèles*. Paris, Maloine.
- BEN ZVI R., EYLON B. & SILBERSTEIN J. (1982). *Student conceptions of gaz and solid. Difficulties to function in a multi-atomic context*. Paper presented in NARST conference, Lake Geneva, IL.
- BEN-ZVI R., EYLON B. & SILBERSTEIN J. (1988). Theories, principles and laws. *Education in chemistry*. n° 25, pp. 89-92.
- BROUSSEAU G. (1983). Les obstacles épistémologiques et les problèmes en mathématiques. *Recherche en Didactique des Mathématiques*. vol. 4, n° 2, pp. 165-198.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1999). *Programmes de physique-chimie. Classe de seconde*, n° 6, p. 13.
- CROS D., CHASTRETTE M. & FAYOL M. (1988). Conception of second year University Students of some fundamental notions in chemistry. *International Journal of Science Education*, n° 10, pp. 331-336.
- DE VOS W. & VERDONK A. (1985a). A new road to reactions 1. *Journal of chemical education*, vol. 62, n° 3, pp. 238-240.
- DE VOS W. & VERDONK A. (1985b). A new road to reactions 2. *Journal of chemical education*, vol. 62, n° 8, pp. 648-649.

- EINSTEIN A. & INFELD L. (1983). *L'évolution des idées en physique*. Paris, Flammarion.
- FILLON P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *Aster*, n° 25, pp. 113-141.
- HALBWACHS F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In M. Bunge, F. Halbwachs, Th. Kuhn, J. Piaget & L. Rosenfeld (Éds), *Les théories de la causalité*. Paris, PUF, pp. 39-111.
- HALBWACHS F. (1973). L'histoire de l'explication en physique. In *L'explication dans les sciences*. Paris, Flammarion, pp. 77-81.
- 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.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000a). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 94, pp. 1261-1284.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000b). Practical works and representation of chemical reaction in the macroscopic and microscopic levels : a study with fourth form students. *Chemical Education Research And Practice In Europe*, vol. 1, n° 1, pp. 61-75.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2001). D'Aristote à Mendéléév ; 2000 ans de symbolisme pour représenter la matière et ses transformations. *L'Actualité Chimique*, mars, pp. 38-50.
- LÉMERY N. (1757). *Cours de Chymie*. Nouvelle édition revue par M. Baron, Paris, L.-C. d'Houry, fils.
- MARTINAND J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, n° 2, pp. 89-99.
- NOVICK S. & NUSSBAUM J. (1978). Junior on Highschool Pupil's understanding of the particulate nature of matter. And an interview study. *Science Education*, n° 62, pp. 273-281.
- OSTWALD W. (1921). *L'évolution d'une science : la Chimie*. Traduction française de l'édition allemande de 1909, Paris, Flammarion.
- PFUNDT H. (1981). The atom – the final link in the division process or the first building block ? *Chemical Didactica*, n° 7, pp. 75-94.
- PULLMAN B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris, Fayard.
- RENSTRÖM L., ANDERSSON B. & MARTON F. (1990). Student's Conceptions of Matter. *Journal of Educational Psychology*, vol. 82, n° 3, pp. 555-569
- SAVOY L.-G. & STEEPLES B. (1994). Concept hierachies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, n° 75, pp. 97-103.
- SÉRÉ M.-G. (1985). « *Les conceptions de l'état gazeux chez les enfants de 11 à 13 ans* ». Thèse de doctorat d'état, Université Paris VII.
- SOLOMONIDOU C. (1991). *Comment se représenter les substances et leurs interactions ?* Thèse, Université Paris VII.
- STAVRIDOU H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*. Thèse, Université Paris VII.
- THÉNARD L.-J. (1834). *Traité de Chimie élémentaire, théorique et pratique* (6^é édition). Paris, Crochard.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des mathématiques*, vol. 10, n° 23, pp. 133-170.

ANNEXE 1 : L'ANALYSE A PRIORI

| Analyse des tâches | | |
|--|---|--|
| Description de l'expérience | Savoir faire | Activités cognitives |
| Expérience A : réaction entre la solution d'acide nitrique et le cuivre métal. | Verser proprement une solution concentrée d'acide dans un tube à essais. | <i>Exploration du réel, extractive et divergente :</i> observer la disparition progressive des copeaux de cuivre métal, l'apparition de la couleur bleue, la formation d'un gaz roux. <i>Reproduction :</i> associer la couleur bleue de la solution à la présence d'ions cuivre II en solution, l'effervescence à la formation d'un gaz. <i>Conceptualisation au niveau macroscopique :</i> étiqueter les transformations observées (effervescence, changement de couleur, disparition, formation de produits nouveaux), comme réaction chimique. <i>Mobilisation :</i> associer le nom, nitrate de cuivre, à sa composition. |
| Expérience B : réaction entre la solution bleue précédente et l'hydroxyde de sodium. | Verser lentement la solution pour observer la formation progressive du précipité. | <i>Exploration du réel, extractive et divergente :</i> observer la formation du précipité bleu. Noter les différentes teintes de bleu dans le tube à essais. <i>Reproduction :</i> associer les différentes teintes de bleu à la présence de substances différentes (ions cuivre II en solution et précipité d'hydroxyde de cuivre). <i>Conceptualisation au niveau macroscopique :</i> étiqueter les transformations observées (changement de couleur, formation de produits nouveaux), comme réaction chimique. |
| Récupération de l'hydroxyde de cuivre et séchage. | Réaliser une filtration. Sécher un précipité. | <i>Résolution de problèmes :</i> comment séparer le précipité de la solution ? Il faut réaliser une filtration. Puis le sécher ensuite dans une étuve. <i>Reproduction :</i> associer la filtration à la séparation des produits de la réaction, associer le séchage en étuve à l'élimination de l'eau présente sous forme liquide dans le précipité. |
| Expérience C : décomposition de l'hydroxyde de cuivre par chauffage. | Chauffer modérément dans la flamme d'un bec bunsen le contenu d'un tube à essais. | <i>Exploration du réel, extractive et divergente :</i> observer le changement de couleur de la poudre, la formation de gouttes de liquide transparent sur les parois du tube. <i>Reproduction :</i> associer l'apparition des gouttes à la formation d'eau. <i>Conceptualisation au niveau macroscopique :</i> étiqueter les transformations observées comme réaction chimique (changement de couleur, disparition, formation de produits nouveaux). <i>Mobilisation :</i> l'eau est formée à partir de dihydrogène et de dioxygène. <i>Conceptualisation au niveau microscopique :</i> concevoir que si de l'eau se forme par chauffage du précipité, préalablement séché, c'est que les éléments constitutifs de l'eau sont présents dans ce précipité. <i>Mobilisation :</i> associer le nom hydroxyde de cuivre à la composition. |
| Expérience D : réduction de l'oxyde de cuivre par le carbone. | Chauffer jusqu'à l'incandescence en évitant le retoulement. | <i>Exploration du réel, extractive et divergente :</i> observer le trouble de l'eau de chaux, repérer la formation de grains brun-roux. <i>Exploration du possible :</i> distinguer la réaction entre l'oxyde de cuivre et le carbone, de celle du test du dioxyde de carbone par l'eau de chaux. <i>Reproduction :</i> associer le trouble de l'eau de chaux à la formation de dioxyde de carbone, associer la couleur brun-roux des grains à la présence de cuivre métal. <i>Exploration inférentielle du réel :</i> inférer la formation de dioxyde de carbone à partir du trouble de l'eau de chaux. <i>Conceptualisation au niveau macroscopique :</i> étiqueter les transformations observées comme réaction chimique (incandescence des deux poudres noires, formation d'un précipité blanc, formation de produits nouveaux). <i>Mobilisation :</i> le dioxyde de carbone est formé à partir de carbone et de dioxygène. Relier le nom de ce composé aux éléments qui le composent. <i>Conceptualisation au niveau microscopique :</i> concevoir que si on observe des grains de cuivre c'est que ce dernier n'avait pas disparu. Quelque chose qui le concerne s'est conservé au cours de ces réactions. Concevoir que cette conservation observée dans le cas du cuivre peut être généralisée aux autres éléments et constitue une loi de la réaction chimique. Concevoir que si du dioxyde de carbone se forme c'est que les éléments constitutifs étaient présents dans le milieu réactionnel. Concevoir que si le carbone provient du carbone ajouté, l'oxygène, lui, provient de la poudre noire obtenue à la fin de l'expérience de chauffage du précipité d'hydroxyde de cuivre. <i>Mobilisation :</i> associer le nom oxyde de cuivre à sa composition. |

ANNEXE 2 : LES FICHES FOURNIES AUX ÉLÈVES

Expérience A

Les produits utilisés :

des copeaux de cuivre
une solution d'acide nitrique

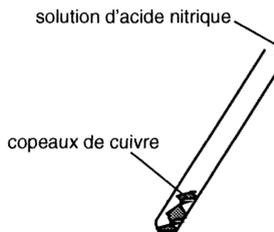
Le matériel :

un tube à essais
une pince

L'expérience

Placer dans le tube à essais quelques copeaux de cuivre. Puis verser **avec précaution** la solution d'acide nitrique de façon à juste recouvrir les copeaux de cuivre.

Remplir la fiche d'observation



Expérience B

Les produits utilisés :

une partie de la solution bleue précédente
une solution d'hydroxyde de sodium

Le matériel :

un tube à essais

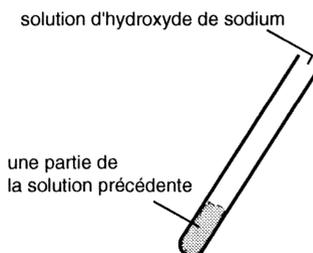
L'expérience :

Verser dans un tube à essais une partie de la solution obtenue à la fin de l'expérience A. Ajouter **lentement et avec précautions** quelques gouttes de la solution d'hydroxyde de sodium.

Ne pas agiter.

Remplir la fiche d'observation

Comment peut-on récupérer le précipité qui se forme ?



Expérience C

Les produits utilisés :

Le précipité obtenu à la fin de l'expérience B, récupéré dans le papier filtre et bien sec.

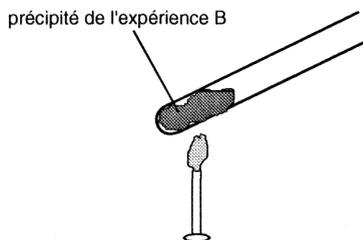
Le matériel :

un bec bunsen
une pince en bois
un tube à essais

L'expérience :

Dans un tube à essais placer le précipité et le chauffer sur le bec bunsen en tenant le tube avec les pinces.

Remplir la fiche d'observation



Expérience D

Les produits utilisés

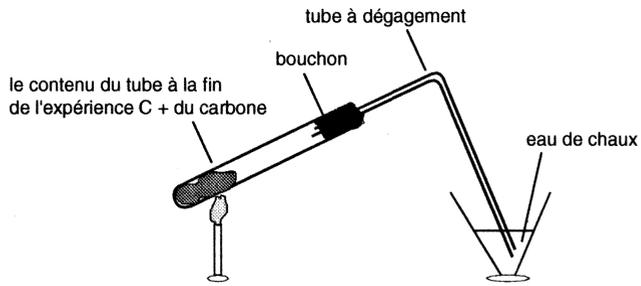
le contenu du tube à la fin de l'expérience C
du carbone en poudre
de l'eau de chaux

Le matériel :

tube à essais – spatule –
tube à dégagement –
verre à pied – bec
bunsen – pince en bois.

L'expérience :

- Ajouter dans le tube à essais de l'expérience C, du carbone en poudre. Mélanger avec soin les deux poudres.
 - Adapter à l'extrémité du tube à essais, le tube à dégagement.
 - Verser de l'eau de chaux dans le verre à pied.
 - Chauffer fortement le contenu du tube *en maintenant* l'extrémité du tube à dégagement dans l'eau de chaux.
- Ensuite retirer le tube à dégagement de l'eau de chaux **SANS ARRÊTER DE CHAUFFER, PUIS** arrêter le chauffage.
- Laisser refroidir quelques minutes, puis verser le contenu du tube sur une feuille de papier blanc.
- Remplir la fiche d'observation.



ANNEXE 3 : CE QU'ÉCRIVENT LES ÉLÈVES APRÈS CHAQUE EXPÉRIENCE

Expérience A

| | |
|--|-----------|
| Le cuivre se dissout dans l'acide nitrique. | 25 élèves |
| Le cuivre se désintègre. | 06 élèves |
| Le cuivre est attaqué par l'acide. | 18 élèves |
| Le cuivre est rongé par l'acide. | 12 élèves |
| Le cuivre est décomposé par l'acide. | 08 élèves |
| Le cuivre se transforme en gaz roux (gaz de la couleur du cuivre). | 12 élèves |
| Du dioxyde d'azote, gaz roux, se dégage. | 24 élèves |
| Observation d'une effervescence. | 40 élèves |
| L'acide devient bleu. | 10 élèves |
| La solution bleue qui se forme indique la présence d'ions cuivre II. | 34 élèves |
| Formation de sulfate de cuivre. | 17 élèves |
| Dégagement de chaleur. | 26 élèves |
| Une nouvelle substance se forme à partir du cuivre et de l'acide. | 04 élèves |

Expérience B

| | |
|--|-----------|
| Formation d'un précipité bleu. | 55 élèves |
| La couleur bleue du précipité est due au cuivre. | 10 élèves |
| La soude s'associe avec des éléments de la solution bleue. | 06 élèves |
| La soude a solidifié les ions cuivre. | 12 élèves |
| La soude « casse » les éléments en créant un précipité. | 02 élèves |

Expérience C

| | |
|--|-----------|
| La poudre noire indique la formation de carbone. | 24 élèves |
| Formation d'eau observée sous forme de gouttes sur les parois du tube. | 48 élèves |
| Déclarent la formation de cendres. | 10 élèves |
| Le précipité a brûlé. | 10 élèves |
| Se posent la question « d'où vient cette eau si le corps est sec ? ». | 25 élèves |
| Déclarent que l'eau vient de l'humidité de l'air. | 06 élèves |
| Déclarent que l'eau existait dans le précipité. | 08 élèves |

Expérience D

| | |
|--|-----------|
| Observent les grains de cuivre. | 40 élèves |
| Notent le trouble de l'eau de chaux. | 49 élèves |
| Formulent la formation de dioxyde de carbone. | 47 élèves |
| Observent un dégagement de vapeur d'eau | 12 élèves |
| Notent qu'il y a dans ces quatre expériences du cuivre au départ et à l'arrivée. | 18 élèves |
| Précisent qu'il s'agit d'une chaîne dans laquelle le cuivre est toujours présent à chaque étape. | 10 élèves |

Cet article a été reçu le 6 juin 2002 et accepté le 20 juillet 2002.