

PRÉSENTATION DU NUMÉRO

Enseignement et réaction chimique : une délicate alchimie

Dominique Rebaud

La réaction chimique est un concept central dans l'étude des transformations de la matière. Les différents articles de ce numéro tentent d'apporter quelques éclairages autour de ce concept, y compris sur le plan historique. Certains auteurs analysent les sources de difficultés rencontrées dans l'enseignement de la chimie, tentent d'en donner des interprétations et apportent des éléments de réponse dans des propositions didactiques. D'autres ont centré leurs recherches sur l'étude de la mise en œuvre effective de certaines de ces propositions. Un auteur s'attache au problème de la formation des enseignants, un des domaines d'investigation de la didactique, sur le plan propositionnel, encore peu exploré.

Ainsi, des points de vues sur les relations entre les trois pôles (élève, savoir, enseignant) du triangle didactique sont plus ou moins largement évoqués dans ce numéro.

Les difficultés de l'enseignement de la chimie

un concept
difficile à
cerner...

L'article de R. Viovy et J. Carretto montre que le concept n'est pas simple à définir. Il renvoie au concept d'espèce chimique "pivot central" de la réaction chimique. La reconnaissance sur le plan macroscopique d'une espèce chimique suppose de prendre en considération un grand nombre de paramètres qui font appel à d'autres notions et entre autres à celle de changement d'état et de mélange. Les auteurs soulignent qu'au niveau microscopique, l'individualité des entités est délicate à déterminer même pour le chimiste : quand on casse des liaisons hydrogène, crée-t-on une nouvelle entité ? Si la dissolution du sucre dans l'eau se fait sans modification de structure, il n'en est pas de même de celle du sulfate de cuivre anhydre qui peut être envisagée comme une "véritable" réaction chimique. L'ion complexe formé par des liaisons de coordinence entre l'ion et les molécules d'eau donne une entité nouvelle bien définie qui confère une couleur bleue à la solution.

au plan
microscopique...

et
macroscopique

"L'aspect multiforme" du phénomène chimique, analysé par les auteurs, implique pour l'enseignement l'impossibilité d'isoler un noyau de réactions simples qui commanderait le reste de l'étude et qui s'étofferait d'un ensemble de réactions présentant des difficultés conceptuelles croissantes. Pour appréhender le phénomène chimique, il serait nécessaire de

certains aspects sont négligés dans l'enseignement	<p>décrire la réaction chimique en prenant en compte l'initiation, la terminaison et la cinétique dans un langage propre à la chimie, dont le langage symbolique n'est qu'une facette à laquelle les auteurs associent le langage expérimental. Pour ces auteurs, le début de l'enseignement de la chimie privilégie l'aspect statique de la réaction (état initial-état final) en gommant l'aspect dynamique, alors que l'étude des conditions expérimentales permettrait aux élèves de clarifier la signification de l'équation-bilan qui traduit une stoechiométrie rarement réalisée dans les réactions qui leur sont proposées.</p>
l'équation-bilan : un concept intégrateur...	<p>R. Barlet et D. Plouin examinent les concepts sous-jacents au concept d'équation-bilan, base de tout travail quantitatif en chimie : atome, molécule, mole, quantité de matière et calculs afférents, réaction univoque ou réversible. Les auteurs précisent que l'on retrouve dans ce concept la dualité macroscopique-microscopique spécifique à la chimie, car en effet <i>"si on veut dépasser le bilan matière et donner du sens à l'équation de la réaction, il convient de recourir au niveau atomique et moléculaire"</i>. Cette dualité est une source de difficultés pour les élèves car elle demande une grande capacité d'abstraction. La polysémie du concept d'équation-bilan (analysée par les auteurs) est source de richesse mais devient obstacle pour les élèves. En effet par exemple, l'équation suivante : réactifs $\xrightleftharpoons[2]{1}$ produits, symbolisant un ensemble de deux réactions menant à un équilibre chimique peut, par son aspect bilan jouer un rôle d'écran par rapport à l'aspect dynamique. L'aspect stationnarité macroscopique occulte dans l'esprit des élèves la cinétique des réactions 1 et 2 dont les vitesses sont égales quand l'équilibre est atteint. Comme pour les auteurs précédents, mais à un autre niveau, c'est encore l'aspect dynamique de la réaction qui n'est pas appréhendé. R. Barlet et D. Plouin examinent la construction du concept d'équation-bilan non limité aux réactions totales dans les nouveaux programmes français et répertorient les types de difficultés et les erreurs persistantes jusqu'à l'université à partir de leurs travaux et de ceux d'autres recherches. Ils préconisent un va-et-vient continu entre l'aspect microscopique et l'aspect macroscopique de la réaction chimique pour lequel l'équation-bilan est un support privilégié. Ils font aussi quelques propositions en ce qui concerne le langage (actuellement porteur d'ambiguïtés) car celui-ci interagit fortement avec le concept.</p>
non perçu comme tel par les élèves...	<p>C'est aussi le point de vue de C. Larcher qui examine sur le plan conceptuel les conséquences de la non distinction entre les registres des phénomènes, des représentations symboliques, et du modèle à propos des équilibres chimiques et du verbe "équilibrer" une réaction. Si certains glissements de vocabulaire circulant dans ces trois registres sont possibles entre scientifiques parce qu'ils possèdent le même savoir, il convient d'être vigilant en situation scolaire.</p>
pourtant source de richesses...	
si les registres de description de la réaction sont différenciés	

du côté des
représentations...

Deux articles portant sur l'étude des conceptions des élèves sur la notion de substance pure (ce que d'autres désignent par "espèce chimique") montrent, que ce concept, pourtant clé de la réaction chimique, n'est pas construit. Parmi les cinq critères de catégorisation d'une substance pure, relevés par E. Roletto et B. Piacenza auprès d'élèves italiens de l'enseignement technique, le seul qui renvoie à un vocabulaire et un registre scientifique est erroné. En effet seuls les corps simples sont envisagés comme substances pures et les corps composés sont assimilés à des mélanges de corps simples. Un seul mot en italien "*elemento*", désignant aussi bien l'élément que le corps simple, renforce certainement cette représentation. D'autre part les élèves ne font pas spontanément appel, remarquent-ils, au modèle particulière. Ces travaux rejoignent ceux de C. Solomonidou et H. Stavridou qui ont constaté entre autres, par l'analyse de représentations qu'elles ont faite auprès d'élèves de 12 à 18 ans (grecs et français), qu'un élève peut donner une définition correcte de la réaction chimique sans que celle-ci soit opérationnelle pour catégoriser différentes transformations : le concept de substance au niveau manipulateur n'étant pas construit. Ce qui, pour les auteurs, ne favorise pas la mise en correspondance par les élèves des deux niveaux de la description de la réaction : celui du phénoménologique et celui du modèle.

un concept clé
non construit

un modèle qui a
perdu son statut
épistémologique

Les auteurs de plusieurs articles (R. Viovy et J. Carretto, E. Roletto et B. Piacenza, C. Solomonidou et H. Stavridou), s'accordent pour dire que l'épistémologie scolaire de plusieurs pays d'Europe a privilégié la modélisation dès le début de l'enseignement de la chimie au détriment de l'étude de la réaction sur le plan phénoménologique. Or la modélisation ne joue pas pleinement le rôle attendu dans la construction des connaissances, comme les études sur les représentations, précédemment citées, le mettent en évidence. On ne peut pas faire l'économie d'une approche au niveau manipulateur et macroscopique de la réaction chimique. Comme le font remarquer R. Viovy et J. Carretto, ce choix épistémologique s'est peut-être constitué en rupture avec un enseignement de la Chimie longtemps présenté comme un catalogue de monographies mais qui aboutit maintenant à une présentation trop formelle et théorique des phénomènes. On peut remarquer que sur ce point, les nouveaux programmes français réhabilitent timidement l'étude du concept de substance par construction de "cartes d'identité" qui seraient enrichies au cours de la scolarité.

des économies à
ne pas faire

Des propositions didactiques

construire le
concept de
substance sur le
plan
manipulateur...

C. Solomonidou et H. Stavridou proposent des activités susceptibles de faire évoluer le concept de substance au niveau manipulateur chez de jeunes élèves au cours de séquences expérimentales d'apprentissage (de type entretien). Elles ont provoqué ainsi une évolution de la notion de substance,

où le choix du référent empirique est important...

et différent suivant les stratégies !

favoriser les conflits cognitifs

la modélisation peut s'articuler avec l'expérimentation pour conceptualiser...

envisagée d'abord comme une substance objet puis comme une substance en interaction possible avec d'autres substances. Pour ces auteurs, le choix du référent empirique est déterminant dans cette évolution (en référence aux travaux de J.L. Martinand). Elles choisissent un référent qui permet l'extension des possibles et qui évite le domaine de la vie quotidienne car ce dernier limite, disent-elles, les propriétés des substances à celles qui sont appréhendées par la pensée commune (c'est-à-dire des propriétés essentiellement de type utilitaire). De plus le référent empirique choisi évite la conjonction de plusieurs obstacles comme par exemple le fait de ne pas concevoir une interaction entre substances et de ne pas prendre en considération les gaz en tant que matière. Se référant aux travaux de Wallon, le choix du référent associé à un certain type de questionnement, soulignent-elles, favorise l'extension de la pensée catégorielle nécessaire à l'évolution conceptuelle.

La séquence décrite par A. Laugier et M. Padeloup met en œuvre l'étude de la combustion de la bougie. Le choix de ce référent, diamétralement opposé au précédent, se justifie pour ces auteurs par le fait qu'il s'agit d'un phénomène connu des élèves et qui favorise donc le questionnement. À cet argument s'en ajoute un autre, d'ordre conjoncturel : le laboratoire disponible à l'école primaire est pauvre et la combustion de la bougie reste un référent empirique pratique pour les maîtres avec lequel ils peuvent aussi étudier les changements d'états. Cette étude a permis aux élèves de primaire d'envisager qu'une substance pouvait disparaître au cours de la combustion et que l'air devait être présent (sans que son rôle soit élucidé). Bizarrement, ce n'est pas l'expérience apportée par l'enseignant (se voulant cruciale) qui déclenche un conflit cognitif mais un argument d'ordre économique avancé par un élève : *"Mais alors si on peut tout récupérer, ça sert à rien d'acheter des bougies neuves"*. Cette analyse du conflit montre que des idées issues du quotidien peuvent intervenir dans l'évolution des conceptions des élèves.

Le projet de la séquence est construit sur l'hypothèse que des "expériences découvertes" permettent l'émergence d'un problème dont la résolution motivera l'acceptation de "l'expérience construite" proposée par l'enseignant. L'analyse de la séquence par les auteurs montre le décalage entre l'objectif de l'enseignant et les préoccupations des élèves quant au phénomène étudié, mais aussi les tentatives du maître pour s'y adapter. Cette modalité d'adaptation rappelle la caractéristique de certains dispositifs qualifiée de "souple-dure" par B. Peterfalvi et J.-P. Astolfi dans leur article *"Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales"*, *Aster*, 16, 1993.

Une alternative à l'étude préalable du concept de substance au niveau manipulatoire et macroscopique préconisée par C. Solomonidou et H. Stavridou, R. Viovy et J. Carretto, est proposée par C. Larcher, A. Chomat et C. Lineatte. À propos

de ce concept, les auteurs explorent la possibilité de construire (avec des élèves de cinquième) une séquence qui articule modélisation, expérimentation et conceptualisation. Disposant d'un modèle particulière qui leur a permis d'interpréter des transformations physiques, les élèves produisent des systèmes explicatifs sur des réactions chimiques, qui les incitent à s'interroger sur les substances au début et à la fin des expériences. L'exploration des limites des premiers modèles proposés par les élèves (particules emboîtées) amènera ceux-ci, à accepter un nouveau codage proposé par l'enseignant qui acquerra par son utilisation et sa pertinence un statut de nouveau modèle (particules accolées). Cette activité aura permis aux élèves d'envisager la formation de substances nouvelles au cours de la réaction.

pratiques de la recherche comme modèle pédagogique...

C.-J. Furió, J. Bullejos et E. de Manuel ont expérimenté au lycée un modèle pédagogique isomorphe aux pratiques de la recherche scientifique (se référer à l'article de G. Perez dans le n° 17 d'Aster), ce modèle étant susceptible de créer un triple changement auprès des élèves sur le plan conceptuel, méthodologique et des attitudes.

L'article explicite et justifie les objectifs qui sont à la base de la construction de programmes d'activités autour du concept de réaction chimique :

- différenciation de l'aspect phénoménologique et de l'aspect théorique dont les "noyaux durs " nous sont présentés ;
- centration sur les objectifs conceptuels pour lesquels les élèves ont des difficultés (un tableau met en regard les uns et les autres) ; c'est, selon les auteurs, une sélection d'objectifs-obstacles autour du concept de réaction chimique.

avec sélection d'objectifs-obstacles

Une évaluation des apprentissages sur la construction du concept de réaction chimique permet de mesurer la fécondité du modèle pédagogique expérimenté.

L'apport de l'histoire de la chimie

L'article de M. Padeloup et A. Laugier montre comment aux XVIII^e et XIX^e siècles, la chimie oscille entre une science de la matière centrée sur la structure et une science des réactions étudiant les affinités. Aujourd'hui, ces deux approches sont encore radicalement différentes. Avec la première, des calculs théoriques tentent d'élaborer des modèles de chemins réactionnels molécule à molécule. Avec la seconde, ce sont les lois de la thermodynamique qui régissent les réactions chimiques sur le plan macroscopique. Pour les auteurs, cette étude apportée par l'historien permet au didacticien de poser le problème du choix à faire sur le plan de l'épistémologie scolaire : une entrée "atomistique" ou une entrée "élémentale".

analyse du concept aux XVIII^e et XIX^e siècles

une aide pour l'épistémologie scolaire

Cette dernière entrée avait été adoptée dans les programmes de collège de 1977. On peut se reporter à l'analyse de celle-

ci proposée par J.-L. Martinand (1). Les raisons de son abandon en 1985 sont examinées dans l'article de R. Viovy et J. Caretto.

Pour M. Padeloup et A. Laugier, l'histoire des sciences permet aussi au didacticien d'aborder la parenté entre les obstacles historiques et les obstacles rencontrés par les élèves (obstacles substantialistes et obstacles mécanistes notamment)

un chemin non
linéaire pour
l'accès aux
connaissances...

Dans l'article de J.-P. Gaudillère, l'étude détaillée de la controverse Priestley/Lavoisier (grands nombre de faits interprétables par la libération d'un élément principe ou par la fixation de l'oxygène) met en lumière que celle-ci ne portait pas tant sur la confrontation d'expériences cruciales que sur l'établissement d'un conflit entre deux cultures et pratiques scientifiques. Pour cet auteur, l'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement ne doit pas avoir pour visée principale l'acquisition des connaissances contemporaines mais elle doit offrir aux élèves la possibilité d'envisager la construction non linéaire des connaissances en chimie avec la prise en compte du contexte de leur élaboration, ce qui nécessite un cadre pluridisciplinaire pour appréhender les enjeux de ce contexte. Pour l'auteur, l'intérêt d'une réplique de la controverse Lavoisier/Priestley est de pouvoir faire fonctionner des représentations d'élèves semblables à celles de chimistes de l'époque (dans des contextes différents). Son rôle doit toutefois être envisagé comme un moyen de cristalliser des conflits plutôt que comme un apport de preuve décisive donnant raison à Lavoisier. Une fois encore, le rôle de "l'expérience cruciale" est examiné dans cet article. En ce qui concerne ce problème dans l'enseignement, on peut se reporter à l'analyse de S. Joshua (2).

illustré par une
réplication de
controverse
historique

La formation des enseignants

Dans le cadre théorique et pratique d'un projet curriculaire "*Recherche et Renovation scolaire*" en Espagne, R. Martin justifie la nécessité de rénover le cursus de formation des futurs enseignants de la chimie à des élèves de 12-14 ans. La construction de ce cursus de formation, qui définit une professionnalisation du savoir, se doit pour R. Martin, d'éviter deux écueils : d'une part la simple accumulation de connaissances dans la discipline et d'autre part l'utilisation de la didactique comme application mécanique de techniques. Il s'agit donc de fournir aux futurs professeurs des

une
professionnali-
sation du savoir
possible...

-
- (1) Dans *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang. 1986, 149-174.
- (2) Notamment dans son article "*Les conditions d'évolution des conceptions d'élèves*", in : BEDNARZ N. et GARNIER C. (dir). *Construction des savoirs*. Ottawa : Cirade/Ed. Agence d'Arc Inc. 1989.

qui se fonde sur
des concepts
didactiques

outils pour réfléchir sur les savoirs à enseigner et sur la manière dont les élèves pourront les apprendre. L'auteur propose un référent pour les formateurs servant à définir des interventions possibles dans le cursus de formation et devant permettre une évolution des conceptions scientifiques et didactiques des futurs enseignants. Ce référent nous permet de voir fonctionner les concepts didactiques appliqués à la chimie et d'en mesurer la fécondité pour organiser la formation.

Comme le soulignent R. Viovy et J. Caretto, la réaction chimique n'est pas circonscrite à une discipline. Elle est aussi au cœur de la compréhension des phénomènes bio-physiologiques, géologiques et écologiques. L'exploration didactique de cet aspect interdisciplinaire, actuellement abordée dans une recherche de l'INRP en particulier, mérite de constituer une nouvelle perspective de recherche.

Dominique REBAUD
Lycée "Florent Schmitt", Saint-Cloud
Équipe de didactique des sciences
expérimentales, INRP

RELEVÉ DE QUELQUES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES DANS L'APPRENTISSAGE DU CONCEPT DE RÉACTION CHIMIQUE

Josette Carretto
Roger Viovy

Une familiarisation précoce avec le concept de réaction chimique se justifie à la fois par l'effet de motivation, l'initiation aux dangers, l'explication de phénomènes de la vie courante. Mais les obstacles à l'apprentissage sont nombreux et les études concernant le cas des débutants sont rares. Cet article se propose de recenser les difficultés qui devraient être approfondies par des recherches méthodiques.

L'intérêt d'une familiarisation précoce avec la notion de réaction chimique semble être aujourd'hui généralement admis. C'est une donnée relativement récente ; en effet, avant l'introduction d'un programme, dit de technologie, comportant un peu de chimie en classe de troisième, le début de l'enseignement de la chimie avait lieu en seconde. Les "leçons de choses" ou "activités d'éveil" à l'école élémentaire contenaient très peu de chimie. Seuls les programmes des cours complémentaires, jusqu'à la fin des années 50, comportaient une initiation importante à cette discipline.

Parmi les raisons de ce choix, trois nous paraissent particulièrement importantes.

effet motivant du
spectaculaire et
du merveilleux

- Le caractère spectaculaire de certaines réactions a un effet motivant sur les enfants. Les changements de couleur, les combustions, les précipitations, sont autant de sujets d'émerveillement pour eux. Il s'ajoute à cela un aspect mystérieux, avec parfois une sensation d'insécurité, qui augmente encore l'émotion. La situation est un peu celle du personnage de la figure 1.

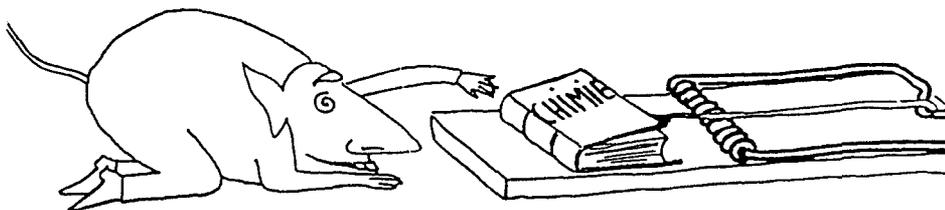


Figure 1
Dessin de Serge Gaspard

Le succès des boîtes du "Petit Chimiste" atteste cet intérêt.

– En contrepartie, il faut introduire des notions de sécurité face à tous les dangers des manipulations de produits chimiques qui font, aujourd'hui, partie de notre vie de tous les jours. Pour ne citer que quelques exemples particulièrement fréquents : allumage des combustibles, manipulations de produits ménagers. On pourrait reprendre un "clip" publicitaire : *"on ne peut être toujours derrière les enfants, alors prenons les devants !"*. La meilleure façon de le faire n'est-elle pas de les initier à la manipulation pour qu'ils puissent maîtriser eux-mêmes les conditions expérimentales ?

– On a souvent dit que la chimie était une science carrefour et il est vrai qu'on la retrouve très tôt dans d'autres disciplines, dès que l'on s'écarte de données purement systématiques ou descriptives. Les premières notions de biologie indispensables pour apprendre une hygiène de vie, telles que respiration et digestion, nécessitent des connaissances de chimie, souvent difficiles.

Une première approche de la chimie ne semble pas poser de graves problèmes. On choisit en général des réactions spectaculaires et bien typées qui peuvent motiver suffisamment les élèves. Cependant, on constate très vite des difficultés dans l'apprentissage de la notion intégrée de "réaction chimique" qui est nécessaire pour organiser les connaissances ou pouvoir faire certaines prévisions.

Des travaux de recherche réalisés avec des élèves de divers niveaux du second degré (1) montrent que le concept est mal assimilé. Il reste beaucoup d'hésitations dans la distinction entre "phénomènes physiques" et "phénomènes chimiques". L'identification de naturel à biologique et d'artificiel à chimique est très fréquente. On peut dire que les relations entre les espèces chimiques et leur utilisation ne sont absolument pas faites.

Il apparaît donc que, dans l'apprentissage de ce concept, certaines difficultés aient été sous-estimées.

Il est certain que, si nous disposons d'un certain nombre de données de recherche sur la façon dont les apprenants perçoivent la chimie (2), sur des résultats d'applications d'innova-

-
- (1) H. STAVRIDOU, 1990, *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*, Mémoire de thèse, Université Paris VII.
C. SOLOMONIDOU, 1991, *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du Collège*, Mémoire de thèse, Université Paris VII.
- (2) F. MATHEY, 1989, *Rapport de la Mission de réflexion sur l'enseignement de la chimie*, Ministère de l'Éducation nationale.

peu d'études sur
les obstacles

vations (3) ou sur certains concepts de chimie physique (4) (quantité de matière ou mole, en particulier), il n'y a pratiquement rien sur les obstacles épistémologiques à l'apprentissage du concept de réaction chimique et sur les remèdes à apporter.

L'objet de cet article est d'essayer de cerner quelques-unes des principales difficultés qui gênent l'acquisition du concept. Cette réflexion pourrait aider à analyser ces obstacles et à proposer éventuellement des démarches didactiques mieux adaptées à la nature des difficultés.

Nous procéderons d'abord à une étude du concept puis à une analyse didactique qui nous permettra de proposer quelques pistes.

1. ANALYSE DU CONCEPT

1.1. Problème de la définition

définir la réaction
chimique

L'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UICPA) qui définit pour la chimie une nomenclature universellement utilisée, donne la définition suivante de "réaction chimique" : "La réaction chimique est le processus qui a pour résultat la conversion d'une ou de plusieurs espèces chimiques en une ou plusieurs autres espèces chimiques."

Il est intéressant de noter les deux points suivants.

– Cette définition officielle ne fait pas appel à la notion microscopique de molécule (ou d'ion ou d'atome), mais à la notion d'espèce chimique qui peut d'ailleurs être définie macroscopiquement par ses propriétés ou microscopiquement par sa structure électronique.

Il apparaît donc que la notion d'**espèce** est la pierre angulaire de tout travail sur la chimie.

– Si l'on consulte les manuels, il est très rare de trouver une définition précise de la réaction chimique. Elle vient presque

-
- (3) M.MÉHEUT, E. SALTIEL, A. TIBERGHEN, 1985, "Pupils' (11-12 years old) conceptions on combustion", *Eur. J. of Sci. Educ.*, 7, 83-93.
M. MÉHEUT, 1989, "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes", *Bull. de l'Union des Physiciens*, 716, 997-1011.
S.B. BOUJAOUDE, 1992, "The relationship between Students' learning strategies and the change in their misunderstandings during a high-school chemistry course", *J. of Res. in Sci. Teaching*, 29(7), 687-699.
- (4) M.G. SÉRÉ, A. TIBERGHEN, 1989, "La formation des concepts définissant les états de la matière", *Bull. de l'Union des Physiciens*, 716, 911-929.
M.G. SÉRÉ, 1990, "Passing from a model to another one. Which strategy ?", in P.L. Lijnse et al. (Eds) : *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*, 50-66 (Utrecht, CD-B Press).

en faisant appel
à la notion
d'espèce
chimique

la définition du
concept de
molécule pose
problème

toujours après les définitions microscopiques d'atome, de molécule... et reflète presque toujours cet aspect du phénomène.

On a un peu l'impression que, dans ce domaine – mais aussi dans d'autres car c'est, hélas, une tendance très courante – on a cherché à évacuer ce qui est de l'ordre des propriétés macroscopiques considérées comme trop terre à terre, pour choisir une présentation théorique et formelle des phénomènes. Il est vrai que la chimie a été trop longtemps un simple catalogue d'espèces chimiques dont on débitait les propriétés comme une litanie ! Mais, maintenant, l'organisation des connaissances permet d'occulter complètement la notion de réaction, pourtant au centre du phénomène chimique proprement dit.

Les travaux de recherche effectués, en particulier (5) sur l'introduction de modèles particuliers dans l'enseignement des sciences physiques, montrent qu'elle pose de nombreux problèmes. Comme, de toutes façons, pour parvenir à cette notion, il faut reconnaître la nature des particules et leur individualité, on augmente encore les difficultés.

Le passage de la structure moléculaire aux propriétés macroscopiques est donc très difficile à appréhender. Ce sont pourtant ces propriétés que les élèves perçoivent et qui devraient les aider à relier le phénomène au concept.

D'ailleurs, on sait bien que, même au niveau du spécialiste, la définition de l'entité chimique "molécule" pose des problèmes. Quand, dans une molécule, on change une liaison covalente (et en plus on s'interroge sur le phénomène de liaison), on admet sans difficulté que l'on change la nature de l'entité ; mais, en fait, les structures électroniques sont beaucoup moins stéréotypées. On introduit des pourcentages ioniques dans la liaison covalente ; les liaisons dites faibles, comme la liaison hydrogène ou les forces de Van der Waals, créent-elles des espèces particulières ?

Le phénomène courant de solubilisation – dans l'eau en particulier – pose des problèmes délicats.

La dissolution du sucre dans l'eau, qui se traduit par une dilution de molécules dans le solvant et ne modifie pas la structure, ne présente pas de difficulté. Il en est de même

(5) A. TIBERGHIE, A. WEIL-BARAIS, 1987, "Les modèles spontanés dans la pensée commune et enfantine", in A. Giordan et J.-L. Martinand (Eds) : *Modèles et simulations*, Paris.

A. CHOMAT, C. LARCHER, M. MÉHEUT, 1988, "Modèle particulière et activités de modélisation en classe de quatrième", *Aster*, 9, 143-184.

C. LARCHER, A. CHOMAT, M. MÉHEUT, 1990, "À la recherche d'une stratégie pour modéliser la matière dans ses différents états", *Revue française de pédagogie*, 93, 51-61.

A.K. GRIFFITHS, K.R. PRESTON, 1992, "Grade-12 Students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules", *J. of Res. in Sci. Teaching*, 29(6), 611-628.

le cas des
dissolutions...

dans le cas du sel de cuisine, simple dilution d'ions (si l'on excepte les phénomènes électrostatiques de solvation).

Par contre, pour des structures qui ne sont pas purement ioniques, des problèmes se posent. Dans le cas de complexes des métaux de transition, la dissolution peut être une véritable réaction, les molécules d'eau, entrant dans la constitution d'une nouvelle espèce facilement caractérisée par sa couleur. On peut citer deux cas typiques : le sulfate de cuivre anhydre, blanc, devient bleu quand on le met dans l'eau ; dans les mêmes conditions, les sels de cobalt anhydres bleus deviennent roses.

et des
phénomènes
coopératifs

Les définitions sont encore plus complexes quand se produisent des phénomènes coopératifs ; ainsi, la modification ou la destruction de liaisons faibles (liaison hydrogène, en particulier) joue un rôle considérable en biologie : inactivation des enzymes, mutations intervenant sur les acides nucléiques, etc.

Ces quelques illustrations montrent à quel point la définition microscopique de la réaction chimique est délicate même pour un spécialiste. Si, du point de vue macroscopique, on peut répondre assez facilement à la question : "La cuisson d'un œuf est-elle une réaction chimique ?", en avançant des arguments concrets, c'est beaucoup plus difficile du point de vue microscopique.

Inversement, dans une approche macroscopique, la variété des réactions amène à prendre en compte une accumulation de faits souvent difficiles à classer. Certaines réactions, parmi les plus courantes comme acide/base, se produisent souvent sans modification sensible du système, et l'introduction d'un indicateur risque de compliquer l'explication. Dans les réactions de combustion, l'existence de produits gazeux (6) (7) introduit des difficultés difficiles à surmonter. Même sans chercher à donner une définition précise, cerner le concept de réaction chimique par un champ d'application n'est pas chose facile ; utiliser pour cela une méthode purement déductive ne l'est pas non plus.

La plus grosse difficulté tient à la diversité du champ d'application. Il est impossible de dégager un "noyau dur" qui serait d'exposition claire et que l'on pourrait ensuite étendre à un ensemble plus large et plus flou de phénomènes, moyennant certaines adaptations.

1.2. Description de la réaction chimique

Dans tous les problèmes portant sur une définition de la réaction chimique on s'intéresse essentiellement à l'état initial et à l'état final du système. C'est donc une approche tout à fait statique du phénomène.

(6) *Ibidem* note (3).

(7) J. CARRETTO, R. VIOVY et al., 1984, "Enquête par questionnaires sur quelques vocables d'orientation scientifique", *Revue française de pédagogie*, 68, 61-71.

donner une vision
dynamique de la
réaction

En réalité, il est essentiel d'en donner une vision dynamique : une réaction doit généralement être initiée ; elle se produit avec une certaine vitesse ; diverses causes provoquent son arrêt (consommation complète de l'un des réactifs au moins, existence d'un équilibre, changement des conditions expérimentales,...). Ces trois points, pourtant d'importance pratique considérable, sont rarement abordés au début de la présentation de la chimie et n'apparaissent jamais comme des phénomènes nécessairement associés aux phénomènes chimiques. Il y a certainement là une lacune, mais nous pensons aussi que cela peut constituer un blocage dans la compréhension du concept. Nous examinerons successivement ces trois points, en commençant par la fin de la réaction.

• **Terminaison des réactions**

Les recherches qui ont pu être faites sur ce sujet (8) (par exemple, "pourquoi une bougie s'éteint-elle ?") montrent que la notion de consommation des réactifs n'est pas aussi évidente qu'on pourrait le croire. Quand on écrit l'équation de la réaction - nous y reviendrons plus loin - on sous-entend toujours l'existence d'une réaction stœchiométrique qui, en fait, n'est pas souvent réalisée.

seuls les équilibres
sont étudiés au
niveau post-bac

Seuls les problèmes concernant les équilibres sont traités en détail au niveau supérieur car ils sont liés à la thermodynamique et faciles à formaliser ; ils donnent alors lieu à toute une série d'exercices faciles à noter.

Quant à la modification des conditions expérimentales au cours de la réaction, on l'oublie ou on évite d'en tenir compte ; pourtant, sauf cas très particuliers, c'est généralement ce qui se produit. Une réaction exothermique chauffe le système et peut l'amener dans un état où la réaction risque de s'emballer et devenir dangereuse. La consommation d'un produit conduit automatiquement à sa dilution dans le mélange réactionnel.

S'il n'est pas question de faire de cette notion le point central de l'apprentissage sur la réaction chimique, il paraît indispensable de l'y intégrer. La réponse à cette simple question : "pourquoi ne faut-il pas recongeler des aliments décongelés ?" nécessite de savoir que la décongélation permet aux processus de décomposition des substances organiques (qui avaient été bloqués par la congélation) de reprendre rapidement, et qu'un nouveau refroidissement ne permet pas de revenir en arrière. D'autre part, les manipulations entraîneront des discussions sur les conditions expérimentales de départ et les produits présents à la fin de l'expérience.

• **Cinétique**

Le champ des vitesses observées dans les diverses réactions chimiques est beaucoup plus étendu que celui des vitesses

(8) *Ibidem* note (3).

observées dans le domaine de la mécanique, plus familier aux élèves. Il peut être comparé à celui des réactions nucléaires.

prendre en compte la vitesse des réactions

C'est un des aspects fondamentaux de la réaction chimique qui est pourtant traité très tardivement dans l'enseignement français... et c'est la première chose que l'on supprime quand on décide d'alléger le programme ! Peut-être est-ce lié, comme pour les équilibres, à notre esprit cartésien, car la théorisation de la cinétique est difficile. Ceci est d'autant plus dommageable que le sujet permet des expérimentations intéressantes et qu'il est constamment pris en compte dans l'enseignement de la biologie.

Il y a, là aussi, une notion qui peut être un obstacle – ou une aide – à l'intégration du concept de réaction chimique.

• *Initiation*

C'est un phénomène lié au précédent, très souvent oublié mais qui frappe les élèves :

“Pourquoi a-t-on besoin d'une allumette pour déclencher une réaction de combustion qui peut être explosive ?”

déclencher une réaction

C'est une question que l'on aborde très tard avec les étudiants, toujours, probablement, pour les mêmes raisons : il faut pouvoir formaliser et parler de barrière de potentiel.

Que puisse exister une réaction très rapide et très énergétique, qui ne se déclenche pas spontanément même dans un mélange homogène de gaz, est très difficile à accepter, et nous pensons que c'est un aspect qui peut constituer un blocage dans la construction du concept de réaction chimique.

1.3. Les langages de la chimie

De nombreuses études (9) ont été réalisées sur les langages utilisés en chimie. Concernant la construction du concept de réaction chimique, on peut en distinguer trois types, en plus du langage mathématique (qui intervient assez peu).

• *Le langage naturel*

Des travaux de recherche, entrepris pour analyser les difficultés des résolutions de problèmes, ont montré que certaines d'entre elles provenaient, non de la mauvaise assimilation des concepts et méthodes scientifiques, mais de la méconnaissance de la langue française et, en particulier, des articulations logiques.

interférence du vocabulaire de la vie courante

D'autres travaux ont porté sur les mots-concepts de la chimie (associations de mots, mots composés, phrases...) et ont mis en évidence une grande sensibilité des jeunes élèves à la phonétique, à l'“idéologie” que les mots véhiculent pour eux, ainsi qu'au sens que certains de ces mots ont dans la vie courante.

(9) *Ibidem* note (7).

On a, en effet, utilisé beaucoup de mots du langage courant pour construire le langage scientifique, en leur donnant parfois des sens différents. On peut ainsi créer des confusions qui seront ensuite très difficiles à éliminer ; c'est le cas, par exemple, de mots comme corps, élément, matière...

Dans le même ordre d'idée, on peut se demander pourquoi on parle de "**réaction** chimique" au lieu d'"**action** chimique". On ne sait trop les raisons historiques de cette appellation, mais il est certain que l'existence du couple action-réaction en physique risque de perturber l'assimilation du concept.

Nous n'insisterons pas d'avantage sur ce problème, qui n'est pas propre à la chimie, mais l'attention du didacticien doit toujours être attirée sur les relations entre problèmes linguistiques et compréhension des phénomènes scientifiques.

• *Le langage symbolique*

L'utilisation d'un langage symbolique date, en fait, des origines de la chimie ; c'était un moyen, pour les alchimistes, de garder leurs secrets. Bien sûr, depuis, le langage s'est stabilisé, a été codifié ; sa signification est connue de tous ceux qui veulent s'y intéresser.

Pour les spécialistes, ce langage ne pose aucun problème mais, pour les apprenants, la complexité de signification du symbole peut conduire à des conceptions erronées si des explications claires ne sont pas données.

La première difficulté rencontrée tient, là aussi, au langage employé ; il est emprunté aux mathématiques. Connaissant la rigueur avec laquelle les mathématiciens définissent et emploient leurs termes, on comprend que le transfert à un autre domaine et avec une signification différente – mais **pas complètement** différente – risque de générer des problèmes voire des blocages conceptuels. Ainsi, l'écriture symbolique d'une réaction chimique est appelée "**équation**" chimique. La confusion avec l'équation mathématique est dangereuse ; de plus, les deux membres de l'équation sont reliés par une flèche, on additionne des espèces différentes et on obtient des produits différents des réactifs, ce qui n'a aucun sens en mathématiques. On dit aussi que l'on "**équilibre**" l'équation qui peut représenter une réaction totale !

La seconde difficulté tient au fait que l'écriture symbolique (symboles et équations) a une signification à la fois microscopique et macroscopique. Dans les explications données par les ouvrages de chimie, on parle d'atome et de molécule quand on équilibre l'équation et, au cours des calculs, de quantité de matière et de mole. Parfois même, on introduit la notion d'élément chimique, notion macroscopique, en parallèle avec la notion d'atome et de molécule.

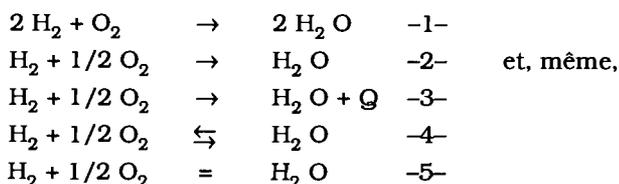
Au début de l'introduction de la "théorie atomique", on utilisait deux symboles différents pour éviter la confusion : la majuscule pour le macroscopique, la minuscule pour le

apprendre
l'usage du
langage
symbolique

distinguer le
macroscopique
du
microscopique

microscopique. Peut-être aurait-on pu continuer, mais les spécialistes pensent toujours que tout est simple !

Pour illustrer cette possibilité de confusion, cet exemple : pour représenter la réaction de synthèse de l'eau, on trouve les équations chimiques suivantes :



La forme -5- est généralement clairement définie comme une représentation stœchiométrique quantitative, sans signification chimique.

La forme -3- est, heureusement, presque abandonnée.

La signification de la double flèche, dans -4-, n'est pas toujours précisée, comme nous l'avons déjà remarqué.

La forme -2- ne devrait jamais être utilisée avec une interprétation microscopique, car il n'existe pas de demi-molécule d'oxygène ; ce serait un atome, et on devrait écrire O.

L'utilisation des équations (équilibrage ou problèmes à partir des quantités de matière) est beaucoup moins évidente que le simple raisonnement logique pourrait le faire croire (10). Des travaux l'ont montré et nous en avons une preuve personnelle : les résultats catastrophiques obtenus lors d'Olympiades internationales de la chimie, dans une question portant exclusivement sur la stœchiométrie de réactions intervenant dans la fabrication des superphosphates. Les candidats, par ailleurs, manipulaient, avec beaucoup d'aisance, orbitales et notions de chimie-physique !

• *Le langage expérimental*

Même s'il n'est pas courant de faire entrer l'expérience dans le chapitre sur les langages, nous pensons qu'il est logique de le faire. C'est en effet une médiation qui permet de transmettre la pensée sous une forme concrète. Pour une science du concret comme la chimie, il semble même que cette forme de langage devrait être privilégiée. C'est pourquoi nous n'avons pas voulu la traiter à part.

Tout le monde est convaincu de la nécessité de donner, en chimie, un enseignement appuyé sur une base expérimentale. Il paraît a priori inconcevable d'enseigner la réaction chimique avec seulement craie et tableau, ou papier et crayon. Pourtant, c'est bien souvent le cas lors des initiations à la chimie. De nombreuses raisons sont invoquées : installations défectueuses, manque de crédits, voire perte de temps. De fait, l'enseignement expérimental apparaît souvent comme un appendice de l'enseignement théorique, et

faire réellement
des expériences

(10) J.J. HESSE, C.W. ANDERSON, 1992, "Students' conceptions of chemical change", *J. of Res. in Sci. Teaching*, 29(3), 277-299.

ne jouait généralement, il y a peu de temps encore, aucun rôle dans les examens et concours. Il faut se réjouir de l'évolution qui semble se dessiner avec la prise en compte des travaux pratiques au baccalauréat.

Beaucoup de ces arguments sont fallacieux et il est possible de travailler à faible coût même dans des locaux peu adaptés, sans tomber dans le "bricolage expérimental". Des idées ont été développées ; nous-mêmes avons proposé quelques solutions (11).

Dans la conception du "langage expérimental", il reste malgré tout des difficultés, en particulier quand il s'agit de l'initiation. En effet, s'il est intéressant de présenter, ou de faire réaliser, des réactions spectaculaires pour motiver ou "accrocher" les élèves, ces manipulations présentent un certain nombre d'inconvénients :

inconvénients
des réactions
spectaculaires

- l'aspect spectaculaire risque de masquer des observations importantes ;
- souvent, les réactions spectaculaires conduisent à des produits peu identifiables ;
- elles sont souvent difficiles à interpréter et leur stœchiométrie n'est pas toujours simple ;
- ce sont souvent des réactions qui n'ont aucun intérêt pratique et ne s'intègrent pas logiquement à une progression didactique.

On doit donc souvent trouver des compromis pour adapter le choix des expériences aux objectifs que l'on s'est fixés.

2. ANALYSE DIDACTIQUE

Après avoir analysé les principales difficultés inhérentes au concept lui-même, nous allons essayer de dégager quelques lignes générales d'une approche didactique dans laquelle nous intégrerons des objectifs de formation, particulièrement liés à ce champ disciplinaire.

2.1. Nécessité d'une approche précoce

On pourrait penser, en considérant les difficultés d'apprentissage du concept, qu'il est nécessaire de retarder son enseignement pour attendre un certain état de développement de la pensée formelle des élèves et de meilleures possibilités d'intégration de ses divers aspects par l'accumulation de données scientifiques. Cette idée a prévalu longtemps puisque ce n'est qu'en 1977 que le début de l'étude de la

(11) J. CARRETTO, A. CHOMAT, M. MESMIN, R. VIOVY, 1979, "Matériel de chimie miniaturisé", *Bull. de l'Union des Physiciens*, 613, 896-905.

J. CARRETTO, 1986, "Minimatériel de chimie", *Bull. de l'Union des Physiciens*, 686, 1169-1179.

D. CROS, J. CARRETTO, G. LOUVEL, 1988, *Expériences de chimie utilisant du matériel miniaturisé*, 134 p, CIFEC, Montpellier.

un enseignement
précoce
appliqué à partir
de 1977

réaction chimique a été introduit dans le programme de toutes les classes de sixième. Il semble que cette pratique soit maintenant très largement répandue même si en France on a fait un sensible retour en arrière – pour des raisons plus conjoncturelles que scientifiques. Dégager l'intérêt scientifique de cet enseignement précoce est donc encore bien nécessaire, et permettra de mieux expliciter les objectifs de l'apprentissage.

Deux arguments paraissent primordiaux.

• **Premier argument**

C'est un concept central qui intervient dans d'autres disciplines (fig.2). En biologie, dès que l'on quitte la systématique, on débouche sur des réactions chimiques. Comment parler de respiration, digestion,... sans cela ? En géologie, on trouve la même situation. En physique, on aborde très vite les notions de changement d'état, et de nombreuses recherches (12) ont montré que la distinction entre changement d'état et réaction chimique est très difficile à appréhender ; la dialectique entre les deux notions semble très utile pour leur assimilation.

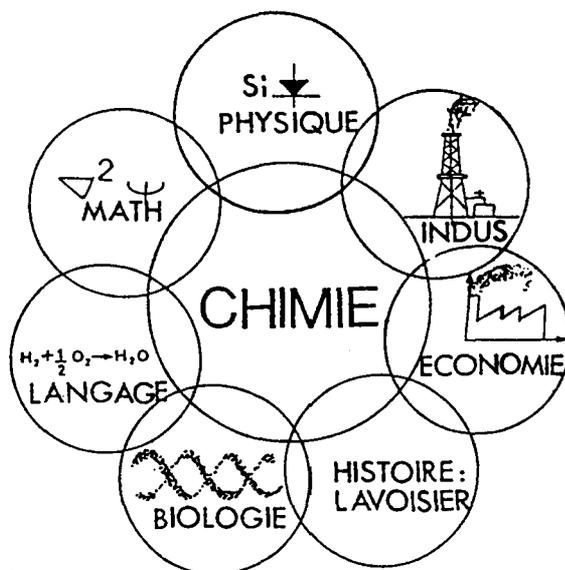


Figure 2

(12) Ibidem note (1).

H. STAVRIDOU, C. SOLOMONIDOU, 1989, "Physical phenomena - chemical phenomena : do pupils make the distinction ?", *Intern. J. of Sci. Educ.*, 11(1), 83-92.

M.R. ABRAHAM et al., 1992, "Understandings and misunderstandings of eight graders of five chemistry concepts found in textbooks", *J. of Res. in Sci. Teaching*, 29(2), 105-120.

le souci de la
sécurité et de
l'environnement

Dans le même ordre d'idées, il paraît indispensable d'asseoir le comportement du citoyen, vis-à-vis de l'extraordinaire variété des produits qui nous entourent, sur des concepts scientifiques clairs ; cette condition est nécessaire pour permettre un comportement non irrationnel. Le souci de la sécurité et celui de la préservation de l'environnement sont deux des aspects principaux de ce comportement. Les exemples de risques sont nombreux mais, parmi les plus évidents, on peut citer les combustions, les produits domestiques acides ou basiques, les solvants (toxicité et inflammabilité)... et en ce qui concerne la protection de l'environnement, que signifie "biodégradable" ?

• *Second argument*

intégrer des
faits variés

Il est plus didactique. Le concept de réaction chimique nécessite, pour sa compréhension, de considérer un nombre de faits important. La simple reconnaissance d'une espèce chimique déterminée demande de connaître plusieurs paramètres (on parle souvent de carte d'identité de la substance). Les manifestations de la réaction sont très variées : flamme, échauffement, changement de couleur, formation d'un solide dans une solution (précipitation), dégagement gazeux... ou rien ! Cet aspect multiforme ne facilite pas l'intégration de l'ensemble en un seul concept. Enfin, comme nous l'avons déjà signalé, la réaction chimique présente une phase d'initiation, une phase de déroulement, et une fin (on peut aboutir à un équilibre) : ces trois phases diffèrent considérablement d'une réaction à l'autre et, pour une même réaction, selon les conditions expérimentales. La vitesse peut aller de ce qui apparaît comme instantané (réactions explosives) à une extrême lenteur (vieillesse du vin), voire à une apparente immuabilité (mélange potentiellement explosif en l'absence d'initiateur). Tous ces paramètres sont nécessaires pour la compréhension du concept.

Il semble donc exclu qu'un apprenant puisse intégrer l'ensemble de ces données en une seule étape, même à un stade où il manipule bien les opérations formelles. Une solution raisonnable serait la construction par étapes de cette notion complexe ; elle nécessite une initiation précoce. Cette initiation, conduite en parallèle avec celle de la notion de changement d'état, permettrait, en mettant en évidence analogies et différences, de mûrir les deux concepts en dégageant la notion d'espèce chimique (ou corps pur) qui est le pivot central de cette construction.

2.2. Approche micro ou macroscopique

La tendance actuelle en France, mais aussi dans de nombreux pays étrangers, est de faire très tôt une approche microscopique, avec introduction des notions d'atome et de molécule. Les essais tentés lors de l'élaboration et de la mise en œuvre des programmes issus de la commission

une présentation
théorique et
formelle

Lagarrigue – approche opératoire et macroscopique, suivie d'une présentation du concept à partir de l'élément chimique – ont été abandonnés pour revenir à une présentation plus traditionnelle. Les raisons en sont multiples.

– L'enseignement est fondé essentiellement sur une présentation théorique et formelle appuyée sur l'écriture de l'équation chimique. Dans ces conditions, la référence à l'atome et à la molécule devient le mode d'exposition le plus facile.

– La notion d'élément chimique n'a jamais été clairement définie et les enseignants n'ont pas l'habitude de l'utiliser comme support théorique. Les anglo-saxons utilisent le mot avec le sens de "corps simple".

Les arguments censés démontrer la simplicité de l'approche microscopique ne sont pourtant pas très convaincants : les mots utilisés, contrairement à ce que disent certains décideurs, ne sont pas familiers aux jeunes élèves. Des recherches ont montré que des élèves entrant en sixième ignorent tout du mot molécule, et donnent au mot atome des sens essentiellement liés au danger nucléaire (13). D'autre part, on a constaté que les questions d'échelle, de continuité/discontinuité, étaient très délicates à appréhender (14). Les idées fausses persistent longtemps, sont difficiles à éliminer et bloquent la compréhension des concepts dérivés. L'idée de structure particulaire de la matière étant longue à assimiler, il est encore plus difficile de concevoir la modification des particules.

Si l'on veut entreprendre tôt l'apprentissage de la réaction chimique et, surtout, si l'on veut qu'elle ne reste pas un concept théorique utilisé seulement pour l'équilibrage "d'équations chimiques" et pour résoudre des problèmes de masses et de volumes – mais bien plutôt que cette notion soit en relation avec la réalité pratique et expérimentale – il paraît tout à fait indispensable de commencer par une approche opératoire et macroscopique.

privilégier une
approche
macroscopique

Pour compléter les données recueillies entre autres par H. Stavridou et C. Solomonidou (15), il serait très utile de développer des recherches sur ce sujet, avec, pour objectif, d'arriver à proposer des idées de réalisations pratiques. On pourrait envisager de conduire un apprentissage par étapes, liant étroitement micro et macroscopique. D'après les données dont nous disposons, il semble indispensable d'y préparer les élèves.... Une introduction à la structure particulaire de la matière, basée sur les propriétés physiques des substances, permettrait d'aborder plus facilement l'aspect microscopique de la réaction chimique. Il faudrait, simultanément, aider les élèves à se familiariser avec l'aspect opératoire de la réaction chimique, en réalisant une présentation d'expériences. Cela suppose, comme nous

(13) *Ibidem* note (7).

(14) *Ibidem* note (5).

(15) *Ibidem* note (1).

l'avons dit plus haut, d'utiliser le concept d'espèce chimique (ou corps pur) comme pivot de cette approche. Pour cela, il serait peut-être intéressant de réhabiliter, dans une certaine mesure et sous une forme modernisée, les études monographiques.

2.3. Déroulement de la réaction

La présentation habituelle de la réaction chimique prend essentiellement en compte les bilans. Les questions de cinétique, d'équilibre, d'initiation, sont abordées très tardivement. Cette présentation schématique de la réaction laisse à l'élève la possibilité de se construire des modèles, comme, par exemple, d'imaginer la préexistence, dans les espèces de départ (les réactifs), des espèces que l'on trouve à la fin du processus (les produits) (15).

ne pas se limiter
aux bilans

Ne pas se limiter au bilan, mais parler du déroulement, permet de montrer qu'en chimie, le contrôle des conditions expérimentales est fondamental et que l'on n'obtient pas n'importe quoi n'importe comment. Ajoutons que, en ce qui concerne la pratique et la sécurité dans la vie courante comme au laboratoire, ce sont des notions qui ont une importance considérable. Combien de dégâts ont été causés par l'acceptation en toute confiance de l'idée commune : "plus on en met, plus c'est efficace" !

2.4. Écriture des équations de réactions

Quand on aborde l'écriture des équations des réactions, il faut préciser très clairement le contenu symbolique du nouveau langage. Comme la notion de quantité de matière (et de son unité, la mole) est d'un apprentissage difficile, il peut être intéressant d'utiliser un langage intermédiaire non traditionnel si on veut écrire des relations entre atomes ou molécules. En effet, du point de vue de la nomenclature légale, l'équation stœchiométrique est une relation molaire. On devrait aussi éviter d'utiliser les formules développées dans l'écriture d'une équation stœchiométrique.

2.5. Réalisation d'expériences

Il est probablement impossible de faire "découvrir" expérimentalement, par l'élève lui-même, le processus de réaction chimique. Une démarche d'exposition est donc toujours nécessaire.

peut-on
"découvrir" les
réactions
chimiques ?

Il est toutefois indispensable que l'apprenant manipule. Il est certain que les conditions matérielles ne se prêtent pas toujours à un tel travail individuel. Pourtant, il est possible, même dans des locaux peu adaptés et avec de faibles moyens, de faire manipuler les élèves. Diverses idées ont été proposées, par exemple dans le Bulletin de l'Union des

Physiciens, les ouvrages de l'UNESCO (16) et des revues d'éducation (17). Nous-mêmes avons mis au point un matériel miniaturisé, peu coûteux, qui permet de manipuler dans des conditions de sécurité satisfaisantes, même dans des locaux non spécialisés (8). Cette familiarisation des élèves avec l'expérience devrait être la base du processus d'apprentissage.

Il n'en reste pas moins que pour diverses raisons, motivation des élèves, discussions collectives, préparation du travail de la classe, l'expérience de cours reste nécessaire. Il y a lieu de réfléchir pour en améliorer les conditions. Par exemple, l'utilisation du rétroprojecteur pour rendre visibles par les élèves certaines expériences, tout en conservant un matériel de dimensions modestes et peu coûteux, n'est pas assez répandue (18).

CONCLUSION

Nous avons essayé, dans ce qui précède, de montrer la nécessité, mais aussi les difficultés d'une approche précoce de la notion de réaction chimique. Il n'est pas possible, contrairement au cas de certaines notions de physique (électricité, magnétisme,...), de trouver des modèles simplifiés ou intermédiaires – qui s'emboîteraient comme des poupées russes – sans introduire de notions inutiles ou inexacts.

Il existe pourtant un grand intérêt des jeunes enfants pour la chimie. Leur motivation va en s'estompant au cours des années pour en arriver trop souvent, en fin du secondaire, à un très faible intérêt pour cette discipline.

Cette évolution de l'intérêt des élèves pour la chimie doit nous interroger. Un phénomène aussi général – il n'est pas particulier à la France – montre qu'il est nécessaire de réaliser de nombreuses recherches sur les obstacles épistémologiques qui doivent être surmontés au cours de l'apprentissage du concept de réaction chimique ; on ne soulignera jamais assez son importance dans la compréhension des phénomènes vitaux dès que l'on dépasse l'aspect purement descriptif, dans la mise en œuvre de la protection de l'environnement et de l'amélioration des conditions de sécurité, ainsi que dans la prévision des effets écono-

-
- (16) Pour les revues d'enseignement expérimental en langue française (UNESCO), consulter le Centre International Francophone sur l'Éducation en Chimie (CIFEC) (Professeur D. Cros), Université Montpellier II, Place E. Bataillon, Case 016, 34095 Montpellier Cedex 5 (Fax : 16 67 54 30 79).
- (17) *Bulletin de l'Union des Physiciens, Education in Chemistry, School Science Review, Journal of chemical Education.*
- (18) J. CARRETTO, 1989, "Le rétroprojecteur, aide didactique polyvalente", in A. Giordan, J.L. Martinand et C. Souchon (Eds), *Actes des XI^{èmes} Journées Internationales sur l'Education Scientifique*, 47-52 (U.F. de Didactique des disciplines, Université Paris VII).

miques ; rendre plus efficace l'apprentissage du concept de réaction chimique paraît donc être un objectif prioritaire de notre enseignement.

Nous espérons que les quelques réflexions qui précèdent permettront aux enseignants de mieux percevoir certains obstacles pour aider plus efficacement les élèves à les franchir. Nous souhaitons aussi qu'elles encouragent le développement de recherches afin d'éclaircir des points d'ombre et peut-être détecter d'autres obstacles non encore mis en évidence.

Josette CARRETTO
LIREST
Université Paris-Sud Orsay
Roger VIOVY
LIREST
Professeur émérite ENS

L'ÉQUATION-BILAN EN CHIMIE UN CONCEPT INTÉGRATEUR SOURCE DE DIFFICULTÉS PERSISTANTES

Roger Barlet
Dominique Plouin

L'équation-bilan, outil de base pour tout travail quantitatif en chimie, est considérée à tort comme une notion sans difficultés réelles pour les apprenants.

Les recherches entreprises par de nombreux auteurs, comme celles que nous avons menées à l'université Joseph Fourier, montrent pourtant que ce concept très intégrateur multiplie les difficultés. La remise en perspective dans l'histoire des sciences montre que ces difficultés ne sont pas inattendues.

Il nous apparaît qu'une partie des conceptions manifestées par les lycéens comme par les étudiants peuvent trouver leur source dans des problèmes de symbolique et de langage. Nous formulons donc un certain nombre de propositions didactiques visant surtout à une mise en ordre langagière.

La **réaction chimique** ne peut s'expliquer que si on a une parfaite connaissance de la structure moléculaire, et elle se définit alors comme le mode de transformation de la matière par lequel les liaisons entre les atomes des **réactifs** se réarrangent, se redistribuent, pour donner des liaisons nouvelles dans les **produits**. On passe ainsi d'espèces chimiques bien identifiées à d'autres espèces nouvelles, de nature et d'organisation différentes, souvent décrites pour la première fois s'il s'agit de composés nouveaux. La réaction chimique, ainsi définie, débouche sur de multiples interrogations dues à sa **complexité** et à sa **diversité**.

D'une part le champ de la réaction chimique est devenu quasi-illimité :

- les synthèses nouvelles et les composés nouveaux se multiplient toujours plus vite. On avance aujourd'hui le nombre de mille espèces chimiques créées chaque jour par les chimistes ;
- le concept de chimie moléculaire, de réactions entre des molécules, s'accompagne aujourd'hui du concept de **chimie supramoléculaire** où des molécules complexantes mettent en cage des atomes ou des ions en créant des interactions nouvelles de faible énergie ;
- la tétravalence du **carbone**, sa capacité à se lier à lui-même dit **pouvoir de caténation**, lui permet de créer des enchaînements infinis où un nombre important de valences sont établies avec l'hydrogène, élément de remplissage des composés organiques. Le carbone est capable de ne se lier qu'à lui-même soit par une auto-association

de la simple
réaction
chimique...

... aux fullerènes

exclusive et indéfinie (graphite, diamant), soit, comme on vient de le découvrir récemment, dans des composés bien définis, les **fullerènes**, assemblés à la façon des dômes de géode, de sphéroïdes du genre ballon de football. Le plus connu de ces composés, de formule moléculaire C_{60} a été découvert fin 1985 et fait, depuis, l'objet d'intenses recherches liées à ses étonnantes propriétés.

D'autre part la diversité de ces réactions implique de nouvelles exigences de structuration et de rationalisation du savoir chimique pour éviter l'écueil d'une chimie purement descriptive. Plus le champ des réactions s'accroît moins on échappe aux questions sur le pourquoi des réactions :

pourquoi une réaction chimique peut-elle avoir lieu ?

- quel est le moteur des réactions chimiques ? Le principe de la conservation de l'énergie ne permet pas de déterminer quelles sont les transformations possibles. Au premier principe de la thermodynamique il faut ajouter le second principe qui fait intervenir l'entropie. Les transformations spontanées qui conserveraient l'énergie mais feraient diminuer l'entropie sont exclues et il est nécessaire d'**associer la spontanéité de la réaction à la diminution d'une fonction potentiel** ;
- pourquoi deux réactions en sens inverse peuvent-elles simultanément se produire pour conduire à un état d'équilibre défini par la **stationnarité macroscopique** ?
- pourquoi d'autres **systèmes dissipatifs**, producteurs d'entropie, peuvent-ils évoluer loin de l'équilibre (structures dissipatives d'Ilya Prigogine) ?
- pourquoi une réaction thermodynamiquement possible peut-elle ne pas se produire et quelles sont les **exigences cinétiques** d'une réaction chimique ?
- pourquoi et comment les observations expérimentales cinétiques constituent-elles le moyen privilégié d'accès aux **mécanismes réactionnels** et comment concilier le devenir de la molécule individuelle et la sociologie moléculaire ?

On comprend que la réaction chimique constitue un monde tellement diversifié et tellement complexe qu'il ne peut être question de l'aborder dans son ensemble. Nous limiterons notre étude à un concept très fondamental, aujourd'hui considéré comme élémentaire : **l'équation-bilan**. Cependant, contrairement à ce qu'on a pu longtemps penser dans l'enseignement secondaire et universitaire, **les conditions d'utilisation de ce concept d'équation-bilan sont plus complexes qu'il n'y paraît**. Nous nous emploierons à montrer qu'il cumule un grand nombre de difficultés propres à la chimie et qu'il constitue un enjeu didactique trop sous-estimé.

1. L'ÉQUATION-BILAN, FONDEMENT ET SOURCE DES BILANS RÉACTIONNELS, UN CONCEPT INTÉGRATEUR

À partir du moment où sont clairement identifiées les formules moléculaires des réactifs et produits de réaction, la loi lavoisienne de conservation des masses permet d'établir la stoechiométrie de l'équation de réaction et le bilan quantitatif de la réaction.

L'équation-bilan donne d'abord accès à un **bilan en terme d'éléments** qui fonde l'accès à un **bilan en masse**, source de toutes les évaluations quantitatives, grâce au recours à la quantité de matière c'est-à-dire au nombre de **moles**.

Elle permet aussi l'accès à un **bilan en volume** particulièrement précieux avec les partenaires gazeux et fondée sur la **loi d'Avogadro-Ampère** : les gaz, quelle que soit leur nature, occupent un volume molaire identique s'ils sont proches des conditions caractérisant le gaz parfait.

1.1. L'équation-bilan, un concept

Ce n'est que par un processus de conceptualisation relativement complexe que l'équation-bilan permet de rendre compte de l'observation expérimentale macroscopique, à l'échelle d'une très grande quantité d'entités moléculaires. Mais si l'on veut dépasser le seul bilan matière et donner du sens à l'équation de réaction il convient de recourir au niveau atomique et moléculaire. On passe alors de l'observation, où la matière est continue, à la modélisation, où la matière est discontinue. Ce transfert de l'observable au modélisable, du continu au discontinu implique une réelle capacité d'abstraction et l'histoire des sciences nous montre à l'évidence qu'il est inexact de supposer que l'équation de réaction et son application au bilan en masse ou en volume coule de source.

À partir de l'identification des réactifs et des produits, de la mesure expérimentale de leurs masses et (ou) de leurs volumes, on ne peut donner un sens précis et complexe à l'équation de réaction que par mobilisation d'une pensée structurée capable de rendre l'invisible à la fois intelligible et cohérent.

L'équation-bilan est bien un véritable concept qui nécessite une capacité d'abstraction élevée.

1.2. L'équation-bilan, un concept intégrateur

Les premières véritables équations de réaction remontent à **Lavoisier** ce qui est relativement récent dans la longue histoire de la chimie. Et depuis, en deux siècles, l'équation de réaction a beaucoup évolué pour mieux représenter et symboliser la réaction chimique. C'est que ce concept d'équa-

passage de l'observable à la modélisation pour donner un sens à l'équation de réaction

tion-bilan intègre aujourd'hui toutes les notions qualitatives et quantitatives qui permettent de dresser le bilan de la réaction et qui vont de la symbolique langagière, fondée sur les éléments, à la diversité de la réactivité macroscopique. Cette intégration complexe s'est faite lentement au cours des deux derniers siècles.

• **La symbolique**

évolution lente,
mais de plus en
plus précise, des
symboles

Pour représenter les réactions chimiques par une équation de réaction il convient de disposer de formules ou de symboles pour les éléments, les atomes, les molécules et les ions. En fait la distinction entre élément, corps simple et corps composé, corps pur et mélange ne s'est opérée que progressivement après l'hypothèse atomique. Même après cette hypothèse, que de chemin parcouru entre la représentation des éléments de **Dalton**, combinant cercles et points, et celle plus actuelle de **Berzelius** et surtout de **Mendeleev**.

• **L'identification des composés chimiques**

Le chimiste a toujours cherché à identifier un corps par sa composition chimique et la **loi des proportions définies de Proust**, formulée en 1802, affirme que les composés chimiques ont bel et bien une identité : *"Les rapports des masses suivant lesquels deux ou plusieurs éléments se combinent sont fixes et non susceptibles de variation continue"*.

des proportions
définies aux
proportions
multiples :
l'hypothèse
atomique

De plus, lorsque deux éléments s'unissent entre eux dans une combinaison moléculaire ils ne le font pas au hasard mais de façon quantifiée ainsi que l'affirme la **loi des proportions multiples de Dalton** : *"Lorsque deux éléments forment ensemble plusieurs composés, les masses de l'un d'eux, s'unissant à une même masse de l'autre, forment entre elles des rapports multiples simples et entiers."* Ces rapports simples et entiers sont évidemment cohérents avec **l'hypothèse atomique** du même Dalton énoncée à la même époque. Considérer que cette loi ne fait que traduire les valences multiples d'un certain nombre d'éléments, aptes à s'associer à un nombre variable mais entier d'atomes comme le fer dans FeCl_2 et FeCl_3 par exemple, nous paraît aujourd'hui aller de soi. Pourtant cela n'est évident qu'une fois admise l'hypothèse atomique et établies les bonnes formules des divers composés ce qui ne s'est pas fait sans débats entre les chimistes.

• **Le passage du microscopique au macroscopique : la mole**

Si l'hypothèse atomique et la constitution moléculaire des composés rendent intelligible la réactivité chimique il reste qu'il convient, selon l'expression de Jean Perrin, d'expliquer *"du visible compliqué par de l'invisible simple"*. Pour rendre compte des rapports pondéraux des éléments à l'intérieur des molécules, ou des proportions pondérales des réactifs qui réagissent entre eux, il faut disposer d'une part d'une

origine des masses atomiques et d'autre part d'un opérateur permettant de faire le transfert de l'individu chimique non observable à une collection d'individus chimiques observables à notre échelle expérimentale.

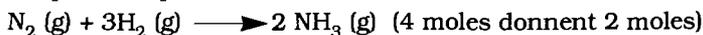
Ainsi a-t-on pris comme **origine** des masses atomiques le nucléide $^{12}_6\text{C}$, comme **unité de masse atomique** (u.m.a.) le $1/12$ de la masse de ce nucléide et comme **opérateur** de transfert macroscopique la constante d'Avogadro $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$. Cette constante permet de définir la mole correspondant à N_A entités $^{12}_6\text{C}$ et la masse molaire = masse de la mole = 12 g dans le cas du carbone $^{12}_6\text{C}$.

À partir de là on disposera d'une échelle des masses atomiques relatives exprimée en u.m.a., et d'une échelle des masses molaires, exprimée par les mêmes nombres significatifs en g. Les concepts de **masses molaires** M exprimées ainsi en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et de **moles** (N_A atomes, molécules ou ions) permettent alors de traiter sans limitation l'aspect quantitatif de l'équation de réaction.

Est-il besoin de rappeler que tout cela ne s'est construit que progressivement ? La référence des unités de masse atomique a évolué avec le temps et a précédé la détermination de la constante d'Avogadro : Dalton a choisi comme référence conventionnelle de poids atomique l'hydrogène, le poids atomique de chaque élément étant la quantité pondérale s'unissant avec un gramme d'hydrogène pour former la combinaison la plus stable. Puis la référence s'est déplacée vers 16 g d'oxygène et enfin aujourd'hui 12 g non pas de carbone naturel mais du nucléide $^{12}_6\text{C}$. À partir de la définition précise de cette dernière référence ce sont ensuite les mesures des physiciens qui ont permis d'affiner la valeur de la constante d'Avogadro.

• La loi d'Avogadro-Ampère

L'instrument essentiel permettant d'expliquer la conjonction des proportions pondérales et volumétriques est la loi d'Avogadro-Ampère affirmant l'existence d'un volume molaire indépendant de la nature des gaz. Cette loi, formulée indépendamment par **Amadeo Avogadro**, physicien de Turin, en 1811 et par **André Marie Ampère**, physicien de Lyon, en 1814, postule que *"dans les mêmes conditions de température et de pression, des volumes égaux de gaz contiennent le même nombre de molécules"*. Dans le cas de la formation de composés gazeux non binaires cette loi postule que la conservation des masses n'implique pas conservation des volumes car en effet le nombre de moles est alors modifié, par exemple :



De façon paradoxale, la loi d'Avogadro-Ampère qui affirme que, quelle que soit leur nature, les moles gazeuses occupent un même volume va à l'encontre de l'identité moléculaire des composés. Il est vrai que ceci n'est dû qu'à l'approximation du gaz parfait qui postule une absence

le passage du visible compliqué à l'invisible simple : la mole de molécules, le nombre d'Avogadro

la conservation des masses n'implique pas la conservation des volumes

d'interactions entre des entités gazeuses à volume propre négligeable. Mais on sait que cette approximation reste largement valable à température et surtout pression modérées.

• **La stœchiométrie des équations de réactions**

C'est **Richter**, un élève de Kant soucieux de mathématiser la chimie, qui introduit le premier le terme de stœchiométrie dans des tables, publiées en 1792 et 1802, visant à préciser les rapports numériques entre acides et bases. Ces rapports stœchiométriques sont élargis à l'ensemble des réactions par **Proust** avec sa loi des proportions définies. Aujourd'hui les coefficients stœchiométriques régissent le nombre de molécules de réactifs qui conduisent à un nombre déterminé de molécules de produits, grâce à la conservation des espèces atomiques. Ainsi, l'identité des composés, jointe à la conservation des atomes et des masses, conduit à la stœchiométrie précise des équations de réaction et à la possibilité de dresser des bilans massiques ou volumiques.

conservation des
éléments : la
stœchiométrie

1.3. Une lente émergence historique

C'est seulement au 19^e siècle que la chimie a accédé à un véritable statut scientifique, à une rationalisation favorisée par l'émergence d'une "science des professeurs" néanmoins émaillée de nombreuses controverses (1).

De l'hypothèse atomique de Dalton en 1804 à la détermination du nombre d'Avogadro N_A par **Rutherford** en 1903, une succession d'avancées théoriques puis de remises en cause ont jalonné la lente émergence du substrat théorique nécessaire à la pleine signification de l'équation-bilan. On peut comprendre que lycéens et étudiants repassent aujourd'hui par les mêmes incertitudes scientifiques.

• **L'identité du composé chimique et la controverse Proust-Berthollet**

Les premières tentatives modernes pour décrire l'ensemble des réactions et établir des tables d'affinités, c'est-à-dire décrire les forces responsables des combinaisons chimiques, donnaient la priorité aux relations, aux réactions entre les corps (2). Cette priorité éclipsait totalement la notion d'espèce chimique à propriétés spécifiques.

Bergman dans son entreprise de mise en tables de toutes les réactions chimiques entre 1775 et 1783 et plus encore **Berthollet**, au début du 19^e siècle, ne reconnaissaient pas d'identité au composé chimique. Pour ce dernier, le résultat

(1) I. STENGERS et B. BENSUADE-VINCENT ; *Histoire de la Chimie*, La découverte, Paris 1993.

(2) M. GOUPIL ; *Du flou au clair ? Histoire de l'affinité chimique*, Editions du Comité des Travaux Historiques et Scientifiques, Paris, 1991.

normal d'une réaction est un équilibre mais tout corps est un mélange dont la composition dépend des conditions de réaction.

reconnaissance
difficile de
l'espèce
chimique

L'intangibilité de l'espèce chimique, préalable de l'équation de réaction, ne pouvait surgir de la seule expérimentation et elle représentait, au début du 19^e siècle, une véritable rupture épistémologique. Il est vrai que c'est seulement vingt ans plus tôt que Lavoisier avait définitivement ruiné la théorie du "phlogistique" entraînant un autre véritable changement de paradigme au sens de T. S. Kuhn (3).

• **Théorie atomique et théorie des équivalents**

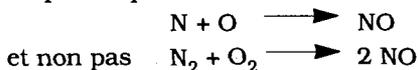
Les conditions paraissaient cependant réunies au début du 19^e siècle (identité des espèces chimiques, conservation des masses) pour franchir un palier épistémologique, celui de pouvoir suivre l'évolution de la réaction chimique en termes quantitatifs. Il faudra pourtant attendre encore près d'un siècle et une longue controverse entre les "atomistes" et les "équivalentistes" pour rendre pleinement intelligible le traitement quantitatif de la réaction chimique.

a) La montée des "atomistes"

L'hypothèse atomique de Dalton vint rapidement compléter la loi de Proust et répondre à une situation de diversification croissante des substances. Dans cette hypothèse les combinaisons chimiques se font par unités discrètes, atome par atome, et les atomes de chaque élément sont identiques et ne subissent aucune modification lorsqu'ils entrent en combinaison. Cette identité atomique permet ainsi à Dalton de formuler la loi des proportions multiples mais il reste à faire clairement la distinction entre atome et molécule. En effet pour Dalton l'unité minimale de combinaison que constituait l'atome restait aussi bien l'atome "indivisible" moderne que l'atome "composé" tel le dioxyde de carbone et le dioxygène. S'y surajoutait la confusion entre atome et molécule diatomique mise en évidence par les réactions en phase gazeuse.

Pour **Gay-Lussac** "les volumes de gaz qui se combinent sont dans des rapports simples". Dalton conteste cette loi qui impliquerait que dans un volume donné le nombre d'atomes soit constant. Dans la réaction entre l'oxygène et l'azote pour donner le monoxyde d'azote la bonne réaction chimique est pour lui :

naissance de
l'hypothèse
atomique



b) Une approche structurale

Cette difficulté, sur les réactions en phase gazeuse, ne sera levée que par la **distinction entre atome et molécule d'un corps simple** (ne possédant qu'un seul type d'atome) appor-

(3) T.S. KUHN ; *La structure des révolutions scientifiques*, nouvelle édition, Flammarion, Paris, 1983.

tée par Amedeo Avogadro : les plus petites particules d'un gaz ne seraient pas des atomes mais des molécules et des volumes égaux de gaz différents, dans des conditions identiques, comportent un même nombre de molécules. La distinction entre atome et molécule sera clairement établie et reconnue au congrès de Karlsruhe, premier congrès de chimistes, en 1860.

Nous avons d'ailleurs pu observer lors d'un module de remise à niveau "équation-bilan" à la pré-rentree du DEUG B1 combien cette difficulté est restée prégnante dans l'esprit des élèves et des étudiants. C'est d'ailleurs seulement en 1975 (4) qu'ont été clairement prescrites, pour les molécules gazeuses diatomiques, des dénominations évoquant leur structure moléculaire (dichlore, dioxygène, diazote ... au lieu du terme commun ambigu de chlore, oxygène, azote dont on ne sait jamais s'il s'agit de l'élément ou du corps simple).

Malgré ses insuffisances, la théorie atomique permettait de rendre compte des rapports pondéraux de combinaison et Dalton put rapporter tous les poids atomiques des éléments à une unité conventionnelle le gramme d'hydrogène : *"le poids atomique est la masse qui s'unit avec un gramme d'hydrogène pour former la combinaison la plus stable."*

différenciation
atome-molécule

c) La résistance des équivalentistes

Les tenants de la méthode ou de la théorie des équivalents prennent un **parti-pris expérimental**. L'écriture équivalentiste n'a pas l'ambition de se référer à une structure mais entend simplement interpréter les résultats bruts : des symboles, les mêmes que ceux utilisés pour les atomes, représentaient des **poids équivalents**. Ces poids, définis à un facteur près, étaient dits nombres proportionnels mais aucune hypothèse n'était faite sur la structure du composé analysé. Ainsi dans le cas de l'eau oxygénée l'analyse montre que 16 g d'oxygène sont associés à 1 g d'hydrogène. Avec des équivalents déterminés à partir de l'eau de formule HO (H = 1 ; O = 8) il faudra compter deux équivalents d'oxygène pour un équivalent d'hydrogène et on obtiendra la formule HO₂. Si au contraire on prend l'eau oxygénée comme référence les équivalents deviendront H = 1 et O = 16, la formule de l'eau oxygénée sera HO et celle de l'eau H₂O.

La controverse entre les "atomistes", souhaitant interpréter et connaître la structure intime, et les "équivalentistes", uniquement préoccupés des rapports pondéraux expérimentaux, sera vive durant toute la première partie du 19^e siècle. Elle se prolongera, en France, bien après le congrès de Karlsruhe derrière les chefs de file respectifs que seront **Wurtz** et **Berthelot**. Ce n'est qu'à la mort de ce dernier en 1906 que la théorie atomique s'imposera définitivement (5).

querelles
atomistes/
équivalentistes

(4) *Bulletin de la Société chimique de France*, numéro spécial, fév. 1975.

(5) J. JACQUES ; *Berthelot ou l'autopsie d'un mythe*, Belin, Paris, 1987.

Il y a derrière ce débat tout le problème de la relation entre expérimentation et modélisation ou encore entre inductivisme et constructivisme. Notons à ce sujet que le modèle positiviste, qui nie toute théorie préalable et qui s'appuie sur la seule observation expérimentale, est, en effet, encore pesant dans l'esprit des étudiants et probablement des enseignants de tous cycles universitaires (6).

• **Un outil qui a moins d'un siècle**

L'équation-bilan et la stœchiométrie des réactions ne se sont imposées de façon incontestable pour tout chimiste qu'à partir de 1907, époque à laquelle l'Académie des Sciences a levé les dernières hésitations et légitimé définitivement la théorie atomique. Cet outil, pour le traitement quantitatif des réactions, n'a cependant pris sa forme définitive qu'en 1960, date à laquelle l'origine des masses atomiques molaires a été assignée à une mole de nucléide $^{12}_6\text{C}$ (12g) en remplacement de l'oxygène naturel (16 g) qui avait été choisi par un vote des chimistes en 1905.

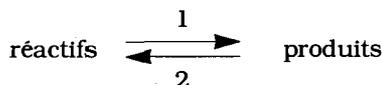
reconnaissance
de la théorie
atomique

**1.4. L'équation-bilan, un concept non limité
aux réactions totales**

Tout enseignement utilisant l'outil équation-bilan implique l'étude des réactions totales. Dans ces réactions totales on utilise habituellement des coefficients stœchiométriques simples (entiers ou fractionnaires). Cette utilisation de coefficients stœchiométriques simples ne traduit pas le fractionnement quelconque des quantités de matière expérimentales. Il est par ailleurs nécessaire de préciser que l'équation-bilan doit également pouvoir répondre à trois autres situations explicitées ci-après.

• **Les équilibres chimiques**

Toutes les réactions chimiques peuvent être considérées comme des équilibres chimiques dont les constantes sont très variables et souvent très grandes ce qui permet de les considérer comme des réactions totales. À partir de réactifs, mis à réagir ensemble, il est convenu de définir une réaction directe dans le sens 1 et une réaction inverse dans le sens 2 :



stationnarité
macroscopique
mais dynamique
moléculaire

Ces réactions évoluent jusqu'à un état d'équilibre où la **stationnarité macroscopique occulte** souvent, dans l'esprit des élèves et des étudiants, **la cinétique moléculaire** des

(6) R. BARLET et D. PLOUIN ; "Rapport Théorie-expérimentation, la prégnance du modèle inductiviste chez les futurs professeurs de sciences physiques", Actes X^{es} JIREC de la Société Française de Chimie, St Hugues de Biviers, 12-14 mai 1993.

réactions 1 et 2 qui se poursuivent à des vitesses devenues égales. L'équation-bilan joue alors une sorte de rôle d'écran, par rapport à l'aspect dynamique, microscopique des espèces chimiques de la réaction.

• **L'avancement de la réaction**

Ce concept d'avancement de la réaction est très utile pour pouvoir, en toute circonstances, hors d'équilibre ou à l'état d'équilibre, évaluer comment avance ou jusqu'où a avancé la réaction chimique globale. L'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (I.U.P.A.C en dénomination anglo-saxonne) prescrit d'adopter cette grandeur pour définir la vitesse de réaction et les grandeurs thermodynamiques de réaction.

Pour toute réaction chimique où une espèce i est produite ou consommée selon l'équation de réaction :



On pourra définir l'avancement par le symbole ξ (prononcer ksi) défini comme suit :

$$\xi = \frac{\Delta n_i}{\nu_i} = \frac{n_i - n_{i(0)}}{\nu_i} \quad \text{avec la relation } n_{i(0)} + \nu_i \xi$$

n_i = quantité de matière de l'espèce i à un moment quelconque

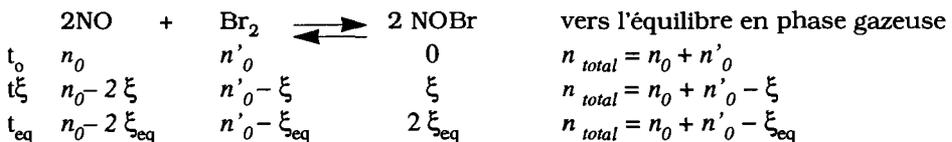
$n_{i(0)}$ = quantité de matière de l'espèce i au temps $t = 0$.

ν_i = coefficient stoechiométrique de l'espèce i dans l'équation de réaction.

l'avancement de la réaction, grandeur rigoureuse pour la cinétique et la thermodynamique

À noter que la réaction globale avance dans le sens direct l c'est-à-dire que ν_i est affecté du signe - pour les réactifs A et B qui se consomment et du signe + pour les produits C et D qui se forment : l'avancement ξ est une grandeur extensive qui s'exprime en moles et qui est positive.

Par exemple, pour la réaction simple ci-dessous, on pourra écrire le tableau d'avancement suivant :



L'avancement définit ainsi l'évolution de la réaction chimique à partir de la quantité de matière mise à réagir au temps $t = 0$. C'est un outil précieux pour traiter quantitativement le bilan réactionnel à tout instant. C'est un outil rigoureux pour les définitions en cinétique ou en thermodynamique (7).

(7) F. ROUQUEROL et G. SCACCHI ; "Présentation unifiée de la vitesse de réaction indépendamment du type de réacteur utilisé (fermé, ouvert)", B.U.P, 752, 383-40, 1993.

• **Les réactions non stœchiométriques**

Lorsque les réactifs A et B ne sont pas dans les proportions stœchiométriques v_a et v_b , **l'un des réactifs est en défaut et contrôle la réaction**. Le réactif déficitaire ou limitant est alors celui qui a le rapport n_0/v le plus petit. Si par exemple dans la synthèse de l'eau, présentée plus haut, on mélange $n_a = 0,23$ mol de H_2 et $n_b = 0,4$ mol de O_2 le réactif limitant sera H_2 car $0,23/1 < 0,4/(1/2)$. La réaction est totale et en fin de réaction on pourra écrire :

$$n_a - \xi = 0 \quad \text{d'où} \quad \xi = n_a = 0,23 \text{ mol} = n_{H_2O}$$

quantité de H_2O formée = 0,23 mol

quantité de O_2 restante = $0,4 - 0,23/2 = 0,285$ mol

2. DE FORTES CONCEPTIONS ET UN ENJEU DIDACTIQUE : L'ÉTAT DES PROGRAMMES ET LES DONNÉES DE LA LITTÉRATURE

Comme on vient de le voir l'équation-bilan, concept de base pour symboliser la réaction chimique, est aussi un concept intégrateur qui, pour permettre l'accès au bilan quantitatif, nécessite l'appropriation préalable de concepts multiples (atome, molécule, mole, quantité de matière et calculs afférents, réaction univoque ou réversible...).

construction du concept d'équation-bilan dans l'enseignement secondaire français

Ce caractère un peu paradoxal qui en fait un concept obligatoire mais complexe explique sans doute que collégiens, lycéens mais également étudiants soient porteurs de conceptions persistantes sur l'équation-bilan.

Avant d'identifier ces conceptions, que l'on retrouve de façon durable et à tous niveaux chez de nombreux apprenants, il paraît utile d'analyser comment par intégrations successives se construit le concept d'équation-bilan au cours des études secondaires.

2.1. Construction du concept d'équation-bilan dans les programmes de l'enseignement secondaire

Dans cette étude, certains paragraphes en italiques sont des remarques personnelles des auteurs soulignant l'enjeu didactique et la nature des difficultés pouvant être à l'origine des conceptions analysées ultérieurement.

Remarquons que, malgré la disparition des sciences physiques en sixième en 1991 et en cinquième en 1992, les anciens programmes de 1987 et 1988 courant sur tout le secondaire se sont imposés à tous nos actuels étudiants scientifiques. Les lycéens entrés en terminale en septembre 1993 étaient en sixième en 1987 et ont été assujettis également à l'ensemble de ces programmes. Il en va d'ailleurs de même pour tous les actuels lycéens. Seuls les élèves entrés en septembre 1993 en quatrième ont été les "victimes" de la

suppression des sciences physiques en sixième et cinquième.

• **Classe de quatrième**
(B.O.E.N. n°31, 30 juillet 1992)

Dans cette classe, le fait de s'appuyer sur certaines propriétés des boissons, des produits chimiques naturels et de synthèse, redonne à la chimie son caractère de science expérimentale.

On retrouve les premières approches modélisées de l'atome et de la molécule. En ce qui concerne l'atome, quelques noms et symboles d'atomes sont donnés :

- les notions sur la structure (noyau et électron) des atomes sont reportées en troisième ;
- l'introduction de la conservation des atomes est faite, mais non celle de la masse (reportée en troisième).

Pour les molécules, la caractérisation de leur forme, de leur dimension et de leur masse est introduite.

On peut alors se demander si l'utilisation de ces modèles n'est pas trop précoce ? L'observation des structures de CO_2 , H_2O et CH_4 ne va-t-elle pas amener le collégien à se poser des questions sur les angles de liaison de façon prématurée puisqu'aucune interprétation raisonnée ne pourra encore lui être fournie ?

Les principaux objectifs de l'enseignement sur l'équation chimique sont :

- de savoir caractériser les réactifs et les produits ;
- d'associer la réaction à son équation ;
- de connaître et savoir "équilibrer" les équations-bilans des réactions étudiées.

Il est intéressant de noter trois notions particulières qui ne semblaient pas apparaître dans les anciens programmes :

- la différence mélange homogène-mélange hétérogène ; un mélange homogène à l'œil nu peut se révéler hétérogène au microscope ; cette constatation expérimentale est une bonne approche de la distinction entre les niveaux microscopique (le modèle) et macroscopique (l'observable) ;
- les concentrations en masse (en grammes par litre) ;
- les cartes d'identités des produits étudiés.

On peut trouver là une pratique pédagogique permettant d'entraîner les élèves d'une part à établir et utiliser des schémas et d'autre part à bien identifier les composés chimiques ce qui n'est pas un objectif mineur si on se réfère aux difficultés que nous révèle l'histoire à ce sujet.

• **Classe de troisième**
(B.O.E.N. n°41, 2 décembre 1993)

Par rapport aux anciens programmes, le modèle de l'atome est décrit avec toutefois les mêmes restrictions : pas de précisions sur la structure du noyau ni sur l'organisation des électrons.

Les équations-bilan des réactions d'oxydation seront écrites :

- en terme de conservation des atomes ;
- en prenant en compte la mise en solution de certaines substances ; seules les espèces réagissantes apparaîtront.

Les cations (ou anions) résultent d'un défaut (ou excès) d'électrons par rapport aux atomes neutres : cette précision évite l'ambiguïté de la phrase "l'existence des anions sera présente comme étant la conséquence de la neutralité électrique des solutions aqueuses et de l'existence des cations".

- **Classe de seconde générale**
(B.O.E.N. hors série, 24 septembre 1992)

Un travail important sur l'équation-bilan est réalisé au sujet de l'industrie des engrais dans la partie : *"La chimie dans les champs et les jardins"*. Ce thème implique de présenter aux élèves les principales étapes de la synthèse industrielle des engrais et les réactions afférentes. Ce travail a pour objectif de préparer à une interprétation des équations-bilans en terme de quantités de matière, exprimées en moles.

La seconde partie, *"Les éléments chimiques du globe et de l'univers"*, consiste en une étude de l'élément chimique et comporte, parmi ses objectifs, la différenciation entre les niveaux microscopiques et macroscopiques, puis évidemment l'introduction de la constante d'Avogadro.

Les compétences exigibles semblent plus précises que dans les anciens programmes et sont davantage ciblées sur l'équation-bilan. Ces compétences sont clairement explicitées :

- faire des bilans en raisonnant en quantités de matière (en moles) ;
- utiliser la mole comme unité de quantité de matière et connaître son symbole (mol) ;
- relier les quantités de matière aux masses et, dans le cas des gaz, aux volumes ;
- "équilibrer" l'équation-bilan d'une réaction chimique en liaison avec la notion de mole.

On retrouve ici les grandes lignes de l'ancien programme, mais avec sûrement un plus grand attrait et une plus grande clarté pour les élèves.

- **Classe de première S**
(B.O.E.N. hors série, 24 septembre 1992)

L'équation-bilan est considérée comme acquise pour les réactions totales. On retrouve :

- la demi-équation-bilan d'un couple M^{n+}/M ;
- l'équation-bilan de la réaction d'un acide sur un métal ;
- l'équation de la réaction de combustion complète d'un composé organique.

2.2. Les erreurs persistantes à l'entrée à l'université

L'équation-bilan, ainsi que tous les concepts qui s'y rattachent sont étudiés dans l'enseignement secondaire, et plus particulièrement en classe de seconde au cours de laquelle une synthèse est faite. Ces concepts font donc légitimement partie des prérequis pour la première année d'études scientifiques universitaires ; pourtant de nombreux exemples montrent qu'il n'y a pas véritablement appropriation des concepts par de nombreux bacheliers... et même que certaines conceptions perdurent à l'université, comme le montre la littérature assez riche sur ce sujet.

Ainsi les recherches sur l'appropriation des divers concepts font ressortir la grande difficulté que rencontrent les élèves et les étudiants pour comprendre le passage de la molécule à la mole de molécules, de l'atome à la mole d'atomes et de l'ion à la mole d'ions.

Par contre, les recherches sur l'équation-bilan, et plus particulièrement lors de la transition enseignement secondaire-université, sont moins développées et généralement couplées avec les concepts de moles, molécules et atomes. L'équation-bilan fait intervenir surtout la stœchiométrie, le bilan d'une réaction et éventuellement la réversibilité.

Il ne s'agit pas ici de donner une liste détaillée de toutes les recherches sur ce sujet, mais plutôt d'avoir un aperçu des difficultés rencontrées par les étudiants à leur entrée à l'université.

les conceptions persistantes à l'université : mauvaise appropriation des concepts liés à l'équation-bilan

• *Que savent nos bacheliers en chimie ?*

H. Demonge et coll.(8) ont mis en évidence un certain nombre de lacunes particulièrement en ce qui concerne la stœchiométrie, les bilans de réaction et l'oxydo-réduction. Leur conclusion concerne l'attitude des enseignants : *"les enseignants du premier cycle de l'enseignement supérieur se rendent-ils compte que leurs élèves sont loin de posséder les notions de base que l'on considère normalement comme acquises"*; *"les enseignants du secondaire peuvent y trouver une sorte de bilan des connaissances de leurs élèves, bilan établi en dehors du cadre conventionnel du baccalauréat."*

• *Maîtrise de la notion de mole*

Une étude sur la maîtrise de la notion de mole entre 16 et 20 ans (de la seconde au DEUG) réalisée par M. Chastrette et D. Cros (9) montre que le pourcentage de bonnes

(8) H. DEMONGE, G. GERMAIN et N. NOTIN ; "Que savent nos bacheliers en chimie ?" *B.U.P.*, 542, 599-604, 1972.

(9) M. CHASTRETTE et D. CROS ; "Enquête sur la maîtrise de la notion de mole et son évolution entre 16 et 20 ans", *L'actualité chimique*, 69-76, 1985.

réponses varie parfois assez fortement de la classe de terminale (C, D ou F) au DEUG (A 1ère année, B 1ère année et B 2ème année). Les principales erreurs relevées correspondent :

- à une prise en compte incorrecte de la stœchiométrie ;
- à la confusion entre molécule et atome (cas du dioxygène et de l'oxygène) ;
- à la confusion entre atome et mole.

• **Maîtrise de divers concepts liés à l'équation-bilan**

Une étude plus récente de M. Chastrette et coll. (10), par l'intermédiaire de tests divers, met en évidence de nombreuses lacunes concernant :

- a) **les bilans quantitatifs de réaction chimique** et la mauvaise maîtrise du bilan réactionnel ;
- b) **le concept d'atome** avec interprétations erronées par mauvaise perception des modèles ;
- c) **la notion d'équilibre chimique** et la non maîtrise de l'égalité des vitesses à l'équilibre qui ne sont pas mises en relation avec le symbole \rightleftharpoons .

• **Tests de pré-rentree à l'université**

À l'université Joseph Fourier (Grenoble I) des tests, entre 1984 et 1989, ont été proposés aux futurs étudiants, en juillet juste après les résultats du baccalauréat.

Une étude approfondie des résultats des candidats à l'inscription au DEUG A en 1988 a été réalisée par E. Hartvick (11) dans le cadre d'un stage dans notre laboratoire en fin de maîtrise de sciences physiques. Cette analyse, concerne 744 bacheliers C et 183 bacheliers D. Parmi les 18 questions du test, 4 concernaient l'équation-bilan. Une étude statistique a montré qu'une seule, parmi ces dernières, n'était pas discriminante. Ainsi une question (détermination du rapport de la pression finale/pression initiale avec modification du nombre de moles gazeuses) de degré taxonomique intermédiaire crée des difficultés pour tous les étudiants.

(10) M. CHASTRETTE, M.A. SAUCET et D. CROS ; Rapport A.T.P. : *Les transitions dans le système éducatif, recherches pour l'amélioration des méthodes d'enseignement et d'apprentissage*, 1987.
D. CROS, M. CHASTRETTE et M. FAYOL ; "Conception of secondary year university students of some fundamental notions in chemistry", *International Journal of Science Education*, 10 (3), 331-336, 1988.

(11) E. HARTVICK ; *Analyse des tests d'accueils du DEUG A*, Rapport de fin de stage de Maîtrise de Sciences Physiques, Université de Grenoble, 1991.

2.3. Les grands types de difficultés

Les premiers contacts avec la chimie étudiés par M. Méheut (12) sont très révélateurs de ce que pensent les élèves et du décalage entre leur savoir commun et le savoir enseigné. La prise en compte de leurs conceptions nécessite une approche très spécifique de la réaction chimique concernant la construction-appropriation de concepts fondamentaux tels que corps purs, éléments, réaction chimique. Les liens étroits entre ces concepts ont donné lieu à une analyse épistémologique par J.L. Martinand et R. Viovy (13, 14) .

Les propriétés relatives aux particules, les moins bien assimilées, sont celles qui sont le plus éloignées des propriétés perceptives de la matière (15) et ceci peut-être rapproché d'une remarque de J.D. Herron (16) : *"Partons de l'idée selon laquelle il est évident qu'un nombre substantiel d'étudiants lors de leur entrée au collège, environ 50 % parmi les diplômés, est incapable de fonctionner au niveau intellectuel décrit par Piaget comme formel opérationnel. Mais le contenu de la chimie et la démarche faite normalement pour l'enseigner nécessitent que l'étudiant opère à ce niveau formel opérationnel, s'il veut comprendre les concepts présentés."*

• L'élément chimique

Les programmes de la classe de cinquième en 1978 comportaient l'introduction de la notion d'élément chimique, donnée essentielle dans la progression entre la sixième et la troisième, permettant d'aboutir, par approche concrète de la réaction chimique, à la structure atomique de la matière. Trois questions essentielles se posent sur le concept d'élément chimique. Ainsi R. Viovy (17), estimant qu'il faut donner une définition simple de l'élément chimique, pose les deux premières.

Pourquoi l'introduction de cette notion ?

Ce fut la préoccupation essentielle dans l'histoire de la chimie, mais l'introduction d'un modèle atomique a montré la difficulté de sa manifestation fonctionnelle : d'une part,

-
- (12) M. MÉHEUT ; "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes", *B.U.P.*, 716, 997-1011, 1989.
 - (13) J.L. MARTINAND et R. VIOVY ; "La notion d'élément chimique en classe de cinquième : difficultés, ressources et propositions", *B.U.P.*, 613, 878-884, 1979.
 - (14) R. VIOVY ; "La notion d'élément chimique", *B.U.P.*, 663, 901-910, 1984.
 - (15) A.C. MITCHELL et S. NOVICK ; "Learning difficulties associated with the particulate theory of matter in the scottish Integrated Science Course", *European Journal of Science Education*, 4, 429-440, 1982.
 - (16) J.D. HERRON ; "Piaget pour les chimistes : où on explique que les "bons" étudiants ne peuvent pas comprendre", Traduction du *Journal of Chemical Education*, (52), 3, 146-150, 1975.
 - (17) *Ibidem* note (14)

l'écriture symbolique et sa syntaxe doivent être correctement manipulées et imposent la compréhension de nombreux concepts chimiques ; d'autre part l'utilisation du concept d'élément doit bien aider à la compréhension de la réaction chimique et aux lois de conservation de l'équation-bilan.

Comment construire le concept ?

Il y a surtout deux méthodes d'utilisation du travail expérimental : la première est favorable au travail autonome de l'élève et l'amène à construire un système explicatif ; la seconde est une démarche d'exposition de la notion et de son explication.

La troisième question : *Pourquoi ce concept est-il si difficile à construire ?* est posée par J.L. Martinand et R. Viovy (18) qui y répondent ainsi : *"Si le concept d'élément chimique pose un problème spécifique, c'est qu'il s'agit, non d'un concept empirique, mais d'un concept inclus dans un système théorique, et manié dans des raisonnements beaucoup plus formels, de type hypothético-déductifs."*

Des études plus récentes proposent d'imaginer et d'élaborer de manière très détaillée les contenus et les méthodes d'enseignement, les activités de classe, les capacités que les élèves doivent atteindre. Ainsi, à partir des activités d'éveil scientifique et de l'initiation aux sciences physiques sur la notion d'élément chimique, il est dégagé quelques propositions pour améliorer la manière dont on peut définir les objectifs de cet enseignement (19).

Il faut noter aussi que les modèles particuliers, qui nécessitent une parfaite maîtrise du concept d'élément chimique, ont fait l'objet de recherches spécifiques quant aux stratégies pédagogiques pour les enseigner aux jeunes élèves. Il est proposé une démarche de modélisation à partir de représentations iconiques statiques ou d'images animées (20).

• **Le vocabulaire chimique et son symbolisme**

Les lycéens, comme les étudiants, éprouvent de nombreuses difficultés pour assimiler le concept de quantité de matière qui en fait repose sur la maîtrise du vocabulaire chimique et de son symbolisme, utilisés dans les expressions de nombreux concepts fondamentaux comme le font à juste titre remarquer M. Bernard (21) et P. Gourmelon (22).

(18) *Ibidem* note (13)

(19) A. CHOMAT, C. LARCHER et M. MÉHEUT ; "Modèle particulière et démarche de modélisation". *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, INRP, 119, 1992.

(20) J.L. MARTINAND ; *Connaître et transformer la matière*, Peter Lang, Berne, 1986.

(21) M. BERNARD ; "Quantité de matière et notions connexes", *B.U.P.*, 600, 497-505, 1978.

(22) P. GOURMELON ; "À propos du concept de quantité de matière", *B.U.P.*, 606, 1359-1366, 1978.

le concept d'élément chimique est inclus dans un système théorique trop éloigné des propriétés perceptives

nécessité d'un formalisme précis et d'un langage approprié

W. Dierks (23), dans un article fort documenté, a recherché les difficultés qui apparaissent au cours de l'introduction de la grandeur "quantité de matière" et de l'application de l'unité "mol".

Sur toutes ces notions nécessaires pour traiter l'équation-bilan, il existe un formalisme précis et un langage approprié qui émanent des recommandations de l'IUPAC (24).

• La notion de mole

L'un des nombreux obstacles que rencontrent les apprenants est le passage du niveau microscopique que décrit le modèle au niveau macroscopique observable.

Dans l'enseignement secondaire français, ce passage s'effectue en seconde. Mais, où se situe la séparation entre ces deux niveaux de description ? Répondre à une telle question paraît difficile et pourtant les apprenants ont besoin de notions parfaitement claires. R. Audiffren (25) constate dans un article "l'énormité" et la non pertinence de la définition de la molécule : "la molécule est la plus petite partie d'un corps pur qui conserve les propriétés de ce corps". Il fait remarquer, à juste titre, que la plupart des propriétés d'un corps n'ont de signification qu'à une échelle suffisamment macroscopique c'est-à-dire pour des "grains de matières" contenant au moins 10^{14} molécules et précise que l'entité moléculaire ne peut plus conserver de telles propriétés.

La constante d'Avogadro est, de par son ordre de grandeur même (10^{23}) un obstacle.

Passer de l'inobservable à l'observable demande aux élèves d'accéder à un stade formel (le modèle, dont ils ont longuement entendu parler, est une représentation abstraite) pour aboutir à un niveau opératoire concret. Il n'est donc pas étonnant qu'ils rencontrent de nombreuses difficultés dans l'appréhension de ces concepts, comme le font remarquer A. Cervellati et coll. (26).

le passage de la molécule à la mole nécessite un haut degré d'abstraction

• La stœchiométrie

Les calculs de quantités de matière intervenant dans l'équation-bilan sont relativement faciles si elles sont dans des rapports simples avec les coefficients stœchiométriques de la réaction ; les difficultés apparaissent quand les quantités de matières sont quelconques (un réactif en excès).

(23) W. DIERKS ; "Teaching the mole", *European Journal of Science Education*, 3, 145-158, 1981.

(24) I.U.P.A.C., I.M. MILLS ; *Quantities, units and symbols in physical chemistry*, Oxford, Blackwell, 1993.

(25) R. AUDIFREN ; "À propos de l'introduction de la notion de molécule en classe de seconde". *B.U.P.*, 606, 1367-1368, 1978.

(26) A. CERVELLATI, A. MONTUSCHI, D. PERUGINI, N. GRIMELINI-TOMASINI et B. PECORI BALANDI ; "Investigation of secondary School Students' Understanding of the mole concept in Italy", *Journal of Chemical Education*, 59 (10), 852-856, 1982.

les calculs de quantités de matière rendus difficiles à cause d'une mauvaise maîtrise des proportions

De même, le calcul de la quantité de matière, connaissant la masse d'un échantillon de produit et sa masse molaire, par la relation $n = \frac{m}{M}$ occasionne chez les élèves de nombreuses erreurs.

Une analyse récente réalisée par M.J. Schmidt (27) montre bien à partir d'un test à choix multiple à quel point les élèves maîtrisent mal cette relation.

• Les équilibres chimiques

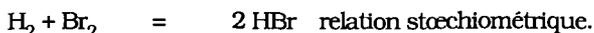
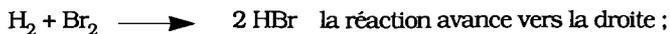
Les réactions en équilibre (ou renversables) ont été très étudiées, surtout en Angleterre où cet enseignement se fait plus tôt qu'en France. Toutes les recherches effectuées sur ce cas particulier de l'équation-bilan concernent essentiellement les conceptions sur deux points : les réactions en équilibre et les déplacements de ces équilibres.

A. Johnstone et coll. (28) furent parmi les premiers à constater que l'équation chimique et la stœchiométrie semblent jouer un rôle important dans l'émergence des conceptions relatives aux équilibres. Ces conceptions seront reprises dans la partie 3.

M. Hackling et coll. (29) ont également montré qu'une conception très répandue consistait en une relation simple entre les concentrations (ou les quantités) des réactifs et des produits à l'équilibre. Cette relation est soit l'égalité, soit la correspondance, par nombres entiers, entre les coefficients stœchiométriques. Pour un équilibre $A + B \rightleftharpoons C + D$ atteint à partir de conditions initiales précises (2,2,0,0) les étudiants imaginent l'état final selon deux représentations dans lesquelles la relation est soit l'égalité (2,2,2,2) soit la correspondance par nombres entiers des coefficients stœchiométriques (1,1,1,1). De même, R. Maskill et coll. (30) ou A.C. Banerjee (31) ont étudié les conceptions sur les vitesses, les conditions d'établissement et de déplacement de ces équilibres.

-
- (27) M.J. SCHMIDT ; Secondary school students' strategies in stoichiometry, *International Journal of Science Education*, 12 (4), 457-471, 1990.
- (28) A. JOHNSTONE, J. MAC DONALD et G. WEBB ; "Chemical equilibrium its difficulties", *Education in chemistry*, 14, 169-171, 1977.
- (29) M. HACKLING et P.J. GARNETT ; "Misconceptions of chemical equilibrium", *European Journal of Science Education*, 7, 205 -214, 1985.
- (30) R. MASKILL et A.F.C. CACHAPUZ ; "Learning about the chemistry topic of equilibrium : the use of word association tests to detect developing conceptualizations", *International Journal of Science Education*, 11 (1), 57-69, 1989.
- (31) A.C. BANERJEE ; "Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium", *International Journal of Science Education*, 13 (4), 487-494, 1991.

Dans l'écriture de l'équation de réaction l'IUPAC propose un formalisme très précis :



les équilibres
chimiques sont la
source de très
nombreuses
conceptions

La distinction claire entre ces diverses significations n'est cependant pas facile à mettre en œuvre dans le temps didactique et reste très peu utilisée dans les ouvrages d'enseignement. Dans les exemples cités, nous reprenons le symbolisme utilisé par les auteurs qui n'est pas nécessairement celui conseillé par l'IUPAC depuis 1988 et confirmé en 1993.

3. L'ÉQUATION-BILAN, UN CONCEPT POLYSÉMIQUE

On vient de le voir, l'équation-bilan intègre beaucoup de notions et, de ce fait, suscite dans l'esprit de l'apprenant des conceptions qui persistent au delà du premier apprentissage. Circonstance aggravante, l'équation-bilan présente des significations multiples. Elle prend appui sur de l'explicite elle suggère du non-dit. Elle présuppose beaucoup de notions associées à l'évolution de la réaction et l'enseignant passe souvent de l'une à l'autre sans le dire. La richesse de ce concept à sens multiples qui pourrait être un avantage, pour une présentation intégrée de la réaction chimique, devient alors un obstacle pour la compréhension de l'apprenant.

3.1. Confusion avec l'équation mathématique

On parle quelquefois d'arithmétique chimique pour évoquer la stoechiométrie des réactions et le terme d'équation, qu'on associe à chaque réaction dans le but d'en dresser le bilan, est consacré à tort par l'usage. Cette équation ne peut pas être prise ici dans son sens mathématique car elle n'exprime pas une égalité. Lorsqu'on écrit :



on signifie simplement que le premier membre contient les formules moléculaires des réactifs et le second membre celles des produits de réaction. La flèche signifie simplement qu'il y a transformation des réactifs vers les produits. Il n'y a pas, dans la transformation, égalité mais conservation des masses, des atomes et des charges électriques (pas obligatoirement des molécules et des volumes).

le concept
d'équation-bilan
et les équations
mathématiques

Bien entendu si on considère la réaction de synthèse de l'eau :



on comprend que l'équivalence strictement mathématique "1/2 O₂ ≡ O" n'ait pas de signification physique puisque le dioxygène présent à raison d'une demi-mole se transformera en une mole d'atomes d'oxygène présents dans la mole de H₂O formée.

3.2. L'intégration du facteur temps

Lorsque les réactions sont instantanées, le problème ne se pose pas. Par contre si les réactions sont lentes l'avancement de la réaction sera différent à chaque instant. L'équation-bilan n'est pas en mesure de le préciser sauf si l'avancement de la réaction ξ (ksi) est explicité.

Lorsqu'on veut définir la **vitesse de réaction** il est évidemment nécessaire de recourir à ce facteur temps. La variable chimique avancement de réaction, ξ , est alors utilisable à condition que sa définition, comme le font remarquer F. Rouquerol et G. Scacchi (32), soit valable quel que soit le réacteur utilisé, qu'il soit fermé, sans échange de matière avec l'extérieur et à volume de phase réactionnelle constant, ou ouvert et fonctionnant en régime permanent. Ces auteurs ont ainsi été amenés à définir le **degré d'avancement de réaction** α , variable intensive, comprise entre 0 et 1 telle que :

$$\alpha = \frac{\xi}{\xi_{\max}} \quad \text{et} \quad \xi_{\max} = \frac{n_0(L)}{|v(L)|}$$

le concept
d'équation-bilan
et la facteur
temps

ξ_{\max} étant la valeur maximale de l'avancement de réaction, calculée théoriquement à partir de la quantité initiale n_0 de réactif minoritaire (ou limitant), noté L.

Le degré d'avancement de réaction α n'est ainsi égal à 1 que lorsque la réaction est totale. Lorsque le système atteint un équilibre thermodynamique pour une valeur ξ_{eq} qui rend minimum son potentiel thermodynamique le degré de réaction n'évolue plus et α_{eq} est maximum mais inférieur à 1.

Le degré de réaction peut ainsi être très variable : pour $\alpha < \alpha_{\text{eq}}$, l'équilibre n'est pas atteint, pour $\alpha = \alpha_{\text{eq}}$, le système à l'équilibre n'évolue plus mais les réactions directes et inverses se poursuivent à la même vitesse.

(32) *Ibidem* note (7)

3.3. La dualité microscopique-macroscopique

En chimie, ce qui est observable appartient au niveau dit macroscopique. La résolution des problèmes et exercices de chimie s'exerce souvent à partir de ces observables macroscopiques (volume, concentration, pression, masse...) à l'équilibre. Ces variables sont soit intensives ne dépendant que de l'état, soit extensives et proportionnelles à la quantité de matière. Ces observables macroscopiques sont **les résultats de réactions et d'interactions entre des nombres gigantesques d'entités** moléculaires, atomiques ou ioniques, constituantes **du niveau dit microscopique**. Ces réactions et interactions sont également formalisées à partir de l'équation de réaction.

un déplacement
mental entre
deux niveaux :
nécessaire...

La compréhension profonde des phénomènes observables (et de leurs traductions symboliques ou mathématiques) passe par une appréhension correcte du modèle non observable. Les enseignants, désireux de traiter ces deux aspects se déplacent facilement, sans toujours l'indiquer, entre ces deux niveaux mais les capacités que cela demande aux apprenants sont souvent sous-estimées par les enseignants comme l'indiquent J. Silberstein et coll. (33). Ce déplacement mental permanent, à travers l'équation de réaction, entre les deux niveaux nous paraît relever d'un stade de pensée formelle qui n'est pas acquis par tous les étudiants. J.D. Herron (34) estime que les concepts de la chimie sont des concepts abstraits, inaccessibles aux étudiants qui n'ont pas atteint le stade formel de Piaget. Les évaluations internationales convergent pour affirmer que le nombre d'étudiants qui accèdent à ce niveau a été longtemps surestimé et qu'il n'excède pas 50 %. Les évaluations menées dans notre laboratoire sont cohérentes avec ces évaluations pour les étudiants du DEUG A1 primo-inscrits (50 %) mais encore en retrait pour les étudiants du DEUG B1 et du DEUG A31 (première année d'un DEUG en trois ans). Nous avons cependant pu montrer que les évolutions de la pensée formelle se poursuivent à l'université et qu'il y a, sur ce plan, interaction entre la formation et la capacité formelle, même après l'adolescence (35).

... mais pas
accessible à
tous les étudiants

Nous avons testé l'impact d'une entrée par le macroscopique dans le champ des équilibres chimiques et avons pu mesurer la prégnance de l'équation de réaction dans ce domaine

(33) R. BEN-ZVI, B. EYLON et J. SILBERSTEIN ; "Theory, Principles and Laws", *Education in chemistry*, 89-92, 1988.

R. BEN-ZVI, B. EYLON et J. SILBERSTEIN ; "Students visualisation of a chemical reaction", *Education in chemistry*, 1987.

(34) *Ibidem* note (16)

(35) R. BARLET et M. MONTAGNE ; *Évolution de la pensée formelle, la dynamique de la formation*, en cours de rédaction.

le concept
d'équation-bilan
et l'observable,
l'inobservable

grâce à un questionnaire-test analysé dans le cadre d'un DEA (36) :

- approche macroscopique qui occulte la dynamique réactionnelle microscopique pour la grande majorité des étudiants (60 %) ;
- relation perçue comme nécessairement simple entre les quantités de réactifs et de produits à l'équilibre (soit égalité soit relation simple par nombres entiers entre les coefficients stœchiométriques) pour 25 % des étudiants ;
- privilège fort donné à l'écriture de l'équation de réaction dans le sens direct.

3.4. La dualité sens direct - sens inverse

Lorsque la réaction chimique est totale, on distingue clairement réactifs et produits de réaction et la réaction évolue dans le sens direct, des réactifs vers les produits. Par contre, dans le cas d'un équilibre chimique, la réaction se produit dans le sens direct et dans le sens inverse et on ne peut plus parler de réactifs et de produits mais plutôt, comme le propose A. Burneau, de réactants (37).

Sur ce plan nous avons retrouvé chez les arrivants à l'université des conceptions mises en évidence par A. Johnstone et coll. (38) ou encore par M. Hackling et P.J. Garnett (39) :

le concept
d'équation-bilan
et le sens
d'écriture de la
réaction

- la double flèche \rightleftharpoons , symbole indiquant que l'équation chimique est relative à un équilibre, est en fait interprétée comme symbolisant l'égalité entre les quantités de réactifs et de produits à l'équilibre ;
- cette même double flèche, lorsque les flèches sont de longueurs inégales, est interprétée comme une inégalité des vitesses directe et inverse ;
- les deux membres de l'équation chimique constituent deux systèmes indépendants qui ne conduisent pas au même équilibre chimique ;
- l'augmentation de température augmente uniquement la vitesse de la réaction directe et demeure sans effet sur la vitesse de la réaction inverse.

(36) J.M. CHAUBET ; Mémoire de DEA : *Équilibres chimiques, difficultés didactiques et dualité macroscopique-microscopique*, Grenoble, septembre 1992.

(37) A. BURNEAU ; *Thermodynamique et équilibres chimiques*, Inter Editions, Paris, 1991.

(38) *Ibidem* note (28)

(39) *Ibidem* note (29)

3.5. Ambiguïté de l'expression "équilibrer une équation"

Au cours d'une réaction les éléments se conservent. On doit donc retrouver dans le second membre de l'équation de réaction correspondante, tous les éléments figurant dans le premier membre mais seulement eux. Lorsque cette condition est satisfaite on dit couramment que *l'équation est équilibrée*. Équilibrer une équation de réaction reviendra donc à déterminer les coefficients stoechiométriques qui assurent une telle conservation. Pourtant si cette opération est parfaitement claire dans l'esprit de l'enseignant il arrive trop souvent à ce dernier, par manque de rigueur ou par volonté de se référer à la réaction, de parler "*d'équilibrer une réaction*". Cette expression est particulièrement malheureuse car nous avons pu vérifier la confusion qui existe, dans une proportion inattendue, parmi des étudiants de deuxième année d'université entre les *réactions équilibrées*, c'est-à-dire les équilibres chimiques et les *équations de réaction équilibrées* c'est-à-dire les équations disposant des bons coefficients stoechiométriques.

4. PROPOSITIONS DIDACTIQUES

La multiplication inattendue de conceptions et d'erreurs régulièrement reproduites dans les différents cursus ne peut pas seulement s'expliquer par le degré d'abstraction et de conceptualisation à mobiliser, degré mis en évidence par l'histoire des sciences. Notre hypothèse est que le savoir enseigné, en cette matière, n'est pas assez rigoureux et pêche par ambiguïtés et imprécisions. Un effort d'explicitation, de normalisation (utilisation plus stricte des recommandations de l'IUPAC) dans le langage savant permettrait une transposition didactique plus facile et un langage plus précis au niveau scolaire.

Sans avoir la prétention d'apporter une réponse globale à ces difficultés, il nous apparaît que la bonne appréhension de l'équation-bilan et son utilisation comme outil pour l'ensemble de la réaction chimique réclame une double condition :

- la maîtrise de nombreux concepts théoriques qui doivent être mis en œuvre, dans des raisonnements formels de type plutôt hypothético-déductifs ;
- une maîtrise du langage correspondant, de façon à réduire les zones d'ombres et d'imprécisions et à permettre une meilleure appropriation des concepts utilisés.

C'est sur ce dernier point qu'il nous semble possible de faire des propositions relativement faciles à mettre en œuvre. Mais en ne perdant pas de vue combien la charge symbolique est grande en chimie : dans cette discipline peut-être plus qu'ailleurs, le langage interagit fortement avec le

concept, la moindre représentation de symboles renvoie à une représentation spatiale ou conceptuelle souvent décalée entre apprenants et enseignants. Le langage chimique véhicule un "déjà-là" conceptuel très fort par où peuvent pénétrer les ambiguïtés et se renforcer les conceptions.

Une mise en ordre langagière dans le domaine de l'équation-bilan nous paraît ainsi aller bien au delà du seul langage. Rappelons les propriétés que **Condillac** donnait à la langue dans sa logique – "les langues sont de véritables méthodes analytiques" – et ajoutons-y les caractéristiques définies par le lexicographe **Benveniste** – "la constitution d'une terminologie propre marque dans toute science l'avènement ou le développement d'une conceptualisation nouvelle."

Sans vouloir déboucher sur une nouvelle terminologie nos propositions peuvent clarifier des propositions antérieures que nous avons déjà formulées (40) ou qui ont été avancées par d'autres équipes préoccupées par les mêmes difficultés (41).

nécessité
d'utiliser un
langage plus
précis et non
ambigu

4.1. Équations et réactions équilibrées

La confusion très générale entre un équilibre chimique et une équation équilibrée entretenue par le terme "équilibrer", qu'il se rapporte à équation ou à réaction, nous amène à proposer de proscrire l'expression "équilibrer une réaction" et de la remplacer par l'expression "égaliser une équation de réaction". Ce verbe "égaliser" lèverait toute ambiguïté et serait plus en accord avec la recommandation de l'IUPAC d'utiliser le signe = pour un réaction stœchiométrique conservant masses et atomes. De plus l'utilisation du raccourci "égaliser une réaction", un peu inévitable dans le langage oral, ne risquerait pas d'entraîner une modification du sens comme le fait souvent "équilibrer une réaction". Ce verbe nous paraît mieux adapté :

- que le verbe "balancer" utilisé par les québécois ; celui-ci évoque aussi bien l'égalité (analogie avec la balance comptable) que la notion de statique (plateaux de la balance), inadaptées aux équilibres chimiques ;
- que le verbe "ajuster" suggéré par A. Mayrargue-Kodja (41) ; ce verbe n'implique pas vraiment l'égalité liée aux lois de conservation et de plus, il risque d'évoquer des ajustements, des petites modifications.

équilibrer,
balancer, ajuster
ou égaliser une
réaction ?

(40) R. BARLET ; "La dualité microscopique-macroscopique en Chimie, difficultés et enjeux didactiques", *Actes 1° ECRICE, 9° JIREC, Montpellier 25-28 Août 1992. Bulletin du CIFEC, 63-67, juin 1993.*

(41) A. MAYRARGUE-KODJA ; "Que représente une équation-chimique ?", *Actes 1° ECRICE, 9° JIREC, Bulletin du CIFEC, 20-25, juin 1993.*

L. DOGGUY, A. MAYRARGUE-KODJA et K. BOUJLEL ; "Une approche concrète pour mieux faire assimiler les notions d'évolution et d'équilibre", *Actes 1° ECRICE, 9° JIREC, Bulletin du CIFEC, 26-31, juin 1993.*

Cette proposition nécessiterait cependant une étude d'impact de cette terminologie.

4.2. Équation-bilan et équation de réaction

Il nous paraît nécessaire de bien différencier ces deux dénominations.

L'équation-bilan représente la transformation chimique totale et permet de déterminer dans quelle proportion doivent être mises en présence les quantités de matière des réactifs pour qu'en fin de réaction ces derniers aient totalement disparu pour former des produits eux-mêmes dans des proportions définies. Par exemple, dans la synthèse de l'eau la quantité de matière de dihydrogène doit être le double de celle de dioxygène pour que ces réactifs disparaissent totalement. L'équation-bilan apportera alors la schématisation mathématique nécessaire pour conduire l'exploitation quantitative de la transformation chimique.

L'équation de réaction représente une situation plus générale : des quantités de matière quelconques réagiront dans les proportions stœchiométriques et la réaction totale dans le sens direct s'arrêtera par épuisement du réactif limitant, dans le cas où la réaction inverse n'a pas lieu de façon observable, c'est-à-dire hors d'un équilibre chimique. Par exemple, toujours dans la synthèse de l'eau, si la quantité de matière de dihydrogène est le triple de celle de dioxygène, compte tenu de l'équation-bilan qui indique que les quantités de matière respectives de H_2 et de O_2 réagissent dans le rapport deux, on peut prévoir que la réaction s'arrêtera par épuisement du dioxygène et il restera du dihydrogène.

Pour clarifier cette différenciation, nous suggérons d'**utiliser le plus tôt possible** dans l'enseignement l'**équation de réaction** (avec des quantités quelconques de matière) à la place de l'équation-bilan (les proportions stœchiométriques sont d'un emploi trop simple). Cela alourdirait un peu la présentation, mais apporterait un bénéfice didactique certain.

Pour ces deux types de transformations il nous paraît judicieux d'**utiliser la flèche \longrightarrow avec la signification "donne"** plutôt que la signification purement cinétique préconisée par l'IUPAC. L'emploi du signe = pour une transformation stœchiométrique nous paraît discutable car, bien qu'il y ait égalité des masses dans les deux membres de l'équation, intervient obligatoirement une modification de l'identité moléculaire des réactifs transformés en produits.

nécessité de bien différencier l'équation-bilan et l'équation de réaction

4.3. Dualité macroscopique-microscopique

Une caractéristique de l'équation-bilan est sa dualité, sa double fonction de représentation de deux niveaux de description très différents des composés chimiques :

- le niveau macroscopique, manipulatoire, lié à la transformation statistique d'un nombre gigantesque d'espèces chimiques, c'est-à-dire à la transformation de la matière telle qu'on l'observe ;
- le niveau microscopique, particulière, lié au réarrangement des modes de liaison entre atomes à l'échelle de l'infiniment petit, du modélisable.

dualité
observable-
modélisable,
concret-abstrait

Cette dualité macroscopique-microscopique (observable-modélisable, concret-abstrait) est une spécificité et en même temps une difficulté de l'enseignement de la chimie. L'enseignant se déplace fréquemment, et souvent de façon implicite, entre ces deux niveaux. Mais le décalage, la coupure entre ces deux niveaux est source de difficultés, au lycée et au collège comme à l'université.

L'examen des programmes et manuels scolaires a conduit C.Solomonidou à observer (42) que l'enseignement actuel de la chimie fait prévaloir la représentation du niveau atomique aux dépens de la représentation du niveau manipulatoire et du concept de substance. Le fonctionnement du niveau atomique serait ainsi indépendant, déconnecté, de celui du niveau manipulatoire.

Inversement, nous avons montré que l'enseignement universitaire sur des thèmes tels que l'équation d'état des gaz parfaits ou encore les équilibres chimiques (concepts vus antérieurement) tend à privilégier l'emploi de formules-types et à induire une lecture uniquement macroscopique entraînant un déficit de sens des phénomènes observés et un défaut de maîtrise conceptuelle (43). Par contre, une lecture microscopique, par exemple dans le domaine des mécanismes réactionnels en chimie organique, amène à développer sur une molécule isolée les aspects structuraux et électroniques localisant les charges partielles et les sites de réactivité. Le risque est alors grand de donner une vision de la réactivité où une **molécule-réactif** choisit un seul **substrat-cible**, en un lieu bien localisé et prévisible à l'avance, indépendamment des phénomènes cinétiques et thermodynamiques et des nombreux chocs inefficaces.

suivant les cas
ce n'est pas le
même niveau qui
est privilégié

Pour éviter une pareille déconnection entre ces deux niveaux l'équation-bilan nous paraît constituer le champ privilégié où il est possible de **recourir à un va-et-vient continu** permettant de développer une conscience microscopique nécessaire à la compréhension conceptuelle et permettant de la mettre en liaison avec les observations macroscopiques expérimentales. Mais le déplacement entre ces deux niveaux doit se faire de façon claire et explicite en indiquant bien les changements de niveau. L'équation-bilan pourrait alors être le moyen de combattre les conceptions sur les réactions chimiques dont H. Stavridou a montré les

(42) C. SOLOMONIDOU, Thèse de didactique de la chimie : *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du collège*, Paris VII, octobre 1991.

(43) *Ibidem* note (40)

nécessité
d'utiliser
l'équation-bilan
dans un va-et-
vient perpétuel
entre les états
observables et
modélisables

principales caractéristiques, persistantes jusqu'en terminale (44) :

- absence de relation avec l'identité des substances ;
- représentations largement issues du sens commun telles que "naturel-artificiel", "action de la chaleur ou du feu", "destruction et disparition" ;
- absence de réarrangement des atomes capable de conduire à des molécules nouvelles ;
- vision dissymétrique du type "agent-patient".

L'équation-bilan dans une **telle présentation duale explicite** devrait ainsi assurer les conditions d'une meilleure correspondance entre les faits observés au niveau manipulatoire (phénoménologie) et leurs représentations au niveau atomique (modèles moléculaires).

4.4. Équilibre chimique et réversibilité

Lié à l'équation de réaction le vocable "*réaction réversible*" ou encore "*réaction limitée*" est trop souvent utilisé comme synonyme d'"*équilibre chimique*".

qualifier une
réaction de
"limitée" ou de
"réversible" est à
proscrire...

Le vocable "*réaction limitée*" est ambigu. S'agit-il d'une réaction limitée par un réactif limitant (en défaut), par une réaction lente encore en évolution à l'instant où on l'observe ou bien d'une réaction directe, limitée par la réaction inverse, c'est-à-dire d'une réaction chimique en cours d'évolution vers son état d'équilibre ou déjà parvenue dans cet état ? Le mieux est sans doute de proscrire ce terme.

Le terme "*réversible*" possède lui un sens très précis en thermodynamique et il s'applique à une transformation, quel que soit son sens, sans que cette transformation soit nécessairement une réaction chimique (exemple d'une compression ou d'une détente isotherme d'un gaz dans des conditions réversibles). **L'expression réaction réversible pour deux réactions compétitives qui se déroulent dans les deux sens doit donc aussi être bannie car elle peut être source de grande confusion.** Les adjectifs de remplacement, pour un équilibre chimique, sont rarement satisfaisants comme le souligne A. Burneau (45).

... de même
"inversible"
"inversible"

Les termes comme "*inversible*" ou "*inversible*" bien que largement utilisés peuvent être source de conceptions et conduire à l'idée que la réaction peut se produire totalement dans un sens ou dans l'autre avec, dans le cas des équilibres chimiques, le risque d'une conception "pendulaire" (12 % des étudiants de deuxième année d'université testés à Grenoble par J.M. Chaubet (46) montraient une telle conception : *Un équilibre chimique débute par la réaction*

(44) H. STAVRIDOU, Thèse de didactique de la chimie : *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*, Paris VII, décembre 1990.

(45) *Ibidem* note (37)

(46) *Ibidem* note (36)

dans le sens direct - sens 1 - puis elle s'effectue dans le sens inverse - sens 2 - ensuite elle repart à nouveau dans le sens direct... jusqu'à un état final où tout s'arrête).

l'équilibre chimique devrait être caractérisé par un adjectif n'ayant pas un double sens

Si "équilibrer une réaction" est remplacé par "**égaliser une réaction**", comme nous le proposons, rien ne s'opposerait à employer l'expression "*une réaction équilibrée*" pour signifier que tous les réactants sont présents en quantités parfaitement définies et constantes au niveau macroscopique, les quantités de l'état d'équilibre. Il n'y aurait alors plus lieu d'employer un adjectif spécifique par exemple "*renversible*".

CONCLUSION

Nous ne savons pas si le bilan lié à l'équation de réaction est à la chimie ce que le théorème de Pythagore est aux mathématiques, comme on le dit quelquefois, mais il est certain que savoir faire un tel bilan constitue une capacité de base pour tout chimiste.

On peut s'interroger sur les raisons pour lesquelles le concept d'équation-bilan est négligé dans l'enseignement. Est-ce parce qu'il fait partie du fonds commun de la culture du chimiste ou encore parce que, au carrefour de toutes les notions de base, il est comme immanent à l'enseignement de la chimie ?

Il est clair que l'enseignement secondaire, jusqu'à aujourd'hui, ne lui donne pas la place qui devrait lui revenir et le traite trop comme un outil, sans réel approfondissement de sa complexité. L'université, quant à elle, considère à tort, nous pensons l'avoir suffisamment démontré, que l'équation-bilan est un pré-requis un peu trivial que tous les arrivants à l'université doivent maîtriser sans difficultés. Les étudiants sont également convaincus que s'ils présentent des carences elles ne s'expriment pas sur ces questions réputées simples. Ce n'est que lors de modules d'approfondissement sur ce thème qu'ils découvrent la richesse et la complexité du concept d'équation-bilan.

L'équation-bilan constitue de fait, à nos yeux, une **modélisation complexe** qui possède une véritable fonction unificatrice vis-à-vis des divers phénomènes intervenant dans la réaction chimique : identité des substances, états de la matière, nature de la phase réactionnelle, modélisation du microscopique, passage au macroscopique, conditions cinétiques et thermodynamiques, etc.

Mais cette modélisation complexe présente un caractère paradoxal. L'équation-bilan présente des aspects contradictoires. C'est un **concept à la fois très concret (il correspond à une réalité observable) et très théorique** : on observe et mesure les quantités de matière qui ont réagi mais on ne peut interpréter les résultats que par une modélisation de l'invisible. C'est un **concept à la fois schématique et élaboré** : la schématisation de la réaction ainsi

représentée n'exclut ni les réactifs en défaut ni les réactions lentes ni les équilibres chimiques.

Ce caractère contradictoire conduit à une difficulté épistémologique et didactique : comment, à partir de la nature du concept à enseigner, permettre à chaque apprenant de construire son savoir personnel ? Dans le cas de l'équation-bilan il s'agit de transcrire, avec des symboles appropriés, le phénomène observable qu'est la réaction chimique en prenant appui sur l'expérimental, d'apprendre en même temps à décrire le phénomène et à l'interpréter au moyen du modèle. Comme nous l'avons proposé ces deux niveaux de description doivent être nettement différenciés et explicites. Toute démarche constructiviste d'enseignement intègre le modèle comme instrument d'intelligibilité mais l'apprentissage et la démarche peuvent être fondés soit sur la modélisation elle-même soit sur l'utilisation du modèle comme moyen d'interprétation des situations expérimentales rencontrées.

C. Larcher et coll.(47) ont montré que si la première démarche paraît mobiliser des capacités formelles qui sont finalement accessibles au collège, la seconde trop fréquente en France, peut déboucher sur des énoncés dogmatiques et partiels dépendant des phénomènes observés. Ces auteurs ont fait construire un modèle simple à partir d'une conjecture reposant sur un mot "**particule**" dont les élèves ont eu à construire la signification. Cette démarche nous paraît particulièrement adaptée à l'équation-bilan et à tous les concepts qui lui sont liés et on peut penser que les nouveaux programmes mis en place en quatrième pourraient lui donner un cadre possible.

Établir le lien permanent entre la théorie et le concret, fournir une modélisation cohérente en mesure de répondre à la diversité des situations expérimentales, clarifier les différents concepts par une grande rigueur de langage, voilà finalement quelques-unes des actions didactiques pour lesquelles nous pensons que l'équation-bilan pourrait constituer à la fois un vecteur et un champ unificateur.

Roger BARLET
Dominique PLOUIN
Laboratoire de Pédagogie Universitaire
et de Didactique de la Chimie
Université Joseph Fourier, Grenoble

(47) C. LARCHER, A. CHOMAT et M. MÉHEUT, "À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états", *Revue française de pédagogie*, 1990, n° 93, 51-62.,

POINT DE VUE À PROPOS DES ÉQUILIBRES CHIMIQUES

Claudine Larcher

À propos des équilibres chimiques, certaines expressions et certains symbolismes consacrés par l'usage sont ici interrogés. Ils sont considérés comme susceptibles d'induire de mauvaises représentations. Quelques propositions de modifications sont faites dans un souci de cohérence des codes symboliques et de rigueur de langage.

Faute de distinguer le registre des phénomènes, le registre des représentations symboliques et le registre des modèles avec suffisamment de rigueur, nous entraînon souvent les élèves dans de mauvaises représentations des phénomènes et nous les entretenons dans des confusions.

Le domaine des réactions chimiques, de leurs symbolisations, de leur interprétation est un bien bel exemple de dérives de vocabulaire et de confusion des registres. Chacun pourra se surprendre en classe en flagrant délit de formulations inadéquates.

1. LES RÉACTIONS CHIMIQUES DITES "TOTALES"

Considérons tout d'abord les réactions chimiques qui consomment complètement les réactifs. Ce sont celles qui sont présentées aux élèves en début d'enseignement de la chimie.

La réaction chimique est alors définie comme un phénomène qui permet à partir de certaines substances d'obtenir de nouvelles substances. Ce phénomène est symbolisé par : une écriture codifiée des substances initiales - une flèche - une écriture codifiée des substances finales. Cette écriture doit pouvoir rendre compte de la stoechiométrie de la réaction (registre des phénomènes) et des lois de conservation selon lesquelles ces réactions s'effectuent (registre des interprétations).

Pour cela on ajuste les coefficients dits "stoechiométriques" pour traduire la conservation de chaque élément.

Si on passe au registre des modèles permettant une représentation des réactions chimiques, la réaction chimique sera interprétée en termes de ruptures et d'établissement de liaisons entre atomes ; l'écriture codifiée des substances sera lue en termes de moles de molécules, ces molécules étant constituées d'atomes, et les lois de conservation pourront concerner les atomes.

une écriture
symbolique

du registre des
phénomènes...

à celui de la
modélisation

Dès que l'on aborde les problèmes quantitatifs, la quantité de matière exprimée en moles est bien utile mais nécessite que l'écriture symbolique des réactions chimiques soit lue en relation avec le registre de la modélisation.

Il ne faut pas oublier cependant que ces écritures de réactions ne symbolisent que des réactions-bilan concernant des populations de molécules et non pas, en général, des mécanismes réactionnels concernant des molécules individuelles. Les modèles particuliers sont donc à utiliser avec quelques précautions.

Ce qu'on appelle "équilibrer une réaction" est en fait un ajustement entre le registre de l'écriture symbolique et le registre du phénomène en liaison éventuellement avec le registre du modèle.

équilibrer une
réaction :
expression
pernicieuse

On peut dire que l'écriture d'une réaction est incorrecte si les coefficients stoechiométriques sont incompatibles avec la conservation des éléments mais dire que la réaction n'est pas équilibrée est un glissement de vocabulaire qu'il faudrait arriver à éviter car la réaction se fait indépendamment de l'écriture avec laquelle on la symbolise. On confond ce faisant le registre des phénomènes et celui du symbolisme. Ainsi, cette expression est pernicieuse à plus d'un titre : parce qu'elle laisse croire que nous exerçons une action sur la réaction alors qu'on ne travaille que sur l'écriture symbolique de ces réactions, parce que l'ajustement des coefficients stoechiométriques relève d'un concept de conservation et non d'un concept d'équilibre, enfin que l'usage de ce verbe interférera avec l'usage du nom équilibre qui sera introduit plus tard lorsque le champ d'étude des réactions chimiques ne sera plus limité aux réactions totales.

La flèche code l'information "se transforme en"; elle décrit une transformation, indépendamment des quantités mises en jeu ; la réaction se déroule ainsi jusqu'à épuisement d'un des réactifs.

2. LES RÉACTIONS CHIMIQUES CONDUISANT À L'ÉTABLISSEMENT D'UN ÉQUILIBRE CHIMIQUE

Il arrive que les substances formées puissent elles aussi réagir entre elles pour redonner les substances dont on est parti. On est alors en présence de deux réactions : une réaction de type $A + B \longrightarrow C + D$ et une réaction de type $C + D \longrightarrow A + B$. Il s'agit ici d'une écriture générique, qu'il faut instancier en introduisant des coefficients stoechiométriques et qui peut mettre en jeu un réactif ou un produit unique.

deux réactions
compétitives

On représente conventionnellement ces deux réactions compétitives par : l'écriture symbolique des substances initiales - deux flèches superposées de sens différents - l'écriture

assurer une
continuité des
formalismes

symbolique des substances nouvelles. Afin de conserver le même formalisme pour coder des informations de même nature, chaque flèche symbolisant une des réactions devrait posséder une seule pointe et une longueur non significative comme c'était le cas pour une réaction unique. Chacune des réactions chimiques s'effectuant selon des lois de conservation des éléments, les coefficients stoechiométriques doivent être ajustés. Lorsqu'ils le sont pour l'une des réactions, ils le sont pour l'autre.

Les cinétiques des réactions dépendent des réactivités des substances mais aussi des concentrations des substances, les vitesses des deux réactions évoluent au cours du temps. Il existe un temps, qui peut être très long ou très court, au bout duquel les deux réactions évoluent à la même vitesse ; il y a alors à chaque instant autant de A et de B disparaissant pour former C et D qu'il y a de A et B apparaissant à partir de la réaction entre C et D. Autrement dit les concentrations des espèces A,B,C,D sont stationnaires. D'un point de vue non plus cinétique mais énergétique, les concentrations des espèces en présence sont stationnaires lorsque l'avancement de la réaction est tel que l'enthalpie libre de la réaction soit minimum. On dit alors qu'il y a équilibre chimique.

équilibre
chimique...

Cet équilibre s'établit pour certaines concentrations des espèces en présence (A,B,C,D). Pour certaines réactions, l'équilibre est établi avec une grande concentration des corps A et B et une faible concentration de corps C et D (ce sont les équilibres qui ont une petite constante d'équilibre) ; pour d'autres, l'équilibre est établi pour une faible concentration des corps A' et B' et une grande concentration des corps C' et D' (ce sont les équilibres qui ont une grande constante d'équilibre ; à la limite il ne reste plus de A' ni de B' et cette réaction est dite "totale"), pour certaines réactions exceptionnelles l'équilibre chimique peut s'établir pour des concentrations identiques des réactifs et des produits.

On peut dire qu'il y a équilibre chimique ou que les concentrations des réactifs et des produits sont stationnaires. Dire que les réactions sont équilibrées ou en équilibre est déjà un glissement de langage qui peut conforter des représentations incorrectes des systèmes chimiques en équilibre, représentations mises en évidence par de nombreuses recherches. La formulation raccourcie consistant à dire que "la" réaction est équilibrée masque la compétition de deux réactions et interfère avec l'expression utilisée pour le résultat de l'ajustement des coefficients stoechiométriques.

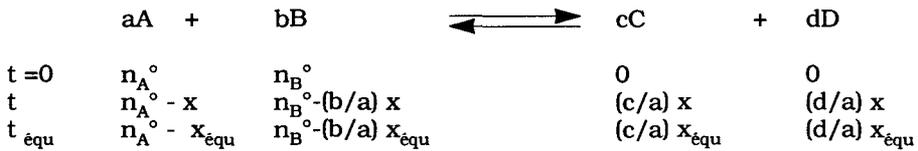
... et non
réaction
équilibrée

Par ailleurs, les deux flèches entre les réactifs d'une part et les produits d'autre part sont souvent dites symboliser un équilibre. Les conventions de l'IUPAC préconisent l'usage de deux flèches à demi-pointe pour symboliser l'équilibre atteint. Mais on gomme ainsi l'aspect "transformation" pour mettre l'accent sur l'état final de cette transformation. Pour assurer la continuité avec les apprentissages préalables sur

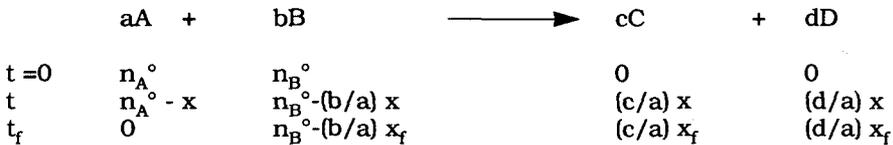
plutôt symboliser
ce qui se passe à
tout instant

les réactions totales, apprentissages qui ne sont pas encore totalement assurés, il semble préférable d'insister sur le fait qu'elles symbolisent les deux réactions compétitives, à tout instant. En effet les deux réactions se déroulent en même temps quel que soit l'instant considéré dès lors que les corps réagissants sont présents même en très faible quantité ; par contre l'équilibre n'est pas établi à tout instant mais seulement lorsque les vitesses des réactions compétitives sont devenues égales et que l'énergie libre est devenue minimum ; de même une réaction n'est totale qu'à une date déterminée.

On peut ainsi repérer à différentes dates, sur la même écriture des réactions chimiques, les quantités des différents corps présents dans le milieu réactionnel en appelant x le nombre de moles de A ayant réagi à l'instant considéré :



comme on pourrait aussi écrire par exemple pour une réaction totale où B est en excès :



3. DÉPLACEMENT D'ÉQUILIBRE ET ÉQUILIBRE DÉPLACÉ

Un équilibre donné établi dans certaines conditions expérimentales peut être "déplacé" par modification de ces conditions expérimentales (pression, température, ajout d'un réactif ou d'un produit, ajout d'un corps inerte). Les concentrations des différents corps, stationnaires dans les premières conditions évoluent jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre s'établisse pour d'autres valeurs des concentrations. L'équilibre a changé de place dans l'espace des concentrations des différents corps ; il a été déplacé.

Mais le terme "déplacé" est aussi parfois utilisé pour parler d'équilibres chimiques ayant des constantes d'équilibre très grandes ou très petites. L'introduction de ce qualificatif peut conforter une représentation erronée d'un équilibre "normal" mettant en jeu autant de réactifs que de produits. Il vaut

pas équilibre
déplacé mais
équilibre dont la
constante
d'équilibre est
très grande

sans doute mieux prendre le temps de dire "un équilibre dont la constante d'équilibre est très grande".

On est parfois tenté de symboliser ces équilibres "ayant de grandes constantes d'équilibre" par des flèches de longueurs différentes sans se poser beaucoup de questions sur la signification de ces flèches. Si on accorde à la flèche dans l'écriture d'une réaction chimique le statut de coder l'information "se transforme en" indépendamment des quantités mises en jeu sous réserve du respect de la stoechiométrie, la longueur des flèches n'est pas signifiante. Tracer des flèches de longueurs différentes c'est leur attribuer une autre signification liée à l'état final de la transformation et qu'il faudrait expliciter. Des flèches de longueurs inégales sont parfois utilisées également pour comparer les vitesses des réactions compétitives à différents instants ; c'est encore une autre information qui est ainsi codée avec le même symbolisme.

CONCLUSION

Les scientifiques utilisent dans leurs travaux des termes et des symboles possédant une définition précise et qui leur permettent de communiquer en limitant les ambiguïtés et en affinant leurs conceptions. Ils ne deviennent laxistes dans les formulations utilisées que dans des domaines qu'ils maîtrisent parfaitement, parce que leur pensée n'a plus besoin des mots précis comme support, parce qu'ils identifient sans peine les ruptures de contrat quant à l'utilisation des codes symboliques et lorsqu'ils n'ont plus besoin de contrôler la communication, parce qu'ils sont sûrs de penser de la même façon. Ils partagent alors les mêmes savoirs, la même culture scientifique et peuvent tolérer des écarts entre les formulations utilisées, les uns et les autres étant bien d'accord sur le contenu scientifique.

En situation scolaire, ces savoirs sont en cours de construction et cette construction passe forcément par le langage, code symbolique privilégié dont elle reste tributaire pendant longtemps, et par des codes d'écriture que les élèves doivent s'approprier. Les liens entre langage et conceptualisation sont cependant souvent distordus dans l'un ou l'autre sens : parfois, tout se passe comme si mot et concept étaient une seule entité, et on croit fournir un concept en fournissant un mot ; parfois au contraire, tout se passe comme si concept et langage étaient totalement indépendants, et on utilise une langue floue ou ambiguë en pensant que la conceptualisation correcte se fera quand même.

Garder une grande vigilance dans la terminologie utilisée, c'est une façon de donner aux élèves une image de la rigueur scientifique ; c'est aussi le moyen de contrôler leurs constructions conceptuelles par le contrôle de la langue qui

permet de communiquer car les dérives de langage sont souvent associées à des dérives de représentations.

Quant aux codes d'écriture, ils ne peuvent être un moyen de communication que si leur signification est construite. Un code qui n'a pas de signification stable perd sa fonction de communication tant que les limites du champ d'utilisation de l'une ou l'autre des significations ne sont pas perçues. Un minimum de cohérence dans la signification des codes qu'on leur propose aiderait sans doute les élèves à construire leurs connaissances.

Claudine LARCHER
INRP - LIREST

BIBLIOGRAPHIE

- CROSS D. et al. (1984). "Atome, acides bases, équilibre. Quelles idées se font les étudiants en arrivant à l'université ?". *Revue Française de Pédagogie*, n° 68, pp 49-60.
- FURIO C., ORTIZ E. (1983). "Persistencia de errores conceptuales en el equilibrio químico". *Enseñanza de las ciencias*, Vol. 1, pp 15-20.
- GORODETSKY M., GUSSARSKY E. (1986). "Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as realed by different evaluation methods". *European Journal of science education*, Vol. 8, pp 422-441.
- HACKLING V., GARNETT J. (1985) "Misconceptions of chemical equilibrium". *European Journal of science education*, Vol. 7, pp 205-214.
- JOHNSTONE A. et al. (1977) "Chemical equilibrium and its conceptual difficulties". *Education in chemistry*, Vol. 14, pp 169-171.

FAUT-IL CONSTRUIRE LE CONCEPT DE SUBSTANCE ?

Ezio Roletto
Bruno Piacenza

Le concept de substance pure occupe une position importante dans l'enseignement/apprentissage de la chimie et il fait en même temps, partie du langage de tous les jours. En étudiant, par entretien et questionnaire, les conceptions des élèves de lycées professionnels et techniques à propos de cette notion, nous en avons repéré cinq : non mélange, produit naturel, produit non pollué, corps simple, particules du même type. Le critère faisant appel au modèle particulaire est le moins évoqué spontanément et, de toute façon, les particules auxquelles les élèves font référence sont le plus souvent les atomes. Par conséquent, seuls les corps simples sont des substances pures, les corps composés étant fréquemment considérés comme des agrégats de corps simples et donc des mélanges. Les résultats de cette étude montrent que les enseignants doivent travailler avec les élèves à l'élaboration du concept de substance pure, aussi bien au niveau macroscopique qu'à celui du modèle particulaire.

Remarque préliminaire

En Italie, dans l'enseignement de la chimie, le mot "élément" est employé aussi bien pour désigner l'élément proprement dit que le corps simple. On parle ainsi de "composto" et d'"elemento" pour faire la distinction entre corps composé et corps simple. Les auteurs de cette recherche ont toujours utilisé le mot "élément" pour indiquer le "corps simple", aussi bien dans les entretiens que dans le questionnaire, afin d'être compris par les élèves auxquels ils s'adressaient.

Dans la rédaction de l'article, nous avons souvent utilisé le mot "corps simple" dans le souci de rendre plus compréhensible le texte aux lecteurs francophones.

deux définitions
de substance
pure :
macroscopique
et particulaire

La notion de substance pure occupe une place importante dans l'enseignement des sciences physiques : les activités de modélisation aussi bien des états de la matière et des transformations physiques que des réactions chimiques y font appel. Du point de vue scientifique, on peut donner deux définitions d'une substance pure : l'une au niveau macroscopique et l'autre faisant appel au modèle particulaire. Dans le premier cas, on dit qu'une substance pure reste homogène et garde son identité au cours des transformations d'état ; dans le second, on dit qu'elle est constituée de particules du même type

En même temps, aussi bien l'idée de "substance" que celle de "pureté" sont souvent évoquées dans le langage de tous

les jours : on parle ainsi, dans la langue italienne, de "sostanze alimentari" ("substances alimentaires"), de "sostanze inquinanti" ("substances polluantes"), etc. et la publicité fait appel à la "pureté" d'un produit pour gagner la faveur d'éventuels acheteurs.

interférence du
savoir commun
sur le savoir
scientifique

Nous sommes donc dans une situation où les mots du langage commun véhiculant un concept scientifique acquièrent une signification tout à fait spécifique dans le contexte des sciences physiques. Il est donc fort probable que les apprenants aient construit une conception personnelle de la notion de substance pure en dehors de toute connaissance scolaire et en liaison avec les référents empiriques (produits, faits, phénomènes) de la vie quotidienne. Il est donc important de déceler les conceptions communes des élèves à propos du concept de substance pure et de vérifier quelle en est l'influence sur l'apprentissage du concept scientifique.

Jusqu'à présent ce problème a été abordé par Vogezelang (1). Selon lui, le concept de substance pure devrait être enseigné avant celui de molécule. De Vos (2), au contraire, pense qu'il vaut mieux commencer le programme de chimie par le concept de molécule. Dans un travail très récent, Solomonidou (3) a mené une recherche afin d'étudier les premiers pas conceptuels de jeunes élèves vers la construction d'une représentation rationnelle des "substances".

Nous-mêmes avons envisagé cette étude pour :

objectifs
envisagés

- explorer en profondeur le concept de substance pure auprès des élèves italiens de lycées techniques et professionnels ;
- étudier l'interaction entre les connaissances issues de l'enseignement scolaire et celles qui se sont développées en dehors de l'école ;
- essayer de tirer de cette étude des renseignements sur les difficultés d'apprentissage et les moyens pour y remédier.

Les résultats issus de cette étude devraient aider les enseignants à mettre au point des activités d'enseignement et d'apprentissage permettant d'amener les élèves à élaborer, en partant des conceptions personnelles, une notion convenable de substance pure.

-
- (1) VOGEZELANG M.J., "Development of the Concept «Chemical Substance» : Some Thoughts and Arguments", *Int. J. Sci. Educ.*, 9, 519-528, 1987.
 - (2) DE VOS W., VERDONK A.H., "A New Road to Reactions", *J. Chem. Educ.*, 62, 238-240, 1985.
 - (3) SOLOMONIDOU C., *Comment se représenter les substances et leurs transformations ? Étude chez de jeunes élèves du collège.* Thèse soutenue à Paris VII, 1991.

1. MÉTHODOLOGIE

entretien et
questionnaire

La méthodologie de cette recherche est basée sur des entretiens individuels et sur un questionnaire élaboré à partir de ceux-ci. Pour étudier les conceptions des élèves sur la notion de substance pure, il nous a fallu en provoquer la mobilisation. Deux méthodes différentes ont été utilisées. Dans le cas des élèves qui venaient d'entrer en première année de lycée, la mobilisation a été provoquée directement par les questions posées. Si l'apprenant s'est approprié un concept donné, il devrait être capable d'en donner une définition et d'en citer des exemples. Dans le cas des élèves plus âgés, nous leur demandions de grouper un certain nombre de produits. Dans ce cas, l'apprenant devrait être à même de mobiliser le concept et de le faire émerger en procédant à une catégorisation.

1.1. Entretiens

L'échantillon de cette première phase de notre recherche comprend 42 élèves ainsi répartis :

- groupe A : 14 élèves (14-15 ans) de première année d'un lycée professionnel (4 à 5 mois d'études en chimie) ;
- groupe B : 12 élèves (15-16 ans) de deuxième année du même lycée (un an et demi d'études en chimie) ;
- groupe C : 16 élèves (16-17 ans) de troisième année d'un lycée technique (un an d'études en chimie).

question posée
aux élèves de
première année
de chimie

Aux élèves du groupe A on posait la question suivante : *“Les chimistes ont forgé un langage spécifique, dont les termes ont une signification scientifique ou technique. Par exemple, on trouve dans ce ‘jargon’ des termes tels que : élément, corps simple, corps composé, substance pure, etc. Quelle est, d’après toi, la signification du terme ‘substance pure’ pour un chimiste ?”* Ensuite, on demandait aux élèves de donner quelques exemples de substances pures en précisant toujours le(s) critère(s) de leur choix.

Un certain nombre de récipients en matière plastique transparente étaient montrés aux élèves des groupes B et C. Ils contenaient :

- a) des corps simples : fer (limaille), aluminium (poudre), zinc (pastilles), soufre (poudre) ;
- b) des corps composés : chlorure de potassium, sulfate d'aluminium et de potassium, trichlorométhane, carbonate de sodium, sulfate de fer ;
- c) des produits domestiques : huile d'olive vierge extra, lait pasteurisé, vinaigre, estragon sec.

tâche proposée
aux élèves de
deuxième année
de chimie

Chaque récipient était accompagné d'un petit carton sur lequel était noté le nom du produit ainsi que sa formule chimique. En outre, deux corps purs composés, le carbonate de sodium et le sulfate de fer étaient présentés dans leur flacon d'origine Carlo Erba, chacun portant son étiquette. Chaque

élève était invité à repérer les substances pures. Il devait, ensuite, justifier ses choix.

1.2. Questionnaire

repérage des
critères de
catégorisation

L'analyse des entretiens nous a permis de dégager un certain nombre de conceptions des élèves sur la notion de substance pure et d'inventorier les critères de catégorisation. À partir de ces données, nous avons mis au point un questionnaire (voir ci-contre) qui a été proposé à 200 élèves de cinq lycées techniques de la région du Piémont. Tous les élèves étaient en début de troisième année et avaient étudié la chimie pendant un an.

2. RÉSULTATS ET DISCUSSION

2.1. Entretiens

Il faut tout d'abord souligner qu'au cours d'un entretien un même élève fait souvent appel à différentes conceptions de substance pure. Dans ce qui suit, nous présentons celles qui sont les plus fréquentes.

• Mélange/non mélange

une substance
pure n'est pas un
mélange

À la question par laquelle on ouvre l'entretien, la plupart des élèves du groupe A répondent en opposant substance pure à mélange. Une substance pure "*est quelque chose qui n'est pas mélangé à d'autres substances...*", "*... est constituée par une seule substance et rien d'autre...*". Les élèves ont spontanément cité, comme exemples de substance pure, les produits chimiques utilisés au cours des premières séances de travaux pratiques pour la préparation de solutions "mères", d'usage courant dans les dosages volumétriques.

un critère visuel

Il faut aussi remarquer que certains élèves font appel à un critère purement visuel pour distinguer entre mélange et substance pure. Par conséquent, seuls les mélanges hétérogènes sont opposés aux substances pures. Ainsi, un élève a affirmé : "*Si l'on voit qu'un autre composant est là, on peut affirmer qu'il ne s'agit pas d'une substance pure : par exemple, eau et sucre avec du sucre sur le fond du récipient. Mais si le sucre est complètement dissous dans l'eau, celle-ci est transparente et donc il s'agit d'une substance pure*".

• Corps simple/corps composé

une substance
pure est un corps
simple

Plus de la moitié des élèves du groupe A donnent les corps simples comme exemples de substances pures, la raison étant que dans un corps simple "*... il n'y a qu'un seul élément, et donc on ne peut pas aller plus loin dans sa décomposition*". Aucun élève de ce groupe ne considère les corps composés en tant que substances pures : "*un corps pur est constitué par un seul élément ; dans les corps composés on*

Questionnaire soumis aux élèves

1) Indiquez, dans la liste ci-dessous, les substances pures

Lait	oui	non	ne sais pas
Huile d'olive vierge extra	oui	non	ne sais pas
Air	oui	non	ne sais pas
Oxygène (O ₂)	oui	non	ne sais pas

Pour chaque corps, argumentez votre choix.

2) Indiquez, dans la liste ci-dessous, les substances pures

Fer (Fe)	oui	non	ne sais pas
Carbonate de sodium (Na ₂ CO ₃)	oui	non	ne sais pas
Sulfate de calcium (CaSO ₄)	oui	non	ne sais pas
Eau (H ₂ O)	oui	non	ne sais pas

Pour chaque corps, argumentez votre choix.

3) D'après vous, une substance pure est :

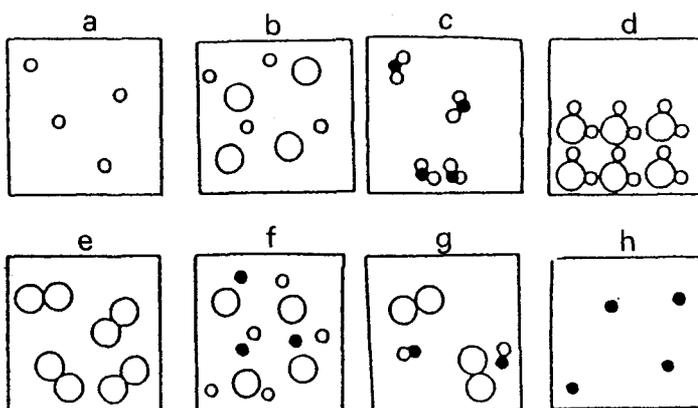
- A) un corps non pollué
- B) un corps d'origine naturelle
- C) un élément chimique
- D) un composé chimique
- E) un produit industriel
- F) un corps constitué par des particules du même type
- G) un produit naturel non soumis à des procédés industriels
- H) un corps qui reste homogène et garde son identité au cours des changements d'état

Argumentez vos choix.

Parmi les définitions de substance pure données ci-dessus, quelle est, d'après vous, la plus générale ?

A B C D E F G H

4) Dans quel(s) dessin(s) a-t-on représenté une substance pure ?



Argumentez vos choix.

trouve plusieurs éléments et donc il ne s'agit pas de substances pures".

les corps
composés :
plusieurs
difficultés

Presque la moitié des élèves des groupes B et C considèrent d'abord comme substances pures aussi bien les corps simples que les corps composés. Au moment de justifier leur choix, quelques-uns font appel au critère du "non mélange" ; les autres affirment que les corps simples sont des substances pures parce que "... constitués par un seul élément", "... il n'y a pas d'agrégats d'éléments". Mais ce critère ne peut pas être utilisé vis-à-vis des corps composés. Face à cette difficulté, les élèves ont trois types de réactions : ils reviennent sur leur classification en affirmant que les corps composés ne sont pas des substances pures, puisqu'il s'agit de mélanges d'éléments ; ils font appel aux connaissances scolaires concernant les corps composés utilisés au cours des entretiens "... j'ai appris qu'il s'agit d'une substance pure" ; ils laissent tomber le problème posé par la présence de plusieurs éléments en revenant au critère du «non mélange» "... il s'agit de substances pures parce qu'elles sont à cent pour cent composées par la même substance".

le corps
composé :
un agrégat
d'éléments

Beaucoup d'élèves ont des difficultés face aux corps composés qui ne sont pas perçus comme des substances pures mais comme des mélanges, somme ou agrégation de corps simples. Cette conception, comme le montrent d'autres recherches menées aussi bien par d'autres chercheurs (4) que par nous (5), pourrait être la conséquence d'une mauvaise maîtrise du modèle particulaire de la matière et de la notion de réaction chimique, considérée comme l'addition des réactifs pour donner un seul produit.

• Naturel/artificiel

une substance
pure est un
produit naturel...

Plusieurs élèves pensent que les produits naturels, tels que le miel, le lait, le bois, les minerais, etc. sont des substances pures : "... une substance pure, on la trouve telle quelle dans la nature".

ou qui n'a pas
été traité
chimiquement...

Pour d'autres élèves, il faut classer parmi les substances pures tous les corps qui n'ont pas été soumis à des traitements chimiques : "le lait qu'on achète n'est pas une substance pure parce qu'on a ajouté des agents conservateurs, mais le lait qui sort de la vache est une substance pure" ; "... la farine est une substance pure parce qu'on l'obtient en moulant le blé, sans aucun traitement chimique". D'après cette conception, les produits naturels qui sont en grande majorité des mélanges, seraient des substances pures ; par contre, presque tous les corps purs simples et composés, issus de procédés de l'industrie chimique, ne seraient pas

- (4) BEN-ZVI R., EYLON B.S., SILBERSTEIN J., "Students' Visualisation of a Chemical Reaction", *Educ. Chem.*, 64, 117-120, 1987.
- (5) FRANCESCHETTI G., ROLETTO E., Come gli studenti concepiscono le reazioni chimiche, *Didattica delle Scienze*, XXVII (160), 31-34, 1992.

des substances pures. Parfois le critère "origine naturelle" prévaut sur tous les autres, comme chez l'élève qui affirme : "... même si le fluor est un élément, on ne le trouve pas tel quel dans la nature, et donc il ne s'agit pas d'une substance pure".

- **Absence de pollution**

ou qui n'est pas pollué

Pour un certain nombre d'élèves, les substances pures sont des corps non pollués : "... l'eau de mer, tant qu'elle n'est pas polluée, est une substance pure".

- **Structure particulière**

très peu d'élèves font appel au modèle particulière

Quatre élèves seulement sur quarante-deux font appel au modèle particulière de la matière en disant que les substances pures sont constituées par des molécules du même type ou bien par des molécules où les rapports entre les éléments ne changent jamais. Mais il y a aussi un usage "opérateur" des symboles chimiques comme c'est le cas chez l'élève pour qui : "... là où l'on trouve une formule il y a sûrement une substance pure".

- **Changements d'état**

Un seul élève fait appel à l'invariance du corps pendant les changements d'état physique pour donner une définition de substance pure : "... l'eau qui s'évapore c'est toujours la même eau, aussi bien à l'état liquide qu'à l'état de vapeur."

2.2. Questionnaire

- **Première question**

classer des corps de la vie commune

Par cette question, les élèves devaient indiquer quelles étaient, à leur avis, les substances pures parmi le lait, le bois, l'huile d'olive vierge-extra, l'air et le dioxygène (O₂) et justifier leurs réponses. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 1.

Tableau 1

	pure %	non pure %	je ne sais pas %
lait	12	72	16
huile	21	51	28
bois	50	30	20
air	5	85	10
dioxygène (O ₂)	95	2	3

Les élèves n'ont pas trop de mal à classer le dioxygène parmi les substances pures et l'air comme un mélange. Le choix s'avère plus difficile pour le lait et surtout l'huile et le bois : ce dernier est classé parmi les substances pures par la moitié des élèves. Les argumentations apportées par ceux qui pensent que le dioxygène est une substance pure sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 2. Arguments pour le dioxygène considéré comme substance pure

	%
Particules (atomes, molécules) du même type	19
Non mélange	32
Absence d'impuretés	11
Homogénéité	11
Élément	21
Pas de réponse	6

Les avis sont partagés : le critère "mélange/non mélange" est prioritaire, suivi par "élément". Le pourcentage d'élèves qui font appel au modèle particulaire est peu important.

Pour le lait, l'huile et l'air, l'argument majoritaire pour ne pas les classer parmi les substances pures est celui de "mélange", cité par 44 % des élèves. 19 % des élèves classent le bois parmi les substances pures parce qu'il est d'origine naturelle et 17 % parce qu'il s'agit d'une seule substance.

D'après ces résultats on pourrait penser que les élèves ont une certaine connaissance de la composition du lait, de l'huile et de l'air, ce qui leur permet de les classer parmi les corps qui ne sont pas purs. Cette connaissance faisant défaut dans le cas du bois, les deux arguments "produit naturel" et "une seule substance" sont invoqués pour justifier son classement parmi les substances pures.

• *Deuxième question*

classer des
produits
chimiques

Si dans la première question les référents empiriques de la vie commune sont majoritaires, dans la deuxième on ne trouve que des produits chimiques : le fer (Fe), le carbonate de sodium (Na_2CO_3), le sulfate de sodium (Na_2SO_4) et l'eau (H_2O), dont les statuts particuliers sont bien signalés par leur formule chimique.

Le fer est défini comme une substance pure par la plupart des élèves (90 %), mais presque la moitié (46 %) d'entre eux ne classent pas l'eau parmi les substances pures et le pourcentage passe à environ 70 % pour le carbonate et le sulfate de sodium. Parmi les élèves qui pensent que le fer est une substance pure, 58 % justifient leur choix en disant qu'il

difficultés de classement vis-à-vis des corps composés

s'agit d'un élément ; le pourcentage de ceux qui font appel au modèle particulière est de 18 %. 64 % des élèves qui pensent que les deux sels de sodium ne sont pas des substances pures, justifient leur choix en disant qu'il s'agit de mélanges d'éléments. Ce même argument est évoqué par 57 % des élèves qui ne jugent pas l'eau comme une substance pure ; parmi ceux qui sont de l'avis contraire, 41 % font appel au critère du "non mélange" pour la classer parmi les substances pures.

• **Troisième question**

Avec la troisième question, les élèves devaient choisir, parmi plusieurs définitions de substance pure, celles qui, d'après eux, étaient acceptables et indiquer la plus générale. Les résultats sont portés dans le tableau 3.

Tableau 3. Choix des élèves parmi plusieurs définitions de substance pure (ac. = acceptable ; lpg : la plus générale)

Définition	ac. %	lpg %
A - Non polluée	36	10
B - Origine naturelle	28	6
C - Élément chimique	60	22
D - Composé chimique	14	2
E - Produit industriel	2	0
F - Particules du même type	71	40
G - Produit naturel sans traitements chimiques	27	10
H - Garde ses propriétés au cours des changements d'état	25	6

dans le choix d'une définition, c'est encore l'élément qui l'emporte

Presque deux tiers des élèves sont de l'avis qu'une substance pure est constituée par des particules du même type, mais cette réponse s'avère fortement biaisée si l'on considère que l'argument C est choisi par 60 % des répondants, tandis que le pourcentage tombe à 14 % pour le critère D. Les tris croisés des réponses montrent que 48 % des élèves choisissent en même temps les arguments C et F, tandis que seulement 8 % portent leur choix sur C, D et F.

Il est aussi à remarquer la différence entre les arguments B (28 %) et G (27 %) d'un côté et E (2 %) de l'autre côté et le fait qu'à peu près un tiers des élèves donnent leur préférence à l'un des trois critères A, B et G. D'après les tris croisés des réponses, 17 % des élèves choisissent en même temps les arguments B et G, 10 % les critères A et G et 9 % l'association A et B. Tous ces résultats montrent qu'un pourcentage important d'élèves ont une conception que l'on pourrait définir "écologique" et naturaliste de substance pure, c'est-à-dire celle qui est véhiculée par les médias et par le sens commun.

une conception naturaliste de corps pur

L'analyse des choix des élèves pour la définition la plus générale nous amène aux mêmes conclusions. Une proportion d'élèves inférieure à 50 % choisit les définitions F, qui fait appel à la structure particulière, et H, définition de substance pure au niveau macroscopique. 22 % des élèves sont de l'avis que les seuls corps simples sont des substances pures, tandis que 26 % au total portent leur choix sur les définitions A, B ou G.

• Quatrième question

choisir parmi
plusieurs
représentations
iconiques celles
de corps purs

Avec la quatrième question, il était fait appel directement au modèle particulaire en demandant aux élèves de choisir, parmi plusieurs représentations graphiques, celles qui pouvaient être attribuées à des substances pures. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 4. Les élèves n'ont pas trop de problèmes à classer, parmi les représentations de substances pures, celles où l'on emploie un seul symbole de particule : A, E et H.

D'autre part, les représentations B, F et G ne sont pas attribuées aux substances pures par la grande majorité des élèves. Mais dans cette catégorie sont placées aussi les représentations C et D par presque deux tiers des élèves. Il est évident que le critère de classement qui s'impose, est celui qui fait appel à un seul type de particule et renvoie donc à l'idée de corps simple.

Tableau 4. Choix de représentations de substances pures

Représentation	A	B	C	D	E	F	G	H
%	87	10	26	28	77	8	3	76

CONCLUSIONS

des conceptions
variées
de corps pur

Les entretiens ont permis de déceler auprès des élèves cinq critères de classement des substances pures, dont trois faisant appel au sens commun : mélange/non mélange, naturel/artificiel, absence de pollution et deux ayant un statut scientifique : un seul élément (dans le sens de corps simple), particules du même type. Parmi ces deux derniers, seul le critère du corps simple était évoqué fréquemment. Ces données confirment, d'autre part, l'analyse faite par Vogezelang (6) à propos de la conception initiale de substance pure considérée comme "une seule substance". D'autre part, elles montrent que les conceptions initiales des élèves sont très diverses.

Les questionnaires ont confirmé que les élèves, même après un an d'études de chimie, le plus souvent font spontanément

(6) *Ibidem* note (1).

ment appel aux critères du sens commun quels que soient les référents empiriques qu'on leur demande de classer : produits domestiques ou espèces chimiques utilisées dans les laboratoires. Le critère le moins évoqué spontanément est celui faisant appel à la structure particulière de la matière (unités élémentaires du même type). Par contre, quand ce critère est induit par les questions, les élèves le choisissent en grande majorité, mais ils montrent clairement que les unités élémentaires évoquées sont des atomes : c'est donc encore le critère de l'élément qui dirige ce choix.

substance et
matière sont
synonymes

Il faut remarquer que dans les premiers entretiens nous avons essayé d'employer uniquement le mot "substance", sans y joindre aucun attribut. Mais les réponses des élèves nous ont permis de comprendre que, pour eux, "substance" et "matière" sont des synonymes : tout est substance. Nous avons donc été obligés d'adopter le terme de "substance pure", mais il est évident que même celui-ci n'a pas un sens, une signification bien définis dans un contexte scientifique. En effet, la grande majorité des élèves utilise deux registres pour la notion de substance pure : celui du sens commun et celui de la science, limité à la seule classe des corps simples. Ces deux registres ne sont pas indépendants et en passant de l'un à l'autre les élèves donnent des explications acceptables avec des argumentations fausses ou bien ils arrivent à des conclusions erronées tout en partant de prémisses correctes.

Le choix du corps simple comme seule et unique substance pure est justifié par l'argument que la subdivision des substances ne peut pas aller au-delà de l'élément. On peut se demander si ce critère ne trouve pas son origine dans l'introduction "brutale" du concept d'élément, à partir de la structure de l'atome et donc du nombre de protons dans le noyau, telle qu'elle se produit dans l'enseignement traditionnel de la chimie en Italie. Si l'apprenant ne s'est pas encore approprié la notion de substance, il est tout à fait compréhensible qu'il arrive à identifier les substances pures avec les corps simples, les seuls constitués par un unique élément qui garde son identité dans les réactions et qui ne peuvent être décomposés en éléments différents. Cette représentation de la substance pure pourrait être à l'origine de deux autres conceptions qui ont été mises en évidence, aussi bien par cette recherche que par d'autres : celle de corps composé comme mélange de corps simples et celle de réaction en tant qu'addition, agglomération de deux corps différents (7).

Dans leur globalité, les résultats de cette recherche font apparaître que les lycéens et les enseignants italiens de chi-

(7) *Ibidem* notes (4) (5).
STAVRIDOU H., *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*. Thèse soutenue à Paris VII, 1990.

mie ne donnent pas suffisamment d'importance au langage utilisé pour expliquer les concepts de la chimie. Du moment que les mots sont utilisés couramment, tout le monde admet qu'ils sont compris, ce qui n'est pas du tout le cas. Ainsi, aussi bien le substantif "substance" que l'attribut "pure" ne sont perçus, par une grande partie des élèves, que dans la signification qu'ils acquièrent dans la langue de tous les jours.

une notion
"commune"
n'est pas une
notion banale

La difficulté à s'approprier le concept de substance relève aussi de l'interférence de l'acception courante du mot qui, de toute évidence, pousse les enseignants à penser qu'il s'agit d'une notion banale. Mais rien n'est plus difficile et compliqué que de bien séparer le langage et les concepts de la vie quotidienne du langage et des concepts de la science. Pour réaliser cette séparation il faut mettre en place des stratégies éducatives adéquates, capables de faire évoluer les conceptions spontanées. Ces stratégies font appel à des situations-problèmes, qui mettent les apprenants en situation d'exprimer leurs conceptions. Celles-ci peuvent alors être utilisées comme des hypothèses de travail pour faire des prédictions. C'est en mettant en cause leurs conceptions personnelles que les élèves sont amenés à un travail d'approfondissement, pendant lequel certaines conceptions sont remplacées par d'autres élaborées par les mêmes apprenants. L'enseignement actuel de la chimie en Italie fait prévaloir la représentation des substances au niveau atomique : par conséquent, il ne permet pas aux élèves de mettre à l'épreuve leurs conceptions personnelles concernant les substances et donc d'élaborer un concept de substance à partir de leurs propres connaissances.

Ezio ROLETTO
Bruno PIACENZA
Groupe de Didactique de la Chimie
Université de Turin et IRRSAE Piemonte
Italie

LES TRANSFORMATIONS DES SUBSTANCES, ENJEU DE L'ENSEIGNEMENT DE LA RÉACTION CHIMIQUE

Christine Solomonidou
Hélène Stavridou

Dans quelle mesure l'enseignement de la chimie réussit-il dans sa tâche de réorganisation et d'enrichissement du domaine conceptuel des élèves ? Les données de notre première recherche décrivent un processus de construction du concept de réaction chimique chez des élèves français du début et jusqu'à la fin de l'enseignement secondaire et elles mettent à jour que la construction et le fonctionnement du concept de réaction chimique dépendent de la construction du concept scientifique de substance. L'étude des conditions qui favorisent une première construction du concept de substance au niveau manipulateur, ainsi que l'extension catégorielle de la pensée des élèves que cette construction implique, est le sujet de notre deuxième recherche. Nous décrivons les représentations initiales de jeunes élèves du collège à propos d'un certain nombre de substances et de leurs interactions, ainsi que l'évolution de ces représentations au cours d'une séance d'initiation en chimie, dont les éléments constitutifs sont un référent empirique spécialement conçu et des tâches intellectuelles des élèves liées à ce référent empirique.

Dans plusieurs manuels de chimie on trouve des définitions du concept de réaction chimique comme les suivantes :

"Les réactions chimiques sont des processus par lesquels une ou plusieurs substances se transforment en une ou plusieurs autres substances."

"La réaction chimique est la transformation d'une ou de plusieurs molécules (réactants) en d'autres molécules."

"Réarrangement des atomes, des ions ou des radicaux d'une ou de plusieurs substances, qui aboutit à la formation de nouvelles substances qui souvent ont des propriétés complètement différentes."

Ces définitions montrent que la signification actuelle du concept de réaction chimique est exprimée à l'aide d'autres concepts scientifiques, tels que ceux de substance ou substance nouvelle, propriété, molécule, atome, ion, réarrangement, etc. et c'est à l'aide de ces concepts qu'il acquiert son sens. Mais quel est le sens de ces autres concepts ? La réponse n'est pas simple, car chacun de ces termes constitue une réponse à de questions que les chimistes du passé se sont posées et, en plus, chacun de ces concepts est le fruit d'évolutions théoriques ou de conquêtes méthodologiques au niveau du champ empirique et de la pratique du laboratoire chimique. La compréhension donc de tout ce que représente le concept de réaction chimique ne peut pas être

le concept de
réaction
chimique :
définitions et
signification

assurée par - ou limitée à - une simple définition, mais elle repose sur la constitution d'un champ de référence empirique et suppose le développement d'un questionnement sur un ensemble de phénomènes bien choisis qui vont favoriser la construction progressive d'un réseau conceptuel approprié.

réfèrent
empirique et
questionnements

Mais si l'étude historique et épistémologique des concepts chimiques, peut éclairer certains aspects de l'évolution des champs de référence empiriques et des questionnements des chimistes du passé, rien n'est donné pour l'enseignement de la chimie. Martinand a souligné à plusieurs reprises (1986, 1992) qu'il faut inventer des sciences physiques, surtout pour le niveau des écoles et des collèges. Dans ce sens, il a soutenu la thèse que le contenu est moins à "choisir" en "simplifiant" la physique et la chimie de l'université ou du lycée, ou en se reportant à l'histoire de la discipline, qu'à construire. Les éléments constitutifs d'une telle "invention" sont le choix d'un champ de référence empirique et le développement d'un questionnement approprié lié à ce champ empirique, pour favoriser et soutenir les constructions conceptuelles des élèves. Evidemment une telle "invention" des sciences physiques ne peut s'appuyer que sur des données de recherches concernant les représentations et les idées initiales des élèves, ainsi que l'évolution de ces idées dans des milieux et des contextes différents, dont il faut évaluer l'apport didactique. Notre travail est une contribution dans cette direction.

1. LE CONCEPT DE RÉACTION CHIMIQUE

1.1. Représentations communes concernant les transformations de la matière

formation
scientifique...

La formation du concept de réaction chimique dépend d'un champ empirique d'origine scientifique qui comprend des substances pures, des méthodes d'isolement et d'identification des substances, des règles de manipulation des substances, des règles de sécurité, etc. Par conséquent, sa formation spontanée dans le cadre de la vie quotidienne est presque impossible, faute d'absence tant d'outils et de techniques scientifiques, que de questionnements appropriés.

et
représentations
communes

Cependant, l'absence de formation spontanée du concept de réaction chimique dans la vie courante n'est pas ressentie, car un certain nombre de représentations communes concernant les transformations de la matière y sont véhiculées à l'aide d'un certain nombre de moyens de médiation puissants, tels que la langue quotidienne et les pratiques communes d'utilisation de produits courants. Nous allons brièvement nous rapporter à ce type de représentations communes qui influencent la construction-appropriation du concept de réaction chimique de la part des élèves.

Dans le cadre de la vie quotidienne, les individus font des catégorisations spontanées des transformations de la matière, qu'habituellement ils classent dans deux grandes catégories : les phénomènes naturels et les phénomènes artificiels. Les phénomènes chimiques sont considérés comme des phénomènes exclusivement artificiels qui ne peuvent avoir lieu qu'entre les murs d'un laboratoire et/ou à la suite d'une intervention humaine. Tout ce qui est chimique est exclu de la nature et ainsi plusieurs transformations chimiques de la matière qui se passent dans la nature ne sont pas considérées comme telles (par exemple les feuilles des arbres qui jaunissent, une pomme qui mûrit, etc.). Même le bois qui brûle est considéré comme un phénomène physique par une grande partie d'élèves ou d'adultes (Solomonidou & Stavridou 1987, Stavridou, Solomonidou & Papademetriou 1993).

catégorisations
spontanées :
physique =
naturel,
chimique =
artificiel

Suivant d'autres conceptions courantes qui reflètent l'aspect utilitaire des choses, plusieurs phénomènes chimiques sont appréhendés comme des phénomènes de destruction, de disparition ou de détérioration de la matière. De tels phénomènes sont par exemple : le jus de citron qui ronge le marbre, un clou qui rouille, de l'eau de javel qui décolore des vêtements, un gratin qui brûle dans le four, l'eau de Cologne qui s'évapore, etc. Ces conceptions sont rencontrées chez de jeunes élèves de 11-12 ans avant l'enseignement de la chimie, et elles persistent en dépit de l'enseignement. On les rencontre également chez des élèves de 18 ans à la fin de leurs études secondaires, bien que pour eux/elles la loi de la conservation de la matière soit une connaissance supposée acquise (Stavridou & Solomonidou 1989, Stavridou 1990, 1992).

destruction-
disparition
de la matière

Une autre conception prégnante qu'on rencontre chez des élèves de tous les niveaux traduit des transformations chimiques en termes d'agent, d'action et de patient. Un des deux corps qui participent à la transformation est considéré comme "agent" qui provoque le changement du corps "patient". Les élèves qui ont cette conception pensent également que le corps agent reste inchangé et que c'est seulement le corps patient qui change. Ces idées sont complètement incompatibles avec les conceptions chimiques actuelles qui, entre autres, attribuent des rôles équivalents aux substances qui participent aux phénomènes chimiques.

corps agent -
corps patient

Cette situation n'est pas étonnante, si on pense que la langue quotidienne véhicule des conceptions du type "agent-action-patient" (Van Geert 1983, Le Ny 1989) qui sont en accord avec des phénoménologies immédiates. La langue traduit les phénomènes à la mesure du sens commun et exprime ce que Vygotsky (1934/1988) appelle le "savoir spontané" que chaque individu acquiert par son interaction avec son environnement. Le fait que l'on retrouve, même dans le langage du chimiste contemporain, des expressions qui privilégient le rôle d'une des deux substances dans un

le rôle de la
langue
quotidienne

processus chimique décrit n'est pas un hasard. Par exemple, on dit fréquemment que l'humidité (ou l'oxygène, ou un acide) agit sur le métal, que l'acide dissout le métal, que le métal est dissout par l'acide, etc.

changement
sans interaction

Deux autres idées sont véhiculées par la langue quotidienne : l'idée qu'un corps peut changer tout seul, sans interaction quelconque (par exemple le fer ou un clou rouillé) et l'idée qu'un corps peut changer ses propriétés (comme par exemple la couleur) tout en gardant son identité. De tels exemples sont souvent rencontrés dans la vie quotidienne (par exemple les feuilles des arbres jaunissent, une tomate ou une pomme qui mûrit devient rouge), mais aussi dans le langage de manuels scolaires de chimie (par exemple le cuivre devient vert, etc.). Dans ces expressions le verbe marque une action de changement de propriété (la couleur) mais, comme le sujet est le même (les feuilles, les tomates, le cuivre, etc.), la structure de la phrase suggère la conservation du sujet, c'est-à-dire de la substance initiale. Ainsi le changement d'une propriété, comme la couleur, n'est pas interprété comme un indice de changement de l'identité des substances initiales. Enfin certaines autres expressions de la vie courante, telles que "oeuf cru - oeuf cuit" ou "viande ou légumes crus - viande ou légumes cuits", suggèrent également qu'il y a conservation des substances initiales lors de la cuisson (Solomonidou & Stavridou 1991).

1.2. Construction du concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire

étude du
processus de
construction du
concept de
réaction
chimique par des
élèves

Puisque les élèves arrivent à l'école avec leurs idées et leurs représentations personnelles, la question qui surgit est : dans quelle mesure l'enseignement de la chimie réussit à élargir, à modifier et à réorganiser le domaine conceptuel de ces élèves dans le but d'assurer des constructions conceptuelles adéquates du point de vue scientifique ? Plusieurs chercheurs ont apporté des réponses en se situant chaque fois à un certain niveau d'enseignement. Par exemple, Méheut dans ces recherches (Méheut 1982, Méheut et al. 1985) a mis à jour des difficultés des élèves au début du collège par rapport à l'enseignement de la combustion et elle a indiqué les points faibles concernant les choix du programme. Notre perspective est différente, dans le sens suivant : prenant comme point de départ l'idée qu'on n'a jamais une image globale des évolutions conceptuelles des élèves du début jusqu'à la fin de l'enseignement secondaire, nous avons entrepris une recherche qui a été réalisée en France (Stavridou 1990), dont le but est d'étudier le processus de construction du concept de réaction chimique dans le contexte de l'enseignement secondaire et de suivre de près les évolutions conceptuelles des élèves, ainsi que la réorganisation de leurs connaissances provenant tant de la vie quotidienne que de l'enseignement de la chimie.

méthode :
catégorisation
libre de
phénomènes

Quarante élèves de quatre tranches d'âge de 12, 14, 16 et 18 ans ont participé à cette recherche. Afin de mobiliser les conceptions et les représentations des élèves, nous avons utilisé deux méthodes différentes et complémentaires : la première méthode s'appuie sur une tâche de catégorisation libre de deux ensembles de phénomènes physiques et chimiques, dont le premier comprend dix-neuf phénomènes de la vie quotidienne (voir Tableau 1) et le deuxième neuf phénomènes du laboratoire chimique (voir Tableau 2).

TABLEAU 1

	Descriptions des 19 phénomènes de la vie quotidienne
1	Une pierre qui tombe
2	Un verre qui casse
3	De l'eau qui bout
4	De la cire qui fond
5	De l'eau qui gèle
6	De l'eau de Cologne qui s'évapore
7	Du sel qui se mélange à la soupe
8	Du sucre qui se mélange au thé
9	De la bière qui mousse
10	Un clou qui rouille
11	Un gratin qui brûle dans le four
12	Du bois qui brûle
13	Une pomme qui mûrit
14	Des feuilles qui pourrissent
15	Du jus de raisin qui devient du vin
16	Du lait qui tourne
17	De l'eau de Javel qui décolore les vêtements
18	Du jus de citron qui ronge le marbre
19	Un œuf qui cuit

TABLEAU 2

	Description des 9 phénomènes du laboratoire de chimie
20	En chauffant une poudre orange, elle devient progressivement rouge et après noire. En refroidissant, la poudre devient rouge et après orange.
21	Une poudre orange se dissout dans l'eau. L'eau se colore en orange.
22	Une poudre blanche se mélange avec une autre poudre blanche. La couleur reste blanche.
23	En chauffant une poudre bleue, elle devient blanche et des vapeurs se dégagent. En refroidissant, elle reste blanche.
24	Une poudre bleue se dissout dans l'eau. L'eau se colore en rouge.
25	Deux gaz se rencontrent et un solide blanc se produit.
26	Une poudre blanche se mélange avec une autre poudre blanche. Une couleur jaune apparaît.
27	En décomposant de l'eau, deux gaz, le dihydrogène et le dioxygène, sont obtenus.
28	A partir du gaz dihydrogène et du gaz dioxygène, de l'eau se produit.

définitions du concept, critères de reconnaissance et entretiens

La deuxième méthode est une adaptation de l'IAI technique (Interview About Instances) (Osborne & Gilbert, 1980). Les données de cette recherche sont issues d'entretiens individuels avec les élèves. Suivant la première méthode on a demandé à chaque élève de faire des groupes de phénomènes, en mettant dans le même groupe les phénomènes qui avaient, selon lui/elle, un ou plusieurs points communs, et d'expliquer son choix en précisant ses critères de groupement et comment il/elle les applique. Suivant la deuxième méthode chaque élève a donné une définition du concept de réaction chimique et il/elle était invité/ée à reconnaître/identifier quels phénomènes, parmi ceux qu'on lui proposait, étaient des réactions chimiques.

L'analyse des données ainsi recueillies a mis à jour que dans le cadre de l'enseignement ordinaire de la chimie il y a des évolutions conceptuelles très nettes puisque, plus les élèves avancent dans l'enseignement, plus ils/elles mobilisent de concepts d'origine chimique pour l'appréhension des transformations physiques et chimiques de la matière. Pourtant, le sens qu'ils/elles attribuent aux concepts scientifiques, ainsi que leur fonctionnement, ne sont pas toujours adéquats du point de vue scientifique (pour une description détaillée voir Stavridou 1990). En ce qui concerne le concept

de réaction chimique, nous avons distingué trois étapes différentes de construction. D'une étape à l'autre il y a des changements, aussi bien dans la signification que dans le fonctionnement du concept. Nous allons maintenant présenter une courte description des caractéristiques de chaque étape.

• **Étape 1 : de la phénoménologie immédiate à l'idée de changement**

Les élèves commencent leur apprentissage de chimie d'une façon personnelle. Dans un premier temps ils/elles n'appréhendent pas les phénomènes chimiques comme des changements-transformations de la matière, mais comme des "événements" suivis de manifestations phénoménologiques précises, telles le changement de couleur, le dégagement gazeux, l'explosion, etc. Ces manifestations phénoménologiques commencent à traduire progressivement des changements des corps qui participent aux phénomènes. Les élèves commencent donc à élaborer un premier schème conceptuel pour l'appréhension du changement. Ce schème n'est pas suffisamment développé puisqu'il focalise sur les corps du départ et décrit le résultat de la transformation de façon vague et incomplète.

événements ou changements ?

Plusieurs extraits d'entretiens illustrent ce fait :

"Réaction chimique, c'est un fait qui se passe quand il y a ... c'est quelque chose qui se passe quand ... quand par exemple on met deux matières ... deux matières ensemble, il peut y avoir une ... soit une explosion ... ou il peut se tirer des gaz ... il peut changer de couleur." (14 ans)

"Quand il y a une transformation, ça change le corps, il n'est plus comme avant, il est consommé, ou il perd de ses propriétés. Alors une réaction c'est une rencontre entre deux corps qui fait qu'il y a un changement ... cette réaction provoque, au lieu de rester inactif, et de ... de fusionner ensemble ... pour fusionner ensemble ils doivent provoquer quelque chose ... soit un dégagement de gaz soit un changement de couleur." (16 ans)

Evidemment le concept de réaction chimique n'est pas opératoire et les élèves qui se trouvent à cette étape ne sont pas encore capables de distinguer entre transformations physiques et transformations chimiques de la matière.

• **Étape 2 : deux corps donnent autre chose**

Les élèves se situant à cette étape ont développé un schème conceptuel pour le concept de réaction chimique qui est le suivant : deux corps/produits sont mélangés ou mis en contact et donnent autre chose ou un produit nouveau.

"Pour moi une réaction chimique c'est ... c'est le résultat de la combinaison de deux produits chimiques ... alors deux produits chimiques, on les mélange et puis ça donne un produit, ça donne un autre produit." (16 ans)

réaction chimique : deux corps au départ...

Ces élèves, appuyés sur cette idée qu'ils ont de la réaction chimique, sont capables de distinguer entre transformations physiques et chimiques de la matière, mais le résultat de cette distinction n'est pas toujours satisfaisant, parce qu'ils mobilisent et utilisent des critères personnels de distinction comme les suivants.

a) Existence de deux corps au départ

Les élèves qui s'appuient sur cette idée :

- soit excluent de la classe des réactions chimiques tout phénomène où ils ne détectent qu'un seul corps au départ (par exemple l'oeuf qui cuit, une pomme qui mûrit, du jus du raisin qui devient du vin, du lait qui tourne, des feuilles qui pourrissent), et ainsi nombre de phénomènes chimiques ne sont pas identifiés comme tels, tandis que des dissolutions (du sel ou du sucre dans l'eau) sont identifiées comme des réactions chimiques ;
- soit inventent un deuxième corps là où il n'existe pas (par exemple la flamme, la chaleur, l'électricité), et ainsi plusieurs phénomènes physiques sont considérés comme des réactions chimiques (par exemple de l'eau de Cologne qui s'évapore, de l'eau qui bout, de la cire qui fond).

b) Formation d'un produit nouveau

Les élèves qui se focalisent sur le résultat d'une réaction chimique appréhendent la formation de quelque chose d'autre ou d'un produit nouveau dans un sens courant. Le produit d'une réaction chimique n'a pas le statut de concept scientifique et il n'est pas rare que des élèves (surtout les plus jeunes, mais aussi les moins jeunes) pensent que la vapeur d'eau ou d'eau de Cologne, le thé sucré, la soupe salée, même la flamme sont des produits nouveaux par rapport à l'eau, à l'eau de Cologne, au thé etc. Par contre, certains élèves ne considèrent pas l'oeuf cuit, le vin, etc. comme des produits nouveaux par rapport à l'oeuf cru, le jus de raisin, etc.

En général, ces élèves peuvent distinguer entre différentes sortes de changements mais, comme ils ne disposent pas du concept scientifique de substance et de substance nouvelle, ils s'appuient sur leur sens commun pour décider dans quels cas il y a formation de "quelque chose de nouveau" et ils font plusieurs erreurs de reconnaissance des phénomènes chimiques. Il y a donc là une lacune importante dans le choix du programme, qui tient au fait que l'enseignement de la chimie n'accorde pas aux concepts de substance et de substance nouvelle l'importance qu'ils méritent et qu'il n'aide pas les élèves à les construire et les faire fonctionner correctement.

• Étape 3 : phénoménologie et structure de la matière

L'assimilation de certaines idées enseignées relatives aux modèles et à la structure de la matière est manifestée dans les définitions du concept de réaction chimique, données

... donnent un produit nouveau

mais qu'est-ce qu'un produit nouveau ?

par les élèves qui s'expriment en termes du niveau atomique :

"Eh ben, c'est quand... c'est quand la structure d'un corps change." (18 ans)

"Deux molécules donnent une molécule nouvelle, enfin, d'une structure nouvelle." (18 ans)

Dans certains cas la définition est vague et elle recouvre d'autres catégories de phénomènes. Par exemple, s'il n'est pas précisé de quel changement de structure il s'agit, inter-moléculaire ou intra-moléculaire, une définition comme la première citée ci-dessus peut correspondre aussi bien à un changement d'état qu'à une réaction chimique.

Les élèves de cette étape identifient assez correctement les phénomènes chimiques, surtout en s'appuyant sur des critères phénoménologiques et en mobilisant leurs connaissances déjà acquises concernant certains phénomènes physiques et chimiques tant du laboratoire que de la vie quotidienne. Ce qui est quand même assez impressionnant c'est que, dans leur raisonnement, ils ne font aucunement appel au résultat d'une transformation en termes du niveau manipulateur, c'est-à-dire qu'ils ne s'expriment pas en termes de formation de produit(s) nouveau(x). Il est évident que pour eux/elles, le concept de produit nouveau est faible et insignifiant du point de vue scientifique et ce fait semble les empêcher d'établir de correspondances satisfaisantes entre les concepts du niveau atomique (molécules) et les concepts du niveau manipulateur (substances).

L'analyse précédente met à jour l'**importance cruciale du concept scientifique de substance** dans le processus de construction du concept de réaction chimique et permet de comprendre que l'absence de construction de ce concept scientifique empêche et perturbe le fonctionnement satisfaisant du concept de réaction chimique. Il y a donc besoin de révision des choix du programme tant pour les concepts enseignés que pour le référent empirique proposé aux élèves.

2. LE CONCEPT DE SUBSTANCE

Étant donné que le concept de substance s'avère d'une importance majeure pour l'apprentissage du concept de réaction chimique, un certain nombre de questions surgissent.

- Quelles sont les représentations communes des substances et de leurs interactions dans le cadre de la vie quotidienne ?
- Quelles sont les représentations des enfants par rapport aux substances et leurs interactions dans le cadre de la vie quotidienne ? Est-il possible pour eux/elles de

niveau
manipulateur et
niveau
atomique :
des relations
incertaines

importance du
concept de
substance

- construire une représentation rationnelle des substances dans ce contexte ?
- Quelles modifications de pensée exigerait la construction d'une représentation objective des substances ?
- Dans quelles conditions l'enseignement actuel de la chimie pourrait-il favoriser la construction d'une représentation scientifique des substances ?

Nous allons essayer d'apporter des éléments de réponse aux questions précédentes.

2.1. Hypothèses concernant les représentations communes des substances et de leurs interactions

Dans la vie quotidienne les gens utilisent un grand nombre de substances pour satisfaire plusieurs besoins. Des produits communs comme la nourriture, les vêtements, les combustibles, les médicaments et les produits de beauté, les matériaux de construction ou de nettoyage, etc. sont formés de substances ou de mélanges de substances. Presque tous ces produits sont commercialisés dans des boîtes, des bouteilles, des flacons, etc. et ils se présentent comme des objets ayant une forme spéciale et une propriété utilitaire ou fonctionnelle.

substance-objet

Mais les substances ne sont pas des objets. D'habitude un objet est reconnu par sa forme extérieure, mais la forme d'une substance ne joue pas un rôle crucial pour son identification. Un objet est utilisé pour sa fonction et la forme d'un objet constitue un facteur déterminant de sa fonction de sorte que si on coupe en deux un objet (par exemple une table), il ne peut plus être reconnu ou fonctionner comme avant. Mais si on divise une substance en deux ou plusieurs morceaux, elle continue à avoir ses propriétés et à pouvoir être utilisée comme avant.

substance inerte

Dans la vie quotidienne les gens qui reconnaissent et utilisent des produits communs comme des objets, ignorent en général le fait que chaque substance n'a pas une seule mais plusieurs propriétés et qu'elle peut interagir avec d'autres substances et produire des substances nouvelles. Par exemple, l'essence est largement utilisée pour sa capacité à produire une quantité considérable de chaleur lors de sa combustion dans l'air. Mais les nombreux produits de cette interaction, comme le dioxyde de carbone, les oxydes d'azote, etc. sont généralement négligés jusqu'au moment de la pollution grave de l'air d'une grande ville. Les pratiques communes d'utilisation large de produits chimiques suggèrent que l'idée de l'interaction entre substances n'est pas acquise par la quasi totalité des citoyens, qui continuent à penser que les actions de mise en contact des substances chimiques conduisent presque toujours à la formation de mélanges inertes.

Les problèmes importants de l'environnement qui ont surgi ces dernières années montrent que la société risque de

perdre le contrôle total des substances au niveau social. Pour le citoyen averti de notre époque, ces problèmes soulignent également le besoin d'un changement radical des représentations communes des substances, en des représentations plus rationnelles et plus cohérentes du point de vue scientifique.

2.2. Hypothèses concernant les représentations communes des substances et de leurs interactions chez les enfants

L'observation empirique permet de constater que, dans le cadre de la vie quotidienne, la transmission aux nouvelles générations des connaissances concernant les substances s'effectue par un ensemble de règles d'autorisation et d'interdiction de manipulation et d'utilisation des substances, ainsi qu'à l'aide du langage courant.

L'enfant n'a pas d'accès facile à un grand nombre de substances utilisées largement dans la vie quotidienne. Les produits chimiques à usage domestique (médicaments, insecticides, peintures, colles, produits de ménage, etc.) sont gardés hors de la portée des enfants. De plus, on empêche les enfants de jouer avec le feu, les allumettes, les appareils électriques de cuisine, etc. Par conséquent il est très difficile pour les enfants d'amener des substances en interaction libre entre elles. Mais, bien que cette attitude protège les enfants d'éventuels accidents domestiques, elle les empêche également de faire la connaissance des diverses propriétés - ou interactions - des substances. Ajoutons que les substances qui sont utilisées dans la vie quotidienne sont presque toujours des mélanges complexes. Dans le cadre d'un référent empirique issu de la vie quotidienne, l'enfant ne peut donc concevoir ni l'individualité des substances ni leur interaction chimique. L'apprentissage du langage commun, comme nous l'avons déjà indiqué, ne facilite guère cette tâche et contribue à la construction de représentations communes des substances. Par conséquent le sens attribué au terme de substance chimique est un sens courant, et les données de quelques recherches montrent bien ce fait (Russell et al. 1991, Viovy, Carretto et al. 1979, Llorens Molina et al. 1988).

2.3. Quelles modifications de pensée ?

À notre avis, la construction du concept chimique de substance ne peut être que le fruit d'évolutions conceptuelles profondes, qui vont favoriser le passage de l'idée de substance-objet (inerte), ayant une seule propriété utilitaire ou fonction, à l'idée de substance chimique, identifiée par un ensemble de propriétés-interactions. La construction d'une telle représentation du concept de substance semble exiger une extension catégorielle de la pensée de l'élève. Focalisant sur les tâches intellectuelles qui contribuent au développe-

il est interdit aux enfants de jouer avec les allumettes et aussi avec les substances !

extension catégorielle de la pensée de l'élève

ment de la pensée catégorielle de l'enfant, Wallon (1945/1989) écrit que l'identification d'un objet par ses propriétés s'accomplit d'abord par observation directe, et ensuite par observation plus ample et détaillée de certains traits sensibles de l'objet, et par de longs tâtonnements. Mais quand on pense que dans le cadre de la vie quotidienne l'enfant n'a pas la possibilité de faire d'observations détaillées, de tâtonnements et de manipulations des substances, on peut supposer que cette extension catégorielle dans ce cadre est presque impossible. Il revient donc à l'enseignement de la chimie la responsabilité de favoriser l'extension catégorielle des élèves, en assurant les conditions qui leur permettront de se familiariser avec les substances, leurs diverses propriétés et changements, et qui vont préparer la construction du concept de substance chez eux.

2.4. Le concept de substance dans le cadre de l'enseignement actuel de la chimie

On a eu l'occasion de constater que, même à la fin de l'enseignement secondaire, des élèves français n'ont pas construit le concept scientifique de substance (voir paragraphe 1.2.). Nous pensons qu'il ne s'agit pas d'un fait isolé, mais d'un phénomène beaucoup plus général, dont l'origine se situe dans les choix des programmes de chimie, en France et dans d'autres pays.

les deux
représentations
du concept de
substance ...

En fait le concept scientifique de substance possède deux représentations scientifiques, l'une qui est issue de données du niveau manipulateur et qui se résume à la "carte d'identité" d'une substance, et l'autre qui est élaborée au niveau atomique, suivant laquelle à chaque substance correspond une molécule. La chimie actuelle essaie de faire correspondre les deux représentations d'une substance, de sorte que les données du niveau atomique décrivent et expliquent celles du niveau manipulateur.

... et le besoin de
leur articulation

On s'attend à ce qu'une représentation adéquate de substance repose sur le développement parallèle des deux types de représentation et sur leur mise en inter-relation. Pourtant l'enseignement de la chimie, tel qu'il se pratique actuellement dans plusieurs pays, fait prévaloir les représentations du niveau atomique et les modèles de la structure de la matière, la nomenclature et le symbolisme chimique et il omet de familiariser les élèves avec des aspects essentiels du travail pratique du chimiste. Très souvent l'enseignement passe directement de l'étude des corps matériels et de leurs propriétés physiques (forme, volume, masse, poids, état physique, propriétés sensibles) aux modèles de la structure de la matière, sans prendre en parallèle le soin d'explorer suffisamment des propriétés chimiques des substances et d'établir des correspondances entre les modèles atomiques et les phénomènes étudiés au niveau manipulateur.

2.5. Premiers pas conceptuels de jeunes élèves vers une construction du concept de substance

Nous pensons donc que pour favoriser la construction du concept de substance (au niveau manipulateur), et promouvoir l'extension catégorielle de la pensée des élèves que cette construction implique, il est nécessaire de créer un référent empirique chimique et de choisir un nombre de tâches intellectuelles liées à ce champ empirique. Nous avons utilisé un certain nombre de critères pour la création du référent empirique.

critères de choix
du référent
empirique

1. Choisir une multitude de substances et d'interactions d'une phénoménologie riche et variée (simples mélanges, dissolutions, précipitations, changements de couleur, dégagements gazeux, ou absence de phénomènes sensibles), dans le but de donner aux élèves l'occasion de développer des représentations au niveau manipulateur, ce qui n'est pas possible dans la vie quotidienne.
2. Organiser la présentation des substances et de leurs interactions en cycles de manipulations, fait qui correspond à des élargissements successifs du référent empirique des élèves.
3. À l'intérieur de chaque cycle de manipulations, partir de quelque chose qui semble connu des élèves et montrer qu'il peut être quelque chose d'inconnu. Par exemple, dans le premier cycle de manipulations, nous avons présenté aux élèves trois substances pures ayant la même apparence - blanches, cristallines - qui ont été mises en interaction deux par deux entre elles. Dans les trois cas, les élèves ont observé des résultats différents et souvent inattendus, ce qui leur a fait penser qu'il s'agissait de substances différentes et inconnues.
4. Éviter de présenter aux élèves des substances gazeuses à l'état initial, puisque plusieurs élèves de ce niveau ne considèrent pas les gaz comme des corps matériels.
5. Éviter des phénomènes où la chaleur et le feu sont impliqués, car il est connu que les combustions posent de multiples problèmes aux jeunes élèves (Méheut 1982, Méheut et al. 1985, Solomonidou 1992).

Les tâches intellectuelles des élèves que nous avons choisies par rapport à ce référent empirique sont :

tâches
intellectuelles

- l'observation et la description des substances présentées,
- la recherche de points communs et de différences pour la différenciation de certaines substances,
- la prévision pour le résultat de chaque manipulation,
- l'observation et la description de chaque manipulation,
- la comparaison entre l'état initial et l'état final,
- la détection et l'interprétation des changements de la matière observés.

Les critères de choix du référent empirique et des tâches intellectuelles sont établis dans le but de provoquer chez les

élèves des raisonnements qui se détachent peu à peu du concret et du connu et qui progressent dans la sphère du possible et de l'inconnu.

Nous avons fait l'hypothèse que dans ces conditions un processus d'extension catégorielle et d'évolution conceptuelle des élèves était possible et détectable.

Cette hypothèse a été vérifiée à la suite d'une recherche que nous avons réalisée avec des élèves français et grecs de 11-14 ans (pour le détail se référer à Solomonidou 1991). Le référent empirique comprenait dix substances chimiques pures, dont on ne donnait pas le nom mais que l'on nommait "substance A", "substance B", etc., et l'eau (voir Tableau 3) et cinq cycles de dix-huit manipulations de mise en contact-interaction de deux ou plusieurs de ces substances (voir Tableau 4).

TABLEAU 3

Cycle de manipulations	Lettre corr.	Les substances présentées	Formule
1er, 2e, 4e, 5e	A	Chlorure de sodium	NaCl
1er, 2e, 4e	B	Iodure de potassium	KI
1er, 2e, 4e	C	Nitrate de plomb	Pb(NO ₃) ₂
3e	D	Bichromate de potassium	K ₂ Cr ₂ O ₇
3e, 4e	E	Sulfate de cuivre anhydre	CuSO ₄
3e, 4e	F	Permanganate de potassium	KMnO ₄
3e	G	Chlorure de cobalt anhydre	CoCl ₂
3e, 4e	H	Fer	Fe
5e	J	Carbonate de calcium	CaCO ₃
5e	K	Carbonate de potassium	K ₂ CO ₃
5e	L	Acide acétique	CH ₃ COOH
2e, 4e	W	Eau	H ₂ O

TABLEAU 4

Cycle de manipulations	Lettres corresp.	Les expériences réalisées
1er	AB	NaCl + KI
	AC	NaCl + Pb(NO ₃) ₂
	BC	KI + Pb(NO ₃) ₂
2e	ABW	NaCl + KI + H ₂ O
	ACW	NaCl + Pb(NO ₃) ₂ + H ₂ O
	BCW	KI + Pb(NO ₃) ₂ + H ₂ O
3e	DW	K ₂ Cr ₂ O ₇ + H ₂ O
	EW	CuSO ₄ + H ₂ O
	FW	KMnO ₄ + H ₂ O
	GW	CoCl ₂ + H ₂ O
	HW	Fe + H ₂ O
4e	ABFW	NaCl + KI + KMnO ₄ + H ₂ O
	ACFW	NaCl + Pb(NO ₃) ₂ + KMnO ₄ + H ₂ O
	BCFW	KI + Pb(NO ₃) ₂ + KMnO ₄ + H ₂ O
	EHW	Fe + CuSO ₄ + H ₂ O
5e	AL	NaCl + CH ₃ COOH
	JL	CaCO ₃ + CH ₃ COOH
	KL	K ₂ CO ₃ + CH ₃ COOH

étude des évolutions conceptuelles des élèves

La séance expérimentale a duré trois heures. Les questions que nous avons posées aux élèves (par oral ou par écrit) ont assuré leur participation active du début jusqu'à la fin de la séance. Les élèves ont été mis dans une situation dont les caractéristiques sont : la familiarisation avec un référent empirique chimique, les élargissements successifs de ce référent empirique et le questionnement spécialement développé pour cette séance. L'analyse des réponses des élèves (analyse des mots et des phrases) nous a permis de détecter la mobilisation de représentations initiales des élèves, la création de nouvelles catégories concernant les substances et leurs interactions, et d'éclairer leur évolution conceptuelle. Les idées initiales et les évolutions conceptuelles des élèves que nous avons détectées sont les suivantes.

a) De la substance de la vie courante à la substance chimique

Une évolution considérable des élèves se révèle dans le fait qu'au début de la séance l'ensemble des substances présen-

du produit
concret à la
substance
inconnue

tées était considéré comme des substances connues de la vie quotidienne ayant, dans les meilleurs des cas, une ou deux propriétés sensibles ou utilitaires. Par contre, à la fin de la séance la grande majorité des élèves a traité les substances comme des substances inconnues, ayant un nombre de propriétés-interactions.

Par exemple, les substances B (KI) et C($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) sont décrites au début à l'aide des termes suivants : "sucre", "ça ressemble à du sel fin", "détergent", "farine", "comme du sucre-poudre", etc. Après la réalisation de la manipulation BC [$\text{KI}+\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$], les élèves s'expriment d'une façon différente :

"La poudre B est douée d'une forte puissance, et quand elle se mélange avec les grains de la poudre C, elle a la propriété de faire apparaître la poudre jaune".

"Les grains de la substance B n'ont aucun constituant commun. Si on fait l'analyse chimique de la substance jaune (PbI_2), on va voir que les constituants de la substance jaune sont séparés et contenus dans les substances B et C. Un de ces constituants contient, à l'intérieur de son noyau, la substance jaune qui doit être unie avec un autre constituant de la substance C pour pouvoir être vue à l'œil nu."

Pour la substance L (CH_3COOH) les expressions initiales sont : "vinaigre", "ça sent comme l'éther et comme l'alcool", "il sent comme s'il était de l'ammoniac", etc. Après la réalisation du 5e cycle de manipulations, les expressions sont du type : "Le liquide est fort et rentre dans la pierre gazeuse et comme ça l'air qu'il y a dedans s'en va". "Le liquide est puissant et agit sur J". "Expérience : Liquide fort + poudre = liquide + bulles. Les bulles sont dues à l'union chimique qui a lieu (liquide+solide). Pour que cette union ait lieu, le liquide avait déjà cet air, mais les bulles se sont manifestées après l'union de la poudre avec le liquide."

b) Du mélange inerte à l'idée d'interaction

Les prévisions des élèves concernant le résultat de chaque manipulation montrent que pour eux/elles chaque action de mise en contact de deux ou plusieurs substances conduit à un mélange inerte. Plusieurs élèves ont exprimé clairement cette idée en utilisant le terme "mélange", tandis que d'autres ont exprimé cette idée de façon indirecte. Pour le mélange des substances A (NaCl) et B (KI) ils/elles disent que : "Les substances seront dans le même endroit et ça fera comme si elles étaient séparées", "ça fera un goût sucré et salé".

Après l'observation des changements dont le résultat était inattendu et impressionnant, certains élèves ont évoqué l'idée d'une interaction entre les substances initiales, bien que cette interaction ait un sens mécanique (frottements, chocs, casses, etc.) ou animiste (force ou puissance d'une substance par rapport aux autres, etc.). Par exemple ils/elles disent: "Le constituant de B s'unit avec le constituant de C, et il casse l'enveloppe du petit grain", "La poudre C a trouvé l'élément qui lui manquait" (manipulation KI +

du mélange
inerte à l'idée
d'interaction
- mécanique
ou animiste -

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), "Le liquide contient l'élément qui manque à la poudre et la poudre fait unir cet élément avec les autres éléments qu'elle contient" (manipulation $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$).

Pourtant dans le cas des expériences où l'eau a participé à des processus chimiques (expériences $\text{CoCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe} + \text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$), les élèves n'ont pas évoqué l'idée d'interaction entre la substance initiale et l'eau : "C'est dû à l'eau. L'eau peut changer les couleurs ou elle ne les fait pas changer".

l'eau pose de problèmes

Ces élèves ont attribué à l'eau la capacité de faire changer ou ne pas changer les autres substances, ce qui les empêche d'appréhender les interactions chimiques qui ont lieu.

c) De l'idée de séparation de la substance et de ses propriétés à l'idée de préexistence des produits nouveaux

Au début de la séance plusieurs élèves pensent que lorsqu'une transformation de la matière a lieu, les propriétés de la substance changent, tandis que la substance elle-même reste inchangée. Il s'agit de l'idée de séparation ou distinction entre une substance et ses propriétés, idée qui est claire dans les extraits d'entretiens qui suivent :

"la couleur s'en va et les grains restent au fond"

"Le jaune s'en va, donc il se répand dans toute l'eau et les grains restent tout le temps au fond". "Il y a décoloration des grains jaunes, le liquide devient jaune et les grains blancs se mettent au fond du tube ; la couleur des grains s'en va, on peut reprendre les grains, mais pas la couleur" (manipulation $\text{KI} + \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$).

"La couleur s'en va et les petites mines de crayon se mettent au fond" (manipulation $\text{KMnO}_4 + \text{H}_2\text{O}$).

"L'eau ici a pris la couleur de la poudre qui est restée en dessous" (manipulation $\text{CoCl}_2 + \text{H}_2\text{O}$).

Certains élèves qui ont commencé à assimiler l'idée d'interaction, ont l'intuition qu'il y a apparition de quelque chose de différent par rapport aux substances du départ, mais ils/elles optent plutôt pour la préexistence des substances finales à l'intérieur des substances initiales que pour la formation des substances nouvelles. Dans ce sens ils/elles ont attribué l'apparition de ces produits "préexistants" aux conditions d'interaction entre les substances du début. Les extraits suivants sont caractéristiques :

"la substance jaune préexistait"

"À mon avis la substance jaune préexistait. Un des milliers des grains de la substance jaune donne la couleur dans l'ensemble de la poudre. Je pense que dans ce grain il y a la couleur jaune, mais à l'extérieur ce grain est blanc. Quand les deux poudres B et C se mélangent, ce grain casse et donne la couleur et la poudre devient jaune" (manipulation $\text{KI} + \text{Pb}(\text{NO}_3)_2 + \text{H}_2\text{O}$).

"Cette petite pierre a dû rester pendant très longtemps dans une couche de gaz naturel et donc le gaz s'est accumulé sur cette pierre, elle s'est imprégnée, et dès qu'on la mélange

avec un peu d'eau, le gaz ressort" (manipulation $\text{CaCO}_3 + \text{CH}_3\text{COOH}$).

L'ensemble des résultats obtenus lors de cette recherche permet de conclure qu'il y a un processus de mobilisation de catégories conceptuelles déjà existantes, suivi d'un processus de création de nouvelles catégories dans la pensée des élèves concernant les substances, leurs propriétés et leurs interactions. Ces premières évolutions conceptuelles des élèves suggèrent que la méthodologie suivie se trouve dans la bonne direction. Nous voyons donc la construction du concept scientifique de substance comme un prolongement de ce travail.

CONCLUSIONS

la construction et le fonctionnement du concept de réaction chimique...

dépend de la construction et du fonctionnement du concept scientifique de substance

Le concept de réaction chimique constitue un nœud central à l'intérieur d'un réseau conceptuel d'origine chimique et se définit comme une transformation de substances en d'autres substances. Pourtant, dans le cadre de la vie quotidienne, les transformations de la matière sont appréhendées à l'aide de catégorisations spontanées (par exemple, naturel-artificiel) et de représentations communes véhiculées par la langue quotidienne (corps agent-corps patient, destruction-disparition de la matière, changement sans interaction, changement des propriétés et conservation de l'identité des substances, etc.). Etant donné que chaque élève aborde l'enseignement de la chimie avec sa propre organisation conceptuelle et ses outils personnels d'interprétation de la réalité, la question qui surgit est de savoir comment l'école peut réussir dans sa tâche de réorganisation et d'enrichissement du domaine conceptuel des élèves. Notre première recherche apporte des réponses à cette question et elle permet d'avoir une image globale de la dynamique des évolutions conceptuelles des élèves et du processus de construction du concept de réaction chimique tout au long de l'enseignement secondaire. À l'issue de cette recherche, nous avons eu l'occasion, pour la première fois, de prendre conscience du fait que la construction et le fonctionnement du concept de réaction chimique dépend de la construction et du fonctionnement du concept scientifique de substance. Les données de cette recherche ont mis à jour que si l'enseignement de la chimie ne prend pas le soin d'aider les élèves à construire le concept de substance, les conséquences sont considérables, puisque les élèves attribuent un sens courant au concept de produit nouveau et ils/elles ne peuvent pas comprendre dans quels cas il y a formation de nouveaux produits ou conservation des produits du départ, c'est-à-dire, dans quels cas un phénomène est une réaction chimique ou une transformation physique de la matière. L'absence de construction du concept scientifique de substance empêche également les élèves d'établir des corres-

pondances satisfaisantes entre les entités du niveau manipulatoire (substance) et celles du niveau atomique (molécule).

complexité des produits utilisés dans la vie quotidienne

Puisque le concept de substance s'avère d'une importance majeure pour l'enseignement de la chimie, nous avons recherché les conditions nécessaires pour favoriser sa construction de la part des élèves. Une analyse des pratiques communes d'utilisation des substances dans le cadre de la vie quotidienne nous a permis de repérer un certain nombre de représentations communes concernant les substances et leurs interactions (substances traitées comme des objets, considérées comme inertes, etc.). Cette analyse, ainsi que le fait que les substances de la vie quotidienne sont extrêmement complexes, ont renforcé notre hypothèse qu'il est presque impossible aux enfants de construire le concept de substance dans le cadre de la vie quotidienne et qu'il revient à l'enseignement de la chimie d'accomplir cette tâche.

dans quelles conditions la construction du concept de substance est possible ?

L'étude des conditions qui favorisent une première construction du concept de substance, ainsi que l'extension catégorielle de la pensée des élèves que cette construction implique, est le sujet de notre deuxième recherche. Pour les besoins de cette recherche nous avons organisé une séance expérimentale d'initiation en chimie, au cours de laquelle nous avons détecté les évolutions conceptuelles des élèves à propos d'un certain nombre de substances chimiques, d'interactions et de transformations de ces substances. Les critères de choix du référent empirique et des tâches intellectuelles sont établis dans le but de provoquer chez les élèves des raisonnements qui se détachent peu à peu du concret et du connu et qui progressent dans le possible et l'inconnu. Les données de cette recherche ont mis à jour que dans ces conditions, des évolutions conceptuelles assez nettes ont lieu chez une partie considérable de jeunes élèves du collège, et qu'elles sont provoquées surtout par l'intégration de l'idée d'interaction.

perspective : montrer les limites de la phénoménologie...

Nous voyons la construction des concepts scientifiques de substance et de réaction chimique dans une perspective d'adaptation et de prolongement de nos travaux dans un contexte pédagogique d'enseignement de la chimie. Dans un premier temps l'enseignement doit explorer la phénoménologie des transformations de la matière et doit développer des critères phénoménologiques pour aider les élèves à identifier et à différencier les substances et à catégoriser leurs transformations. Ensuite on doit montrer les limites du fonctionnement de ces critères(1) et faire ressentir la nécessité d'établir des critères plus scientifiques-chimiques afin

(1) Par exemple le dégagement gazeux peut être un indice de formation de produits nouveaux mais dans d'autres cas il peut indiquer la présence d'un gaz dilué dans un liquide. La précipitation d'une substance peut être l'indice de formation d'un produit nouveau ou un effet de saturation d'un solvant, etc.

et introduire des constantes physiques pour l'identification des substances

d'identifier les substances et comprendre leurs transformations. Dans ce sens on doit montrer le besoin d'isolement et de pureté d'une substance et d'utilisation de constantes physiques qui permettent l'identification d'une telle substance, comme le sont le point de fusion et le point d'ébullition d'une substance pure. Nous pensons que la construction du concept de substance au niveau manipulateur doit précéder tout travail de modélisation au niveau atomique et constitue un pas décisif vers un processus d'articulation entre représentations du niveau manipulateur et du niveau atomique. L'enseignement de la chimie doit également accorder l'attention nécessaire aux obstacles qui sont liés au fonctionnement et à la structure de la langue quotidienne.

Christine SOLOMONIDOU
Hélène STAVRIDOU
Université de Thessalie, Grèce

BIBLIOGRAPHIE

- LE NY, J.-F. (1989). *Science cognitive et compréhension du langage*. Paris : PUF.
- LLORENS MOLINA, J., De JAINE LOREN, d.C., LLOPIS CASTELLO, R. (1988). "Langage quotidien et acquisition des concepts scientifiques", in : A.Giordan, J.-L. Martinand (éds.) *Actes des Xes JIES*, 107-115.
- MARTINAND, J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- MARTINAND, J.-L. (1992). Présentation, in : *Enseignement et apprentissage en modélisation en sciences*, Paris : INRP, 7-22.
- MÉHEUT, M. (1982). *Combustions et réactions chimiques dans un enseignement destiné à des élèves de sixième*, Thèse de 3e cycle, Université Paris 7.
- MÉHEUT, M., SALTIEL, E., TIBERGHEN, A. (1985). "Pupils' (11-12 years old) conceptions on combustion". *European Journal of Science Education*, 7, 83-93.
- OSBORNE, R.J., GILBERT, J.K., (1980). "A method for investigating concept understanding in science". *European Journal of Science Education*, 2, 311-321.
- RUSSELL, T., LONGDEN, K., Mc GUIGAN, L. (1991). *SPACE Project : Materials*. Great Britain, Liverpool Univ. Press.
- SOLOMONIDOU, C. (1991). *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du collège*. Thèse soutenue à Paris 7.

SOLOMONIDOU, C. (1992). "Difficultés conceptuelles de jeunes élèves au cours de l'enseignement expérimental des réactions chimiques lors des combustions" (en grec), in : A. Demetriou, A. Efklides, et al. (éds.). *Recherches Psychologiques en Grèce*, Vol. I, Université Aristote de Thessalonique, 91-112.

SOLOMONIDOU, C., STAVRIDOU, H. (1987). "À propos de la distinction entre phénomène physique et phénomène chimique", in : A.Giordan, J.-L.Martinand (éds.) *Actes des IXes JIES*, 367-372.

SOLOMONIDOU, C., STAVRIDOU, H. (1991). "Idées des élèves pour les transformations de la matière : le rôle de la langue quotidienne dans leur formation" (en grec). *Epitehorissi Physsikis*, 20, 11-16.

STAVRIDOU, H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*. Thèse soutenue à Paris 7.

STAVRIDOU, H. (1992). "Transformations physiques et chimiques de la matière : la matière se détruit-elle ?" (en grec), in : A. Demetriou, A. Efklides, et al. (éds.) *Recherches Psychologiques en Grèce*, Vol.I, Université Aristote de Thessalonique, 113-130.

STAVRIDOU, H., SOLOMONIDOU, C. (1989). "Physical phenomena-chemical phenomena : do pupils make the distinction ?" *International Journal of Science Education*, 11(1), 83-92.

STAVRIDOU, H., SOLOMONIDOU, C., PAPADEMETRIOU, V. (1993). "Student-teachers conceptions about physical and chemical matter transformations", in : *Book of Abstracts of the 2nd European Conference on Research in Chemical Education*, 49.

VAN GEERT, P. (1983). *The development of perception, cognition and language*. London, Routledge and Kegan Paul.

VIOVY, R., CARRETTO, J., BENSUAUDE, B., et al. (1979). Enquête par questionnaires sur quelques vocables d'orientation scientifique. *Revue Française de Pédagogie*, 68, 61-71.

VYGOTSKY, L. (1934/1988). *La pensée et le mot*. Athènes : Gnessi.

WALLON, H. (1945/1989). *Les origines de la pensée chez l'enfant*. Paris : PUF (Quadrige).

“EXPÉRIENCE-DÉCOUVERTE”, COMBUSTIONS ET TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE À L'ÉCOLE ÉLÉMENTAIRE

André Laugier
Maurice Padeloup

L'initiation à une démarche expérimentale constitue un des objectifs de l'enseignement scientifique à l'école primaire. À travers des "expériences-découvertes" autour de la situation de la combustion de la bougie, quelles connaissances, mais aussi quelles compétences est-il possible de faire construire par les élèves ? Le projet du maître et les préoccupations des élèves sont-ils de même nature ? Quel est le rôle des phénomènes observés par rapport aux démarches de l'élève ? Les obstacles qui se manifestent par rapport à la formation du concept de réaction chimique condamnent-ils ce type d'activité à l'école élémentaire ?

1. INTRODUCTION

Depuis les origines de l'école primaire en France, dans le curriculum de Sciences il y a toujours eu une petite partie relevant de la Chimie.

Cet enseignement présentait la composition de l'air et de l'eau au moyen d'expériences classiques, étudiait les combustions "domestiques" (bougie, lampe à pétrole, poêle) et insistait sur les précautions à respecter lors du fonctionnement de ces appareils. Si les instructions de 1980 maintiennent cet enseignement des combustions(1), les nouveaux programmes de 1985 n'y font plus référence.

Or la fréquentation régulière de classes de l'école élémentaire, les travaux que nous avons pu mener sur le statut de l'expérience en sciences physiques à l'école(2), des enquêtes récentes(3) sur l'usage des manuels par les maîtres nous montrent que les manuels de leçons de choses ainsi que les

une activité
"traditionnelle" à
l'école
élémentaire

- (1) "Déclencher, entretenir, activer ou ralentir une combustion. Mettre en évidence la disparition des produits de départ et la formation de produits nouveaux (eau, noir de fumée, ...). Découvrir la nécessité de l'air dans la combustion (bougie, lampe à pétrole, briquet à gaz)" Bulletin Officiel N°31 du 11 septembre 1980.
- (2) Laugier A. (1992). *Contribution au statut de l'expérience à l'École Élémentaire*. Mémoire de DEA. Sous la direction de M. Padeloup. Université Paul Sabatier. Toulouse.
- (3) Chaillé (1985). *Le manuel à l'école élémentaire*. Paris. Direction des écoles.

activités qu'ils véhiculent n'ont pas totalement disparu des salles de classes.

Un des volumes du guide du maître les plus utilisés par les enseignants de l'école élémentaire réserve 80 pages sur 300 à des activités centrées sur la combustion de la bougie(4).

Si ce thème de la combustion de la bougie fait toujours partie des sujets susceptibles d'être abordés en CE2 et en CM c'est qu'il présente plusieurs avantages pour l'enseignant :

très prisée par les
enseignants...

- il concerne un phénomène que les enfants connaissent, pour lequel ils ont un vécu en dehors du cadre scolaire (bougies des gâteaux d'anniversaire, voire, dans les régions viticoles, utilisation dans les chais pour détecter la présence de dioxyde de carbone dans les cuves à vin),
- il sert très souvent de point de départ pour l'étude du changement d'état de la cire ainsi que pour mettre en évidence l'existence de l'air autour de nous (programme du cours élémentaire),
- le matériel qui constitue souvent un frein à la pratique des activités expérimentales est ici bon marché et simple à mettre en œuvre,
- de plus il s'agit d'une activité bien rodée, pratiquée à l'école primaire depuis ses origines.

On peut s'interroger sur les raisons de cette disparition. Si des raisons pratiques motivaient la présence au programme d'une "technologie des combustions" celle-ci peut apparaître aujourd'hui comme moins importante (développement du chauffage électrique en milieu urbain). Par ailleurs les travaux conduits avec des élèves un peu plus âgés ont tous montré les difficultés de ceux-ci dans l'acquisition du concept de réaction chimique à partir des expériences de combustions dans l'air :

malgré des
difficultés
nombreuses et
non résolues

- R. Marescot(5) signale, l'existence de difficultés nombreuses et non résolues pour des enfants de CM2 (malgré un travail très important de plus d'un trimestre à raison d'une heure trente par semaine).
- M. Méheut(6) a travaillé sur l'aide que peut apporter l'utilisation d'un modèle particulière fourni à des élèves de sixième pour conceptualiser la notion de réaction chimique à partir de l'étude des combustions, l'acquisition du concept de réaction chimique s'appuyant sur une activité de modélisation.
- Cauzinille-Marmèche, Méheut, Séré, et Weil-Barais(7) ont conduit des travaux concernant des enfants plus âgés (classes de sixième et cinquième de Collège). Il s'agissait

(4) Dans la collection R. Tavernier (1980), *Le feu, la lumière, le temps qui passe*. Paris : Bordas.

(5) Marescot R. (1976). *Les combustions*. Rapport interne INRP.

(6) Méheut M. (1982). *Combustions et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième*. Thèse de Troisième Cycle. Université de Paris VII.

(7) Recherche présentée dans *Les savants en herbe* (1983) des mêmes auteurs. Berne : P. Lang.

alors d'étudier le rôle des activités manipulatoires sur les protocoles expérimentaux proposés par les élèves pour tester l'effet des différents facteurs susceptibles d'intervenir dans la durée de la combustion. Les élèves devaient ensuite effectuer des mesures, leur travail se situant alors sur un mode quantitatif.

Toutes ces recherches mettent en évidence les difficultés pour conceptualiser la réaction chimique en prenant les combustions comme point d'appui.

Dans ces conditions faut-il ignorer cette activité avec des enfants de 9-10 ans ? Répondre immédiatement par l'affirmative n'est pas évident et mérite à notre avis que l'on examine la question avec soin.

Aujourd'hui, quand un enseignant de l'école élémentaire choisit de conduire une activité en sciences expérimentales, il doit le faire à l'intérieur d'un cadre institutionnel qui fixe à cet enseignement des objectifs précis :

D'une part "*l'enfant doit acquérir les connaissances et les compétences qui lui permettront d'accéder à la maîtrise intellectuelle et pratique du monde*". D'autre part "*cet enseignement a aussi pour objectif de faire acquérir les méthodes propres à la démarche scientifique (observer, analyser, expérimenter, puis représenter)*" (8).

L'accent à l'école élémentaire est mis sur les démarches de science davantage que sur l'acquisition de concepts scientifiques. Et c'est par rapport à cette priorité qu'il convient d'examiner l'intérêt et le fonctionnement de cette activité.

Dans les recherches dont nous avons parlé il s'agissait de favoriser l'acquisition du concept de réaction chimique (Marescot, Méheut) ou d'étudier le rôle des différents facteurs qui interviennent dans le phénomène de la combustion (Cauzinille-Marmèche et al.). Les résultats de ces recherches nous montrent que ces objectifs ne peuvent être atteints qu'à deux conditions :

- que les élèves maîtrisent la conservation des quantités physiques sur lesquelles ils devront effectuer des opérations logiques. Comme le souligne Vinh Bang (9) "*la conservation constitue la condition nécessaire à toute activité rationnelle*". Et ce n'est qu'à partir du moment où l'enfant a acquis cette "*certitude apodictique de l'invariance*" qu'il tire "*la connaissance objective de l'expérience réalisée sur le réel*" ;
- que les élèves aient déjà pu construire une représentation même sommaire pour le phénomène étudié. Cette représentation (par exemple ici ce sera : pour que la bougie brûle il faut qu'il y ait de l'air), en tant que premier système explicatif, servira de point d'appui pour modéliser

(8) Ministère de l'Éducation nationale. Direction des Écoles. (1991). *Les cycles à l'école primaire*. Paris : Hachette-CNDP.

(9) Giordan A., Henriques A., Vinh Bang (1989). *Psychologie génétique et didactique des sciences*. Berne : P. Lang.

un enseignement qui doit mettre l'accent sur les démarches

plutôt que sur la construction d'un concept difficile à envisager chez des enfants de 9-10 ans

ultérieurement la situation. C'est lors de cette modélisation qu'ils pourront élaborer des hypothèses, déterminer des facteurs et tester leur effet, l'activité tendant vers une approche de la démarche hypothético-déductive (enfants de 11-12 ans).

Notre étude a porté sur les conditions dans lesquelles les élèves pouvaient construire une première ébauche de ce système explicatif qui se situe en amont de la modélisation qui accompagnera l'acquisition du concept de réaction chimique. Pour cette raison notre travail s'est effectué avec des enfants de 8-10 ans (début de cours moyen) pour lesquels la conservation des quantités est en cours d'acquisition et qui pour la combustion de la bougie ne disposent pas non plus d'un cadre explicatif opératoire.

Nous avons regardé comment "l'expérience-découverte" intervenait dans cette construction en permettant de poser le problème, puis comment les "expériences-pour voir" aident l'enfant à affiner ce système, et enfin comment le débat avec ses camarades allait lui permettre de le formuler.

2. LE DISPOSITIF DIDACTIQUE

2.1. Les conditions de l'expérimentation

Nous avons souhaité respecter les contraintes de temps et pour cette raison le travail s'est réparti sur deux séquences de 45 minutes environ, dans une classe de 24 élèves (un élève absent à la première séquence).

Le travail prévu comportait trois phases brièvement présentées ci-dessous.

Première phase : c'est une phase de manipulations expérimentales libres pour découvrir des faits nouveaux. Dans ce type d'expérience que nous appelons "expérience-découverte" il ne s'agit pas d'élaborer un protocole permettant de répondre à une question que l'on se pose (il n'y a pas d'hypothèse *a priori*). Il s'agit plutôt ici de rencontrer l'expérience qui dérange afin de mettre les élèves face à des interrogations qui une fois formulées puis institutionnalisées au niveau de la classe deviendront le problème à résoudre. Ici ce sera le rôle de l'air dans la combustion.

Au départ c'est l'enseignant qui est à l'initiative de la situation. Ensuite après que l'élève ait utilisé le matériel **librement**, à l'intérieur d'une **consigne suffisamment ouverte** (les seules contraintes sont liées à la sécurité, et à la nécessité de communiquer ensuite le travail réalisé dans chaque groupe), c'est lui qui va s'emparer de la situation et être force de proposition et d'interprétation. C'est l'activité des élèves dans cette première phase d'exploration qui va permettre la dévolution du problème que l'enseignant a décidé d'aborder.

de l'expérience
pour découvrir
des faits
nouveaux...

à l'expérience
pour connaître la
réponse à une
question

Deuxième phase : Au cours d'un débat entre les élèves où ceux-ci communiquent leurs observations et leurs questions le problème auquel l'enseignant souhaite que la classe apporte une réponse est formulé(10).

L'expérience va être la même pour tout le monde ce n'est plus l'expérience "pour voir" de la phase précédente c'est une expérience proposée par le maître qui doit permettre de savoir, de répondre à une question et si possible de construire une connaissance.

Troisième phase : Il s'agit là d'une phase de tâtonnement dans laquelle l'élève doit résoudre un problème "technique" en imaginant des solutions possibles. L'activité de l'élève, attendue par l'enseignant, relevant ici de la "pensée divergente" (imagination, création) de M. Develay (11).

2.2. La fiche pédagogique

L'enseignant avait à sa disposition une fiche pédagogique (présentée dans l'encadré ci-après). Cette fiche, élaborée sous la responsabilité du chercheur mais en concertation avec l'enseignant, représentait une analyse *a priori* du déroulement attendu. La consigne donnée à l'enseignant était de respecter la fiche mais il avait la possibilité de s'en écarter s'il estimait que la situation l'exigeait.

(10) Nous aurons à revenir sur le décalage entre le projet que l'enseignant va essayer de faire partager à ses élèves et les préoccupations de ceux-ci.

(11) On trouvera dans l'article de M. Develay (Develay M. (1989). "Sur la méthode expérimentale" in : *Aster*, 8, INRP. Paris) une étude des différents modes de pensée mis en oeuvre au cours d'une démarche expérimentale.

LA FICHE PÉDAGOGIQUE

1. Objectifs

- * Découvrir des faits expérimentaux qui serviront de point de départ à la réflexion
- * Poser le problème du rôle de l'air dans la combustion de la bougie
- * Résoudre un problème par tâtonnement expérimental.

2. Matériel

Par groupe de trois élèves :

- une bougie de deux à trois centimètres de hauteur
- une soucoupe
- un pot en verre (taille différente suivant les groupes)
- des bouteilles en matière plastique sciées à la base et munies de leur bouchon
- une boîte d'allumettes
- une paire de ciseaux
- de la farine ou de la pâte à modeler.

3. Déroulement de la séquence.

Première phase

Présentation de la situation

L'enseignant distribue à chaque groupe une bougie, une soucoupe, les allumettes. Il fait nommer le matériel et rappelle les règles de sécurité.

Consigne.

"Vous allez allumer la bougie et manipuler ce matériel, vous noterez ce que vous faites et ce que vous observez".

Déroulement

Les élèves, dans chaque groupe, allument la bougie et notent leurs observations à l'aide d'un schéma. (fusion de la cire, noircissement éventuel de la soucoupe mise au dessus de la flamme, etc.)

Bilan des observations libres.

Après une dizaine de minutes de manipulations libres à l'intérieur de la consigne de départ, l'enseignant organise une synthèse des observations des élèves et des questions qu'ils se posent. Ce bilan permet à l'enseignant de connaître les représentations des élèves et à ceux-ci de prendre conscience des interprétations différentes des mêmes phénomènes à l'intérieur de la classe.

Deuxième phase

Présentation de la situation

Le maître, à la suite de la discussion précédente propose aux enfants de réfléchir individuellement à ce qui se passerait si on recouvrait la bougie allumée avec un pot en verre.

une consigne ouverte pour découvrir des faits nouveaux

une consigne plus précise pour aborder le problème que l'enseignant veut traiter

Consigne

"*Tout à l'heure vous recouvrirez la bougie allumée avec un pot en verre que je vous remettrai. Chacun d'entre vous, sans discuter avec ses camarades, va expliquer, sur une feuille de papier, ce qui d'après lui, devrait se passer et pourquoi*".



Déroulement

Lorsque les élèves ont fait leur prévision l'enseignant organise une synthèse et une confrontation des prévisions puis leur propose de réaliser l'expérience projetée. Il faut noter qu'à ce stade l'enseignant s'efforce de rester neutre par rapport aux prévisions des enfants mais les laisse débattre entre eux.

Après que les élèves aient tous constaté l'extinction de la bougie, il les invite à discuter cette observation.

Troisième phase

Consigne

"*On va recouvrir la bougie allumée avec une grande bouteille en plastique fermée en haut par le bouchon et dont le fond a été scié. Que va-t-il se passer ?*" (la consigne impose de maintenir la bouteille posée sur le joint de pâte de farine)

Déroulement

- L'enseignant recueille les prévisions individuelles des élèves et, après avoir organisé le bilan des prévisions, il les invite à réaliser l'expérience : la bougie s'éteint.
- Il va alors demander aux enfants de réfléchir individuellement à ce qu'ils pourraient faire pour que la bougie, coiffée par la bouteille, ne s'éteigne pas.
- Il organise un bilan des prévisions puis invite les élèves à tester leurs propositions.

Le tâtonnement expérimental doit permettre aux enfants de trouver la solution du problème (un trou à la base de la bouteille et un trou au sommet pour assurer le renouvellement de l'air).

Lorsque tous les enfants ont résolu ce problème il organise une discussion à partir de questions du type :

- *à quoi peuvent servir ces deux trous ?* (mise en évidence d'un courant d'air par des petits bouts de papier)
- *qu'est-ce qui entre ? c'est de l'air* (l'allumette enflammée ne s'éteint pas).
- *Ce qui sort est-il de l'air ? Comment le savoir ?* (l'allumette enflammée s'éteint).

L'enseignant invite les élèves à rechercher dans leur environnement des dispositifs où on retrouve ce type de situation (cheminées à foyer fermé, normes de sécurité pour l'aération des pièces comportant une chaudière ou un chauffe-bain, etc.).

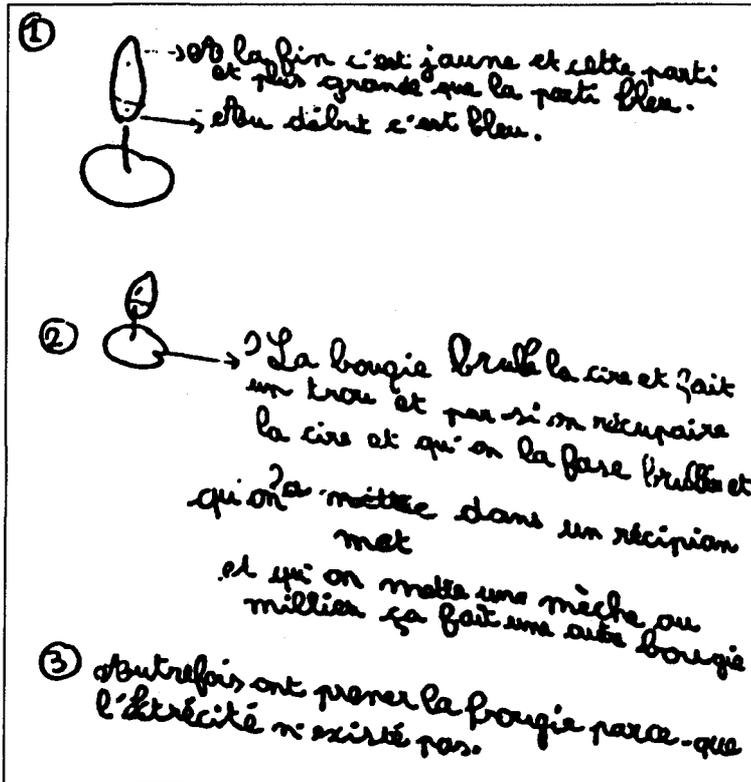
une troisième situation choisie pour faire découvrir la modification subie par l'air lors de la combustion

3. OBSERVATION DES ÉLÈVES

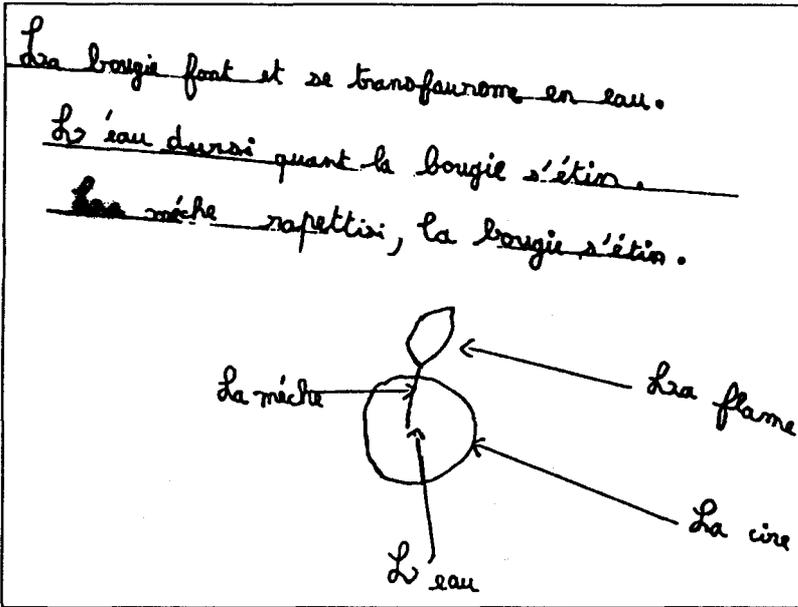
3.1. Première phase

pour les élèves la
cire n'est pas
consommée

- La plupart des élèves ont des difficultés pour allumer l'allumette, puis la bougie. Les élèves habitués au tout électrique et aux allumeurs piézo-électriques ne sont plus familiarisés avec l'utilisation d'allumettes.
- Très rapidement les réflexions des enfants montrent que pour la majorité d'entre eux la cire de la bougie n'est pas consommée dans la combustion. Simplement elle coule et se répand au pied de la bougie. La quantité de cire n'est pas affectée par la combustion de la bougie qui ne concerne que la mèche.



Les observations des enfants se focalisent très rapidement autour de la cire, aucun groupe ne fait référence à l'air.

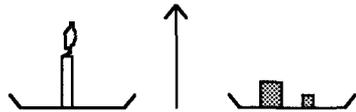


pour tenir compte des préoccupations des enfants, l'enseignant s'écarte de la fiche pédagogique...

Ces réflexions ne permettent pas à l'enseignant de poser directement le problème du rôle de l'air comme le prévoyait la fiche pédagogique qu'il avait sous les yeux. Pour tenir compte de ce qui constitue la préoccupation majeure des enfants, il pose le problème qui va faire l'objet de la discussion, se mettant ainsi en décalage par rapport à son propre projet.

• **Que devient la cire de la bougie pendant la combustion ?**

Pour faire fonctionner les conceptions des enfants nous leur demandons de prévoir individuellement (texte et schéma), le résultat de l'expérience ci-contre.



et se place délibérément en décalage par rapport à son propre projet

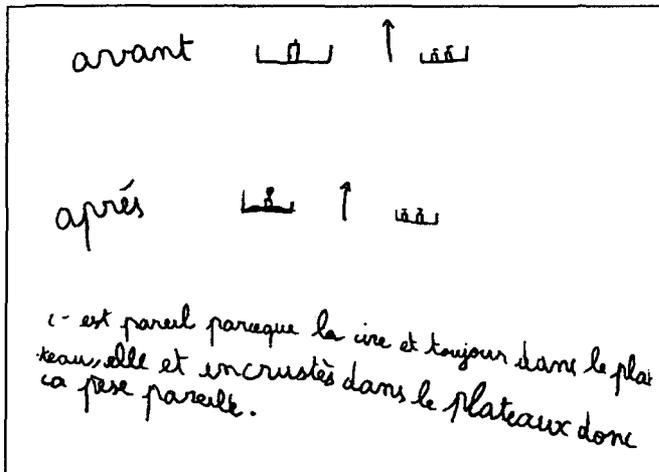
Après avoir réalisé l'équilibre, nous allons allumer la bougie. L'équilibre de la balance sera-t-il conservé ? Pourquoi ?

• **Résultats des prévisions**

l'équilibre est conservé	4 élèves
l'équilibre est détruit :	
le plateau avec la bougie est plus léger	15 élèves
l'équilibre est détruit :	
le plateau avec la bougie est plus lourd	1 élève
réponses non interprétables	3 élèves

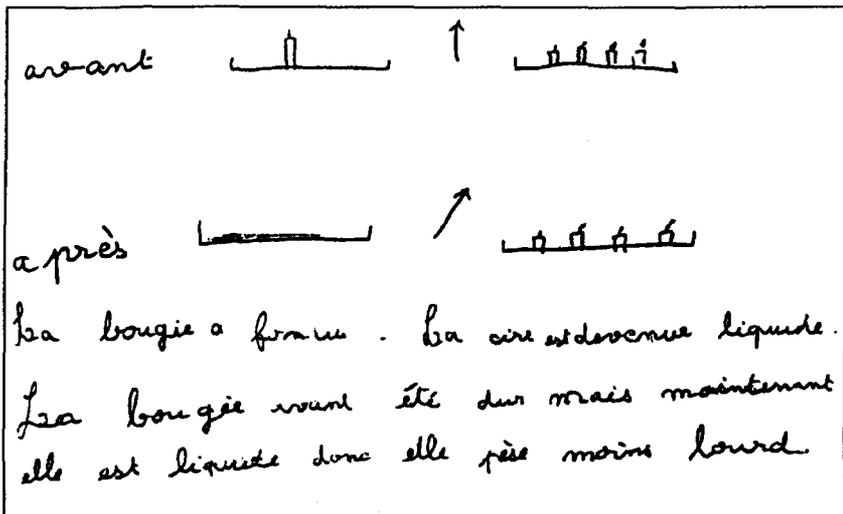
• **Analyse des réponses**

* Si l'équilibre est conservé comme l'écrit Julie "c'est parce que la cire est toujours dans le plateau, elle est incrustée dans le plateau donc ça pèse pareil".



des prévisions qui
révèlent des
conceptions
enfantines
erronées

* Si l'équilibre est détruit (plateau contenant la bougie plus léger), pour Hélène, c'est parce que: "la bougie avant était dure mais maintenant elle est liquide donc elle pèse moins lourd", ou alors comme pour Thomas "la cire quand elle est droite, elle est plus lourde que quand elle est couchée". Pour d'autres la prédiction du déséquilibre n'est pas accompagnée d'une interprétation et nous ne pouvons pas nous prononcer.



* Si l'ensemble est plus lourd c'est parce que "*il y a en plus de la bougie le poids de la flamme*". Cette dernière prévision est le fait d'un seul élève. Elle ne sera pas reprise par les autres enfants. Comme l'expérience contredit cette idée, elle sera très vite abandonnée.

A la suite de ces prévisions l'expérience est réalisée, un débat (que nous présentons et discutons dans la partie 4) s'instaure spontanément dans la classe dans lequel chacun argumente et propose "sa" lecture des faits et l'interprétation qu'il en fait.

3.2. Deuxième phase

l'enseignant revient à son projet initial sur le rôle de l'air

Après ce débat, des élèves ayant fait appel à l'air pour expliquer la disparition de la cire, le maître en profite pour reprendre son objectif initial tel qu'il est formulé dans la fiche pédagogique et pose le problème sous une autre forme, à travers l'expérience qui consiste à couvrir la bougie avec un bocal (phase 2).

• Résultats des prévisions à cette nouvelle expérience

la bougie reste allumée	1 élève
la bougie s'éteint : le manque d'air est invoqué	6 élèves
la bougie s'éteint : la présence de fumée est la cause de cette extinction	9 élèves
la bougie s'éteint pour des causes diverses	6 élèves
réponses non interprétables	2 élèves

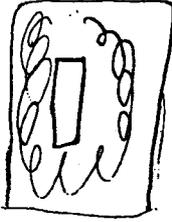
• Analyse des réponses

mais pour les élèves si la bougie s'éteint c'est à cause de la fumée...

* Si pour un élève "*la bougie va s'éteindre parce que la chaleur l'éteint*", pour Claire : "*ça reste allumé parce que ça a resté [garde] au chaud*".

* Pour une partie importante de la classe (9 élèves), c'est la présence de fumée qui est la cause de l'extinction de la bougie(12).

(12) Cette conception erronée, partagée par un nombre significatif d'élèves, semble pouvoir être mise en relation avec la théorie du phlogistique pour laquelle la combustion de la bougie dans le flacon cesse, non par privation d'un élément aérien, mais par excès de phlogistique dans le flacon (voir dans le même numéro d'*Aster* l'article "Le concept de réaction chimique en gestation").



la bougie va
s'éteindre.

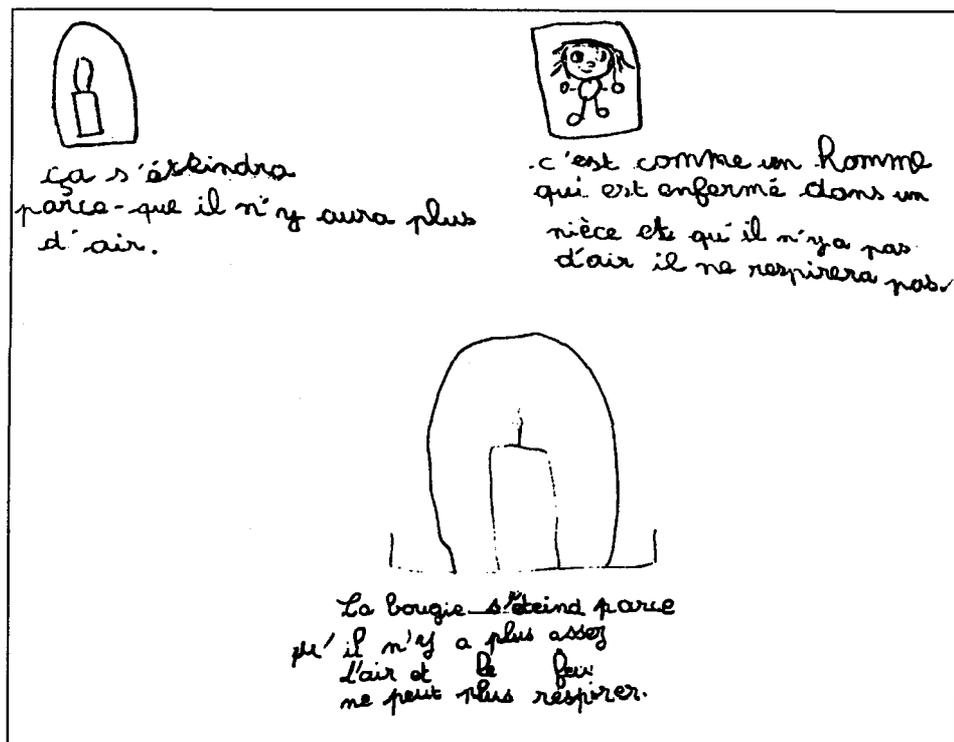
Les va s'éteindre
par que la fumée
va resté dans le
bocal

Pour certains ce lien de causalité est très nettement explicité :

Quand la bougie est allumée
la fumée peut sortir
Mais en mettant le bocal
la fumée ne peut sortir donc
la bougie va s'éteindre.

ou par
"étouffement"
dû au manque
d'air

Si le manque d'air est invoqué c'est toujours en terme
"d'étouffement" : "le feu ne peut plus respirer", "la bougie
s'étouffe" :

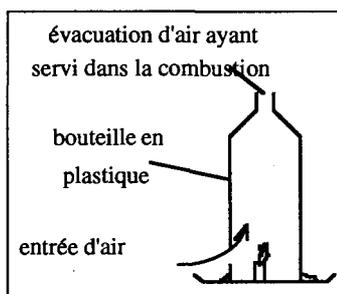


Aucune des prévisions des élèves ne fait référence aux dimensions du bocal.

3.3. Troisième phase

L'objectif de cette troisième phase était de mettre en évidence une circulation d'air autour de la flamme, cette circulation compensant le changement de la composition de l'air au cours de la combustion.

Pour atteindre cet objectif la consigne donnée aux enfants était de trouver une solution pratique pour que la bougie ne s'éteigne plus.



• Résultats des prévisions

faire un trou en haut	14 élèves
faire deux trous (un en haut et un en bas)	1 élève
faire un trou en bas	7 élèves
réponses non interprétables	2 élèves

• **Analyse des réponses**

une réussite
technique

Pour une majorité d'élèves il faut faire un trou en haut pour que la fumée puisse s'échapper. Si cette fumée peut s'échapper la bougie doit rester allumée. Nous remarquons que ces élèves sont ceux qui lors de la phase 2 prévoient l'extinction de la bougie pour cause de fumée dans le bocal. Ils sont restés sur leur position.

Il n'y a que sept élèves qui expliquent que pour que la bougie reste allumée il faut que de l'air "neuf" puisse rentrer dans la bouteille.

Un seul élève prend en compte les deux facteurs simultanément : la fumée doit pouvoir sortir et de l'air entrer dans la bouteille.

A la suite de cette discussion les élèves expérimentent leur solution. En fait ceux qui prévoient de faire un seul trou, constatant l'extinction de la bougie, font très rapidement les deux trous comme le préconisait leur camarade.

Le maître pose la question :

Est-ce que ce qui sort de la bouteille c'est la même chose que ce qui rentre ?

- *"Ah non ! c'est de la fumée qui sort".*

Mais les enfants n'arrivent pas à voir comment caractériser le fait que le gaz qui sort de la bouteille n'est pas de même nature que celui qui y entre. A l'initiative du maître ils approchent une allumette enflammée du trou supérieur. L'allumette s'éteint. La même allumette approchée du trou inférieur reste allumée.

qui ne débouche
pas sur une
élaboration
conceptuelle

Cette expérience, si probante pour le maître, ne permet pas aux enfants de conclure à une consommation d'un constituant de l'air, celui-ci "ressort avec la fumée" et c'est elle qui éteint la flamme.

Le maître pose alors la question : *La fumée qu'est-ce que c'est ?* - *"C'est fait avec de la cire", "c'est du noir", "c'est des poussières", "c'est du feu".*

Au cours de la discussion qui suit, les élèves n'arriveront pas à dépasser cette étape. Aucun élève n'arrivera à concevoir une interprétation dans laquelle la disparition constatée de la cire soit mise en relation avec la modification de l'air entrant dans le flacon.

4. DISCUSSION DE L'EXPÉRIMENTATION

4.1. Le problème de la disparition de la cire

- **Reste-t-il sur le plateau, autant de cire qu'avant la combustion ?**

Pour les quinze élèves, c'est-à-dire la majorité, qui pensent que le plateau contenant la bougie devient plus léger, l'expérience conforte dans un premier temps leurs prévisions.

la conservation
de la cire dans la
combustion :

Parmi ces quinze le problème va se poser pour ceux (8 élèves) qui attribuent ce fait à la diminution de la masse due au passage de l'état solide à l'état liquide. Pour ces élèves nous retrouvons les problèmes causés par les classiques décalages décrits par Piaget (13) dans les conservations entre la substance, le poids et le volume.

une conception
erronée

Lorsque la cire redevient solide dans le plateau, le déséquilibre de la balance est conservé. Ces élèves se trouvent alors, comme les quatre élèves qui ont prédit le maintien de l'équilibre, face à une expérience qui n'est pas conforme à leurs conceptions : la cire pour eux est toujours là, elle est solide, et pourtant le plateau la contenant est plus léger. Leur étonnement s'accompagne d'explications selon lesquelles *"on voit bien que la cire est toujours dans le plateau !"*.

La difficulté pour l'enseignant vient de ce que pour ces élèves l'expérience fonctionne non comme une réfutation de leurs idées mais comme une anomalie qu'il va falloir "absorber".

que l'expérience
ne permet pas
de réfuter

Au cours de la discussion, pour montrer que la quantité de cire se conserve, un élève propose de reconstituer la bougie en récupérant la cire qui a coulé, *"comme ça on verra bien qu'elle est pareille"*.

Cette expérience est réalisée par plusieurs groupes. Ses résultats semblent évidents : la quantité de cire qui coule et qui peut être récupérée est manifestement inférieure à la quantité de cire de départ. Et pourtant l'expérience ne permet pas aux enfants de se mettre d'accord.

Chacun ne voit dans la bougie reconstituée que ce qui conforte son opinion *a priori* (14). Après l'expérience les commentaires de ceux qui pensent que la cire n'est pas consommée sont les mêmes qu'avant : *"on voit bien qu'elle coule sur le papier"*, *"elle tombe de la bougie"*, *"si on la faisait redescendre en hauteur ça serait la même bougie"* etc.

Avec cette attitude résolument substantialiste la cire ne peut pas disparaître, cette éventualité leur paraît tout simplement inconcevable.

Paradoxalement l'argument qui va permettre l'évolution des opinions n'est pas un argument relevant de la rationalité scientifique, c'est un argument "économique" avancé par Jérémie : "mais alors si on peut tout récupérer ça sert à rien d'acheter des bougies neuves !"

(13) Piaget J. (1978) *Le développement des quantités physiques chez l'enfant*. Quatrième édition. Paris : Delachaux Niestlé Spes, p. 30 à 59.

(14) Cet "aveuglement" n'est pas sans rappeler le slogan provocateur de 1968 *"Je ne vois que ce que je crois !"* que le célèbre chimiste Jean Jacques citait pour illustrer l'importance des parti-pris dans les discussions entre chimistes au début du XIX^e siècle. (Colloque Gay-Lussac, Ecole Polytechnique, 11-13 déc. 1978).

un argument non scientifique intervient dans le débat entre les élèves...

et permet une évolution de celui-ci

Là, la classe devient silencieuse, chacun se rendant compte que si on achète des bougies neuves c'est bien parce qu'elles s'usent et que la cire intervient dans ce qui se passe, au moins en partie.

Cette réflexion de Jérémie joue un rôle de détonateur conduisant, autorisant les enfants à changer leur lecture des faits. L'impression que nous avons alors est que les élèves qui étaient des partisans "malgré tout" de la conservation de la cire, sont soulagés de pouvoir abandonner une position qui devenait intenable face aux faits expérimentaux accumulés par leurs camarades (multiples expériences spontanées effectuées par les élèves pour prouver que la bougie que l'on peut refaire est forcément plus petite).

Ce changement d'opinion leur est possible puisque, dans le débat qui les oppose à leurs camarades, l'argument "officiel" qu'ils acceptent pour changer d'avis étant nouveau dans le débat, cela leur permet de sauver la face.

Après ce déclin les explications sur la "disparition" de la cire fleurissent brusquement dans la bouche des mêmes élèves qui l'instant d'avant se disaient convaincus du contraire : des idées du type "*quand on fait brûler une cigarette, après on ne peut pas la reconstituer*", montrent qu'une évolution est en train de se faire chez les enfants. Lors de la combustion de la bougie il s'est produit une transformation qui n'est pas totalement réversible.

• **Que devient la cire qui a disparu ?**

Pour exploiter cette idée de transformation d'un nouveau type, le maître, soucieux de mener à bien son projet concernant le rôle de l'air dans la combustion, insiste :

- *Mais alors qu'est devenue cette cire qui a "disparu" ?*
- *"Elle s'est éparpillée dans la feuille".*
- *"C'est parti dans l'air".*
- *"Elle s'est évaporée parce qu'elle est liquide".*
- *"La cire elle est pas évaporée, elle est faite avec des petits grains que tu peux pas voir, et ils s'en vont avec l'air quand ça brûle".*

la "disparition" de la cire est acceptée par les élèves...

Pour ce dernier élève qui invoque "*des petits grains qui s'en vont avec l'air*", un germe de modèle particulaire semble pouvoir être reconnu dans cette affirmation. C'est une explication correcte de l'évaporation, mais cette idée ne permet pas de faire progresser l'ensemble de la classe car l'air, s'il est évoqué, est considéré comme un gaz inerte. Ce point de vue peut être rapproché de celui exprimé au XVIII^e siècle par les phlogisticiens. De plus cette opinion, trop marginale par rapport au reste de la classe, ne peut pas être reprise ni développée.

Ce qui est exprimé par les enfants c'est l'idée de la disparition de la cire sous l'action de la chaleur. L'idée naît que dans une combustion il y a une transformation différente

d'une simple fusion qui se produit. La flamme accompagne cette transformation. La question se pose de savoir s'il faut considérer qu'il s'agit déjà là, chez ces élèves, d'un premier pas vers la formation du concept de réaction chimique, ou si cette idée traduit simplement une interprétation mécaniste du phénomène (transformation physique de type évaporation).

4.2. Quel est le rôle de l'air dans la combustion ?

Au cours des expériences faites par les élèves lors de la phase 2 (la bougie est coiffée par un bocal en verre) ceux-ci constatent très rapidement que la dimension du bocal, qu'ils n'avaient pas prise en compte dans leurs prévisions, intervient dans la durée de la combustion.

Pour comparer les durées des combustions pour les différents bocaux ils comptent lentement et à voix haute, "en seconde" selon leur expression, et arrivent à la conclusion que "*plus le bocal est grand plus ça dure longtemps*". Cette affirmation est reprise par l'ensemble des élèves qui la considèrent comme naturelle. La taille du bocal est liée à la quantité d'air disponible pour la combustion.

Nous remarquons que les neuf élèves qui pensent que si la bougie s'éteint c'est à cause de la fumée auraient pu interpréter ce fait en disant qu'un bocal plus grand permet de recueillir davantage de fumée. Mais ils ne l'ont pas fait. Nous pouvons penser que leur adhésion au système du phlogistique dont nous avons parlé montre ici ses limites et incite à une certaine prudence lorsque le didacticien est tenté de comparer des conceptions d'élèves avec des conceptions historiques erronées.

Au cours de la discussion (phase 2 et 3 de la fiche pédagogique) le maître est amené à poser le problème du rôle de l'air.

Les enfants qui reconnaissent qu'il faut de l'air pour que la bougie puisse brûler pensent qu'il n'est pas altéré par ce qui se passe dans la flamme. Ceci peut être mis en relation avec l'opinion précédemment exprimée selon laquelle la cire change de forme, voire pour certains élèves change d'état, mais se conserve.

La bougie "*elle a besoin d'air pour brûler*" mais celui-ci n'entre pas en relation avec la cire.

Certains élèves ont déjà vécu, dans leur environnement, des situations où la nécessité de l'air pour permettre une combustion a pu être évoquée (fonctionnement d'une cheminée, d'un chauffe-eau, d'une chaudière). Mais cette "connaissance commune" ne concerne que la nécessité de la présence d'air. Par contre le rôle de cet air n'est pas identifié. Comme le dit un élève "*il ressort avec la fumée*".

Ce qui est remarquable c'est que, même pour les rares élèves qui invoquent le manque d'air, aucun ne le fait intervenir d'une manière active dans le processus de combustion. Il est là pour permettre la combustion mais n'est pas

tandis que la présence d'air est reconnue comme nécessaire

mais le rôle de l'air n'est pas élucidé

reconnu comme un agent intervenant directement dans la combustion de la bougie.

Au cours de la discussion plusieurs élèves font un rapprochement avec la respiration : "c'est comme le système de nous".

Nous retrouvons dans ces conceptions, l'empreinte de l'obstacle animiste, repéré par Bachelard (15) : *Le feu est vivant, il a besoin d'air*.

Il faut d'ailleurs noter que ces conceptions sont conformes au vocabulaire utilisé dans la vie de tous les jours en particulier dans les médias à propos des incendies de forêt : le feu couve, le feu reprend, le feu s'étend, le feu s'étouffe, etc.

Remarque

Au cours de la discussion une élève invoque la taille de la bougie comme devant intervenir dans la durée de la combustion.

Quand le maître demande comment on pourrait faire pour savoir si la taille de la bougie a de l'importance, les élèves proposent des expériences ponctuelles du type une grande bougie dans un grand flacon ou une petite bougie dans un petit flacon. Seule une élève intervient en soutenant qu'il faut prendre une petite bougie et une grande bougie avec deux flacons identiques "parce que sinon ça ne compte pas".(16)

Ces propositions des élèves laissent entrevoir les difficultés qu'ils rencontreraient, dans l'élaboration d'un protocole correspondant à une démarche expérimentale.

CONCLUSION

A l'origine le projet de l'enseignant, tel qu'il apparaît dans la fiche pédagogique, est centré sur le rôle de l'air (phase 2). La fonction que l'enseignant assigne à l'expérience-découverte est de donner aux enfants l'occasion de se confronter à des faits dont l'étude constituera, pour l'ensemble de la classe, le problème à résoudre.

la séquence procède par une série de ruptures...

Nous avons vu comment se manifestait, lors de cette expérience-découverte, le décalage entre le projet de l'enseignant et les préoccupations effectives des élèves. Il faut souligner ici la capacité d'adaptation de l'enseignant qui sentant ce

(15) Bachelard G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.

(16) En fait ce qui interviendrait dans ce cas c'est plutôt le diamètre de la mèche, qui conditionne le débit de la cire liquide. Pour une étude très détaillée de la combustion de la bougie on peut se reporter aux conférences faites par Faraday en 1860 et 1861 au cours des fameuses séances de Noël de la "Royal Institution" pour la jeunesse. Le texte de ces conférences est paru sous le titre "*Histoire d'une chandelle*", à Paris : Bibliothèque d'Éducation et de Récréation. J. Hetzel et cie.

décalage abandonne son projet initial et, pour raccrocher les élèves, formule le problème de la consommation (ou non consommation) de la cire.

auxquelles
l'enseignant
répond en
adaptant son
projet aux
préoccupations
des élèves

L'expérience de la balance que l'enseignant propose ensuite, peut être *a priori* considérée comme cruciale, car pour lui, elle ne peut s'interpréter correctement **que** par la consommation de la cire.

Si la situation ne fonctionne pas comme l'enseignant le prévoyait, c'est parce qu'il y a un **nouveau décalage** entre son projet et les préoccupations des élèves. Pour la plupart il n'y a pas de problème par rapport à la conservation de la cire. Pour eux, celle-ci est toujours là. De même pour l'expérience de la bougie placée sous le pot en verre, l'extinction peut être prévue et interprétée sans faire appel à l'air.

En s'appuyant sur **des conceptions erronées**, (la cire liquide ou étalée est plus légère que la cire solide ou répartie en hauteur, la fumée est la cause de l'extinction) les élèves **font des prévisions correctes** sur le résultat de l'expérience (le plateau contenant la bougie devient plus léger, la bougie s'éteint). Dans ce cas, non seulement l'enseignant qui voulait placer les prévisions des élèves en face d'une contradiction expérimentale en est pour ses frais, mais de par leur caractère opératoire les conceptions des élèves risquent de sortir renforcées de l'expérience (17). Même si par la suite les enfants reconnaissent que la cire ne reste pas liquide et que par conséquent si le plateau la contenant devient plus léger ce n'est pas pour cette raison, il y a là un risque et il faudra impérativement prévoir un dispositif d'apprentissage permettant aux élèves de dépasser cet obstacle. Si tous les didacticiens aujourd'hui reconnaissent que l'enseignement ne peut ignorer les conceptions des élèves, le "déjà là" dont parlait Bachelard et contre lequel les connaissances devront se construire, cet enseignement ne peut se contenter de faire s'exprimer les conceptions en espérant que leur confrontation aux faits en permettra le dépassement. Comme le signalait déjà G. Gohau (18), "*le risque de partir des erreurs premières des enfants c'est d'y rester*".

des difficultés
pour repérer les
paramètres
pertinents

Sur le plan d'une élaboration conceptuelle nous avons déjà dit que nous ne pouvons pas affirmer que les élèves ont pu repérer clairement les attributs caractéristiques du concept de réaction chimique. Les résultats que nous avons pu obtenir confirment sur ce point ceux d'autres travaux que nous avons déjà cités : Marescot (1976), Méheut (1982). En particulier aucun des élèves de la classe n'a noté dans ses observations de la première phase (expérience-découverte) la formation de gouttes d'eau ou le dépôt de noir de carbone (qui sont pourtant toujours présentés dans les manuels sco-

(17) En ce qui concerne les difficultés des élèves dans l'observation du fait expérimental et le rôle du débat scientifique on peut se reporter à l'article "Prévoir et observer le fait expérimental au cours moyen" de A. Laugier et R. Lefèvre (1993). *Aster*, 16, 143 -169.

(18) Gohau G. (1979), in : *Cahiers pédagogiques*, 175.

(qui sont pourtant toujours présentés dans les manuels scolaires comme des observations qui vont de soi, "tombant sous les sens"). Ces faits se situant en dehors de leur cadre de pensée (leur paradigme au sens de Kuhn) ils échappent à leur observation. Comme le souligne Goblot (19), "les données de l'expérience ne sont données qu'autant qu'elles sont saisies".

mais un premier pas conceptuel

Toutefois, nous avons observé, au cours des débats qui suivent les expériences, que les conceptions des élèves telles qu'ils les expriment évoluent. Ils finissent par admettre la consommation d'un des constituants (la cire), et la nécessaire présence d'un second (l'air) même s'ils n'arrivent pas à concevoir un devenir possible pour ces deux constituants. La portée de ce premier pas conceptuel doit être évaluée.

Si l'objectif visé par l'enseignement est la construction d'une connaissance qui passe par une élaboration conceptuelle achevée, c'est en effet difficile pour un enfant de cet âge-là. D'autant plus que comme nous l'avons souligné les structures mentales nécessaires pour analyser correctement les résultats des expériences (décalages dans la maîtrise des conservations comme dans celle du raisonnement hypothético-déductif) sont en cours d'élaboration.

dans une activité qui fait prendre conscience qu'il existe un problème

Mais l'objectif prioritaire à l'école élémentaire n'est pas l'acquisition du concept (nous avons rappelé que le concept de réaction chimique n'est pas au programme de l'école élémentaire). Si nous reprenons la distinction de B.M. Barth (20) en privilégiant la "formation d'un concept" par l'élève, par rapport à l'acquisition d'un concept, il n'est plus nécessaire que l'élève parvienne à la maîtrise de la totalité des attributs du concept de réaction chimique dès l'activité sur la combustion de la bougie. Alors que l'acquisition d'un concept consiste essentiellement à repérer la liste des attributs caractéristiques de ce concept qui est présentée par l'enseignant ; la formation d'un concept est un processus spontané, autonome, qui fonctionne dès le berceau et ce toute la vie. Dans ces conditions cette formation du concept de réaction chimique va se faire très progressivement. Une activité comme celle que nous avons décrite permet aux élèves de prendre conscience qu'il y a un problème de conservation ou non conservation des substances chimiques qui se pose. Cette prise de conscience est une condition indispensable pour un franchissement ultérieur de

(19) Goblot. Traité de logique. Cité par Barth B.M. (1987), in : *L'apprentissage de l'abstraction*. Paris : Retz, p. 89.

(20) Barth B.M. (1987), *ibid* 19.

l'obstacle (21). Les travaux récents de Stavridou et Solomonidou (22) ont justement montré que cette difficulté à prendre conscience de la notion de substance et de son devenir constituait un des premiers obstacles que devaient franchir les élèves dans la construction du concept de réaction chimique.

Enfin ce qui est attendu de l'enseignement scientifique à l'école primaire c'est aussi qu'il permette à l'élève de développer des qualités d'investigation, de s'exercer à communiquer le compte rendu de ce qui a été fait et observé, de confronter ses idées *a priori* avec celles de ses camarades (phases 1 et 2 du travail en classe) pour finalement apprendre à poser un problème. Si la solution du problème passe par la mise au point d'une technique (phase 3) s'appuyant sur une meilleure maîtrise des opérations concrètes, c'est possible, et la réussite valorise l'enfant et son activité de recherche.

et qui s'inscrit
dans la logique
des activités
scientifiques à
l'école

André LAUGIER
IUFM d'Aquitaine
Bordeaux

Maurice PASDELOUP
Chimie physique moléculaire
Histoire et philosophie des Sciences
LEMME - Université Paul Sabatier
Toulouse

(21) Nous avons eu l'occasion de poser la même question (*l'équilibre de la balance est-il conservé ? pourquoi ?*) à des élèves de collège, de lycée et des étudiants de DEUG. Les résultats montrent que les pourcentages d'échec dans les prévisions restent élevés (66% en troisième, 33% en seconde, 21% en première S et 40% en DEUG Sciences). La question qui se pose, pour la réaction chimique comme pour beaucoup d'autres notions, et à laquelle nous n'apportons pas de réponse définitive, est de savoir dans quelle mesure l'enseignement interfère avec les conceptions initiales. Celles-ci sont-elles modifiées en profondeur ou bien simplement masquées ou refoulées temporairement par l'enseignement qui ne parviendrait pas à les intégrer ? Cette question dépasse évidemment la situation de la combustion de la bougie.

(22) Stavridou H., Solomonidou C. (1989) "Physical phenomena-chemical phenomena : do pupils make the distinction ?" *International Journal of Science Education*, 11, (1), 83-92.

D'UNE REPRÉSENTATION À UNE AUTRE POUR MODÉLISER LES TRANSFORMATIONS DE LA MATIÈRE AU COLLÈGE

**Claudine Larcher,
Alain Chomat,
Catherine Lineatte**

Le concept de réaction chimique est un concept fondamental de la chimie et est abordé dès les premières années de l'enseignement secondaire. La recherche présentée ici porte sur modélisation et réactions chimiques. Elle envisage l'articulation entre modélisation, expérimentation et conceptualisation. Les élèves avec lesquels cette recherche a été menée disposent d'un modèle de particules insécables élaboré en classe dans le champ des transformations physiques de la matière. Les nouvelles situations expérimentales qui leur sont proposées ont pour but de leur faire explorer les limites du modèle disponible, de leur faire identifier un nouveau champ conceptuel, celui des réactions chimiques et de leur faire construire un nouveau modèle. L'objet de la recherche est alors de caractériser les différents moments de cette construction en repérant les appuis successifs et les avancées dans le registre du modèle et dans celui des phénomènes.

Le concept de réaction chimique est un concept fondamental de la chimie et est abordé dès les premières années de l'enseignement secondaire.

Des recherches menées en didactique ont permis d'identifier les difficultés que rencontrent les élèves lors de cette conceptualisation et les représentations qu'ils construisent à propos des phénomènes chimiques (Andersson 1986, 1990 ; Méheut 1982, 1985 ; Pfundt 1982 ; Solomonidou, Stavridou, 1989). Récemment dans sa thèse, Stavridou (1990) a étudié le processus dynamique de construction-acquisition du concept de réaction chimique chez les élèves au collège et a mis à jour les facteurs qui interviennent et influencent ce processus dans le cadre de l'enseignement proposé par le programme français. Cette étude met en évidence que le concept de réaction chimique se construit en relation avec celui de substance et celui de changement d'état.

La thèse de Solomonidou (1991) est centrée sur l'acquisition du concept de substance par les élèves de collège. Elle distingue différents stades de conceptualisation : substances définies par leur nom ("c'est du sucre"), substances définies par leur aspect ("c'est un solide blanc") et substances définies par leurs propriétés relationnelles ("il se dissout dans l'eau"). L'évolution du concept de substance apparaît liée à deux faits conjoints : l'élargissement du champ d'investiga-

les concepts de
substance et de
réaction
chimique se
construisent
ensemble

tion à des substances non connues a priori et l'implication des élèves dans un processus expérimental par des tâches de différenciation de substances et d'interprétation d'événements.

L'analyse de manuels français de sixième et cinquième (Lineatte 1991) met en évidence que les expériences proposées donnent lieu à une lecture imposée des expériences en termes de nouveaux corps formés. Cette affirmation et l'identification des corps formés interviennent comme si le concept de corps pur était déjà disponible chez les élèves.

Les manuels proposent par ailleurs un codage des corps purs par leur formule et par des modèles moléculaires (boules/bâtons) avec des activités de traduction nom → formule brute et une modélisation des réactions chimiques en termes de réarrangement d'atomes en s'appuyant sur l'identification des produits formés.

1. PROBLÉMATIQUE

Dans les recherches que nous avons menées précédemment à propos des transformations physiques de la matière (Barboux, Chomat, Larcher, Méheut, 1986 ; Larcher, Chomat, Méheut, 1990 ; Méheut, Larcher, Chomat, 1991) les élèves disposaient d'une description phénoménologique des transformations observées compatible avec celle du physicien. Les activités proposées aux élèves - représentations à l'aide d'un modèle particulaire, discussion de ces représentations - avaient pour objectif de leur faire construire un modèle dont ils puissent contrôler la validité par rapport à une description phénoménologique commune, cette description pouvant être affinée à terme mais pas radicalement remise en cause. La construction du modèle était initiée par une proposition verbale qui servait de "germe" de modèle : **"on peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules insécables, indéformables"** ; le mot particule et les propriétés afférentes à ces particules prenaient progressivement du sens pour les élèves à travers les représentations de la matière qu'ils produisaient et qu'ils discutaient. Des exemples de représentations produites par les élèves sont donnés sur les figures 1 (corps pur liquide et solide) et 2 (mélange de deux liquides) .

La recherche était alors centrée sur les activités de modélisation, leurs caractéristiques, leur faisabilité.

donner du sens
au terme
particule

Figure 1

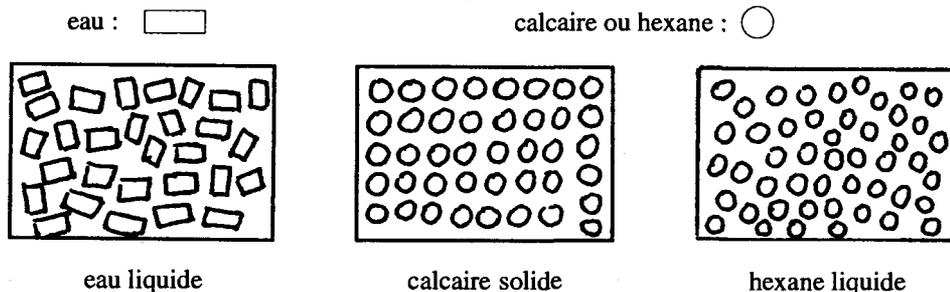
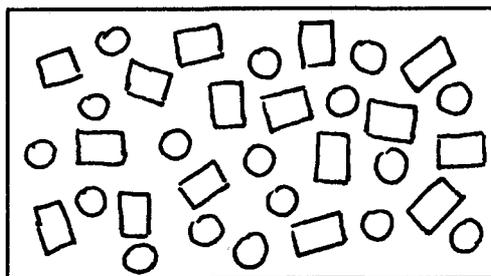


Figure 2



mélange (eau - hexane) liquide

La recherche menée sur modélisation et réactions chimiques, si elle tient compte des acquis précédents sur la modélisation, envisage cette fois l'articulation entre modélisation, expérimentation et conceptualisation. En effet, dans le nouveau champ empirique envisagé, les élèves ne disposent pas d'une phénoménologie compatible avec la phénoménologie savante ; les expériences proposées ne sont pas lues en termes de changement de corps purs mais plutôt en termes de mélanges ou de changement d'état, dans la mesure où le concept de corps pur (substance définie par des propriétés intrinsèques et relationnelles permanentes) n'est pas lui-même construit. Notre étude porte alors sur la modélisation en tant qu'outil pour interroger les phénomènes observés.

Les élèves avec lesquels cette recherche a été menée disposent d'un modèle de particules insécables élaboré en classe dans le champ des transformations physiques de la matière. Ils ont pratiqué des activités de modélisation (représentations particulières, établissement de relations sémantiques entre les propriétés des particules et les propriétés de la matière, discussion des représentations) pour construire ce modèle à partir d'un axiome imposé de particules insécables.

construire une
nouvelle
phénoménologie

Les nouvelles situations expérimentales qui leur sont proposées ont pour but de leur faire explorer les limites du modèle disponible, de leur faire identifier un nouveau champ conceptuel, celui des réactions chimiques où le concept de corps pur est central, et de leur faire construire un nouveau modèle.

L'objet de la recherche est alors de caractériser les différents moments de cette construction en repérant les appuis successifs et les avancées dans le registre du modèle et dans le registre des phénomènes.

Il ne s'agit pas bien sûr de tout faire réinventer spontanément par les élèves, mais plutôt de voir comment peut fonctionner cette démarche dans un environnement favorable. Des tâches sont proposées aux élèves afin de les guider dans cette construction. C'est donc dans le cadre d'un ensemble d'expériences, d'un ensemble de tâches, et en explicitant les guidages que nous analyserons les productions des élèves.

expériences et
tâches
constituent un
guidage

En ce qui concerne l'expérimentation, nous chercherons à cerner la lecture que font les élèves des expériences proposées, à identifier les critères qu'ils utilisent pour comparer les substances.

En ce qui concerne la modélisation, nous nous intéresserons à l'exploration des limites du modèle : à partir de quand le modèle dont ils disposent est-il jugé non pertinent par les élèves ? proposent-ils de le faire évoluer ? quelles modifications proposent-ils ? quelles aides peut-on leur apporter ?

Nous étudierons aussi la façon dont les élèves se servent du codage des substances pour cerner leur identité et les relations entre les codages proposés et l'interprétation des expériences.

2. MÉTHODOLOGIE

Nous avons réalisé deux séries d'entretiens. Les premiers entretiens ont concerné deux groupes de deux élèves de cinquième ; la deuxième série a été conduite avec un groupe de quatre élèves d'une classe de sixième cinquième en trois ans c'est-à-dire d'élèves considérés comme ayant des difficultés d'apprentissage. Ces entretiens se sont étalés sur six séances de une heure à raison de une ou deux séances par semaine en salle de travaux pratiques, les élèves réalisant eux-mêmes les manipulations. Les exemples présentés ici sont extraits de la première série d'entretiens.

des entretiens en
situation de
manipulations
par les élèves

Dans les deux cas, un observateur accompagne l'interviewer et les séances sont enregistrées au magnétophone. Les fiches proposées aux élèves (voir en annexe) permettent aussi un recueil écrit d'informations.

L'interviewer présente le matériel et les fiches décrivant les manipulations ; il organise l'utilisation des différentes

fiches ; il anime les discussions entre les élèves ; il fait comparer les observations, les schémas, les interprétations des élèves à différents moments de l'entretien.

3. LES EXPÉRIENCES ET LES TÂCHES PROPOSÉES AUX ÉLÈVES

3.1. Choix des expériences proposées

Les expériences proposées par l'interviewer et réalisées par les élèves ainsi que les observations possibles pour chaque expérience sont rassemblées dans le tableau I.

Nous avons proposé des expériences où il ne se passe rien (du point de vue du chimiste !), des expériences où il y a "mélange" et des expériences où il y a "réaction chimique". Certaines de ces réactions chimiques peuvent être étiquetées "dissolutions" ; nous les considérerons comme des réactions chimiques car leur modélisation peut se faire en termes de particules qui se coupent.

Nous avons utilisé des expériences pour lesquelles des indices perceptifs (couleur, odeur) étaient disponibles mais en évitant les réactions "spectaculaires" de façon à ce que l'attention de l'élève puisse se centrer sur les substances et non sur la flamme utilisée, la chaleur ou la lumière produites (de Vos, Vendronk 1985).

Nous avons choisi de faire intervenir l'eau dans chacune des expériences, seule substance "connue" des élèves c'est-à-dire identifiée par son nom et dont ils connaissent quelques propriétés (changements d'état) ; cependant ce qui arrive à l'eau en tant que substance varie d'une expérience à l'autre puisqu'elle est soit conservée (expériences 1 à 5 et 8) soit transformée pour donner lieu à la formation d'autres substances (expériences 6 et 7).

Dans le registre du modèle, les expériences où "il se passe quelque chose" peuvent être interprétées suivant les cas en termes de modification de la répartition des particules, de coupure d'un seul type de particules ou de coupure des deux types de particules représentant les réactifs, de réarrangements des morceaux.

Enfin ces expériences ont été choisies de telle sorte qu'elles se prêtent à des investigations ultérieures par les élèves (isoler le ou les produits formés, effectuer des comparaisons, pratiquer des tests de reconnaissance) et qu'elles permettent de percevoir l'incompatibilité entre un modèle de particules insécables et les observations que peuvent faire les élèves. C'est le cas de l'expérience 8 : lors du mélange de la solution de nitrate d'argent incolore et de la solution de chlorure de cuivre bleue, il y a formation d'un précipité blanc mais persistance de la couleur bleue du liquide surnageant.

des expériences
pour questionner
le modèle

Certains réactifs ont été remplacés par d'autres après la première série d'entretiens ; il s'agit d'aménagements qui ne modifient pas le rôle de l'ensemble des expériences.

- Le remplacement du calcaire par du cuivre a deux causes :
 - . la connaissance de l'existence "d'eau calcaire" par les élèves ; cette dissolution non perceptible, contraire à leurs observations, pouvait les rendre méfiants pour toute observation ultérieure ; cette connaissance pouvait aussi perturber l'observation ;
 - . la différenciation possible entre la particule de cuivre et la particule résultant de la dissociation du chlorure de cuivre dans l'eau.
- Le remplacement du nitrate d'argent par le nitrate de plomb a eu pour objectif d'éviter l'évolution dans le temps du produit formé (noircissement du chlorure d'argent d'une séance à l'autre). L'inconvénient est que le nitrate de plomb est peu soluble et que les quantités de nitrate de plomb à manipuler dans l'expérience 5 sont imposées si on veut éviter la saturation.

un modèle aux
ambitions limitées

Notons que les coupures de particules et les réarrangements proposés par les élèves ne sauraient prendre en compte la diversité des valences des éléments considérés ; les ambitions concernant la modélisation des réactions chimiques mises en jeu sont limitées à la coupure de particules et au réarrangement des morceaux sans qu'aucune règle sinon celle de conservation des morceaux soit visée.

Tableau I

Expérience	Observation au début	Observation à la fin
1 eau + calcaire	liquide incolore solide blanc	liquide incolore solide blanc
2 eau + alcool	liquide incolore inodore liquide incolore odorant	liquide incolore odorant
3 eau + hexane	liquide incolore inodore liquide incolore odorant	deux liquides incolores odeur
4 eau + chlorure de cuivre	liquide incolore solide blanc	liquide bleu
5 eau + nitrate d'argent	liquide incolore solide blanc	liquide incolore
6 eau + calcium	liquide incolore solide blanc gris	solide blanc gaz qui "aboie"
7 eau + carbure de calcium	liquide incolore solide gris	solide blanc gaz malodorant
8 solution de chlorure de cuivre + solution de nitrate d'argent	liquide bleu liquide incolore	liquide bleu solide blanc

3.2. Les tâches proposées aux élèves

Les produits chimiques placés dans des flacons sont étiquetés par leur nom et non pas par leur formule. Pour les présenter aux élèves l'interviewer affirme : *"ce flacon ne contient que de l'alcool, ce flacon ne contient que du chlorure de cuivre"*.

Une première description de chaque substance est demandée aux élèves qui reportent leurs observations sur une fiche de type I "fiche d'identité des substances" (voir annexe).

Les élèves sont ensuite invités à effectuer chacune des expériences 1 à 7, à reporter leurs observations sur des fiches de type E "expériences" (voir annexe), à classer les expériences en explicitant leurs critères de classement et à compléter éventuellement les fiches I.

Pour effectuer ces expériences, les élèves disposent de fiches informatives présentées en annexe :

- les fiches de type A (voir annexe) précisent les produits utilisés, le matériel et le protocole de l'expérience ;
- les fiches B et C (voir annexe) présentent le matériel disponible et indiquent quelques recommandations.

Après avoir effectué les manipulations et proposé un classement, les élèves ont pour tâche de représenter, à l'aide du modèle particulière qui leur est rappelé, les substances présentes dans les flacons au début et à la fin de chaque expérience. Une fiche de type R (voir annexe) permet de recueillir leurs propositions.

Après essais et discussions sur les représentations proposées, une nouvelle expérience (8) leur est proposée pour laquelle ils disposent également d'une fiche de type E et d'une fiche de type R. C'est à partir de cet ensemble d'expériences et de tâches que les élèves sont amenés à réfléchir sur la nature des substances présentes dans chaque flacon à la fin des expériences, sur la représentation particulière qu'on peut en faire et sur les phénomènes observés .

Lors de cette réflexion, les élèves peuvent proposer d'autres expériences pour "enquêter" sur les substances, ce qui leur permet d'enrichir les fiches I et E et de modifier les fiches R. La fiche D (voir annexe) qui leur indique comment recueillir un gaz et effectuer un test de reconnaissance leur est fournie en temps utile.

En demandant aux élèves de représenter à l'aide du modèle particulière dont ils disposent les substances présentes au début et à la fin de l'expérience, on les incite à s'interroger sur ces substances : sont-ce les mêmes, sont-elles différentes, quels critères pour en juger ?

Cette tâche est aussi une exploration de la validité du modèle : si les substances sont différentes, le modèle est-il utilisable donc pertinent ? comment peut-on rendre compatibles l'ensemble des informations et la modélisation ?

des fiches pour
pouvoir
comparer des
propositions

observer,
interpréter,
modéliser

4. ANALYSE DES PRODUCTIONS DES ÉLÈVES

4.1. Observation et interprétation initiale des expériences 1 à 7

Les observations portées sur les fiches E au cours de la première séance permettent aux élèves de reconnaître les différents flacons au début de la séance suivante. Un problème se pose pour la reconnaissance du flacon contenant eau + nitrate d'argent, le contenu ayant noirci au cours du temps ; ce flacon est identifié par élimination. La fiche descriptive de l'expérience est complétée par les élèves pour tenir compte de cette nouvelle observation. Notons que le gaz (dihydrogène) qui s'échappe lors de l'expérience 6 est déclaré odorant.

Les élèves ne lisent pas les expériences comme la formation de corps nouveaux mais envisagent une transformation physique des corps initialement présents : *"l'eau est devenue gaz"*, *"le gaz, c'est l'évaporation de l'eau avec l'odeur du carbure de calcium"*, le carbure de calcium ayant d'après leurs observations une odeur semblable à celle du gaz obtenu dans l'expérience eau + carbure de calcium. Les élèves utilisent leur description des expériences pour compléter la partie "propriétés" des fiches I en utilisant le terme *"se dissout"* pour le chlorure de cuivre et le nitrate d'argent et le terme *"se mélange"* pour l'alcool et l'hexane. En ce qui concerne le calcium et le carbure de calcium, les descriptions proposées par les élèves ne sont pas en termes scientifiques ; le calcium *"laisse s'échapper de la fumée"*, le carbure de calcium *"fait frémir l'eau"* ou bien des termes scientifiques impropres *"l'eau et le calcaire se combustionnent"*. Un autre phénomène, la fermentation, est aussi évoqué pour interpréter le noircissement de eau + nitrate d'argent au cours du temps.

Les interprétations proposées par les élèves font apparaître l'absence de stabilité des propriétés des corps *"le carbure de calcium est devenu blanc"*, *"l'eau est devenue blanche"* en contradiction avec la description des corps reportée sur les fiches I.

4.2. Comparaison des expériences, classement

Le premier regroupement qui se fait est eau + calcium avec eau + carbure de calcium : *"ça a fait à peu près le même résultat"*. Pour les autres expériences, la couleur est d'abord le seul critère pris en compte ce qui conduit à regrouper les expériences eau + hexane avec eau + alcool, seuls cas où les liquides restent complètement incolores et limpides. Après discussion entre eux, les élèves remplacent l'expérience eau + alcool par l'expérience eau + calcaire en avançant l'argument *"ils ne se sont pas mélangés à l'eau"*. La discussion porte ensuite sur le regroupement de eau + alcool, eau + chlorure cuivrique et eau + nitrate d'argent ; deux points de

réactions
chimiques ?
quel est le
vocabulaire
utilisé par les
élèves ?

critères de classement

vue apparaissent : regrouper ceux qui donnent lieu à une modification de couleur (expériences 4 et 5) ou prendre en compte la façon dont on obtient le résultat final (agiter et attendre le changement de couleur ou résultat immédiat sans agitation). Ces deux critères conduisent au même classement : eau + alcool tout seul et eau + chlorure de cuivre avec eau + nitrate d'argent.

Les 7 expériences sont ainsi réparties en 4 groupes par les élèves :

mélange immédiat sans changement de couleur exp 2	mélange après agitation avec changement de couleur exp 4 et 5	pas de mélange exp 1 et 3	autre résultat exp 6 et 7
--	--	------------------------------	------------------------------

4.3. Codage des substance et interprétation d'expériences

Les élèves utilisent le modèle particulière qu'ils connaissent pour représenter des solides, des liquides, des gaz, en utilisant un seul type de symbole par corps et des distances plus ou moins grandes entre particules. La représentation des expériences 1 et 3 est conforme à leur classement en "non mélange" (fig 1). L'expérience 2 est représentée en termes de particules dispersées les unes parmi les autres (fig 2). Pour les expériences 4 et 5 deux types de représentations apparaissent : soit des particules dispersées comme dans le mélange eau + alcool, soit des particules représentées par des symboles emboîtés les uns dans les autres surmontées d'un ensemble de particules d'eau (fig 3), en relation avec une observation "il y a une couleur blanche au fond". Le choix du codage en symboles emboîtés pour représenter "le mélange au fond" du récipient est argumenté par "les deux c'est plus lourd qu'un carré tout seul". Ainsi, le symbole n'est plus seulement un moyen de discerner différentes substances mais traduit les propriétés de matériaux différents pas encore identifiés comme des substances différentes.

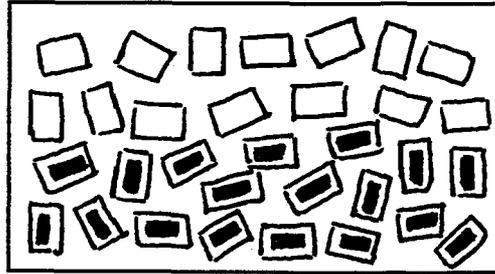
les symboles emboîtés

Les carrés représentant les particules d'eau au dessus des particules représentées par des symboles emboîtés sont par ailleurs dessinés plus petits que ceux utilisés pour représenter l'eau pure avant l'addition de chlorure de cuivre "parce qu'il y a moins d'eau".

Notons que ce codage est hors des règles du jeu du modèle précédemment construit et qu'il n'a pas été proposé pour représenter le mélange eau+ alcool.

Figure 3

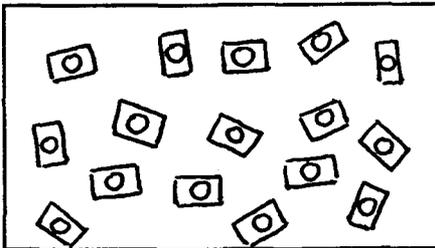
eau :  nitrate d'argent : 



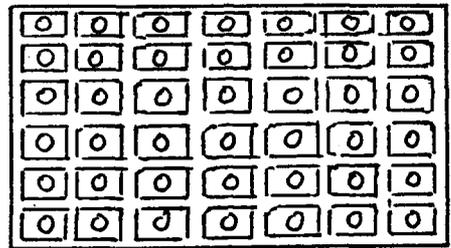
En ce qui concerne les expériences 6 et 7 pour lesquelles il n'y a plus de liquide à la fin, les représentations du gaz et du solide se font avec des symboles emboîtés. La discussion porte alors sur la représentation du gaz identifié comme "de l'eau vapeur qui porte l'odeur du calcium (ou du carbure de calcium)". Une première représentation produite consiste à utiliser le symbole des particules de calcium emboîté dans celui des particules d'eau (fig 4).

Figure 4

eau :  calcium : 



gaz

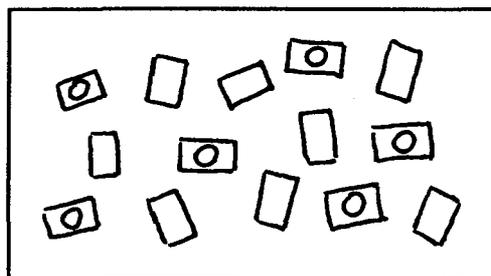


solide

Cette représentation est ensuite refusée en s'appuyant sur le fait que l'eau est inodore. La représentation du gaz évolue alors vers un mélange de particules d'eau et de particules emboîtées qui représentent "le gaz de l'odeur" (fig 5).

Figure 5

eau :  calcium : 



gaz

Le symbole  est ensuite remplacé par  car l'odeur - perçue comme celle du calcium - apparaît comme une information primordiale mais le fait qu'elle soit "obtenue avec l'eau" doit aussi être codifié. Ainsi, l'enveloppe extérieure du symbole semble porteuse de l'information principale (l'odeur), l'information secondaire (obtenue avec l'eau) étant codée par le symbole de l'eau emboîté dans celui du calcium. Ce codage de l'information dominante par l'extérieur du symbole apparaît également dans la représentation du solide obtenu dans l'expérience 6 : le symbole choisi est  plutôt que  car "il ne reste plus d'eau" et "le calcium a absorbé l'eau". Les élèves codent alors de la même manière le gaz et le solide, la différenciation se faisant par les distances entre particules. Cette représentation d'un gaz et d'un solide par le même symbole est cependant remise en cause à propos de la représentation du solide et du gaz obtenus dans l'expérience 7 ; mais l'argument en faveur d'un même type de symbole est que "l'eau et la glace c'est toujours de l'eau". Les conditions de stabilité d'un état physique d'une substance ne sont pas ici prises en compte, deux états d'une même substance semblent pouvoir coexister. Il n'y a pas encore à ce moment reconnaissance explicite d'une substance nouvelle malgré l'introduction d'un symbole nouveau. Il s'agit plutôt d'un mélange intime, d'un "mixte" (Duheim, 1985).

règles de
constitution des
symboles

4.4. Exploration des limites du modèle

C'est dans la représentation de l'expérience 8 (addition des solutions de chlorure de cuivre et de nitrate d'argent) que les élèves perçoivent les limites du modèle de particules insécables. Après discussion, la représentation du solide obtenu se fait par des symboles doublement emboîtés c'est-à-dire , le liquide étant représenté soit avec des symboles  utilisés pour représenter la solution de chlorure

expérience
cruciale ?

de cuivre, soit par une mélange de ces symboles avec ceux utilisés pour représenter la solution de nitrate d'argent  La représentation du solide par  ou par  a été rejetée car "le solide formé n'est pas soluble".

Interrogés sur la signification des symboles emboîtés, ils les reconnaissent comme caractéristiques d'un corps qui a d'autres propriétés que celles des corps à partir desquels ils sont formés. Mais les avis divergent pour savoir s'il s'agit d'un corps pur ; l'avis "c'est un corps pur" n'est pas argumenté alors que l'avis contraire s'appuie sur le fait que "c'est l'aboutissement du mélange de plusieurs produits".

Lorsque l'interviewer leur demande de prévoir ce qui va se passer si on ajoute beaucoup de nitrate d'argent et les incite à tenir compte de la conservation des particules de chaque substance initiale, ils prévoient la formation de plus de solide et un éclaircissement de la solution bleue ou même la disparition de cette couleur : "si on ajoute du nitrate d'argent il va prendre des particules d'eau plus des particules de chlorure cuivrique et il va descendre au fond et il va devenir solide, il n'y aura plus de couleur". Étant donné le modèle dont ils disposent à ce moment, nous pouvons avancer que cette prévision s'appuie sur une association de deux types de particules de chacun des corps de départ pour former le solide blanc, donc un épuisement progressif des particules de chlorure de cuivre considérées comme responsables de la couleur bleue.

proposition de
nouvelles
investigations

En réalisant l'expérience ils constatent l'augmentation de la quantité de solide mais la permanence de la couleur bleue, ce qui est en contradiction avec leurs prévisions. Ils sont donc conduits à chercher d'autres explications et représentations et à vérifier leur validité.

Ils récapitulent alors les autres possibilités qu'ils ont envisagées et rejetées :

- "si le liquide est représenté par des symboles  (solution de nitrate d'argent), on n'explique pas la couleur bleu observée" ;
- "si le solide est représenté par des symboles  (nitrate d'argent) il devrait être soluble ce qui n'est pas le cas" ;
- le solide "ce n'est pas non plus le chlorure cuivrique parce que le chlorure cuivrique aussi se dissout".

Ils constatent ainsi l'incompatibilité entre leur système de représentation et les observations : le solide ne peut être représenté ni par  ni par  ni par .

4.5. Codage et noms des substances, évolution de la notion de substance

Un guidage vers la représentation d'un corps par des particules constituées de plusieurs morceaux en utilisant les noms des substances a été envisagé.

En fait, les élèves interprètent les noms composés donnés aux substances comme indiquant leur provenance ; ainsi le

chlorure de cuivre serait une partie du cuivre, le chlorure de sodium une partie du sodium, et ils proposent de les représenter par \square et $\square X$, le rectangle indiquant qu'« il y a chlorure en commun ». De même le carbure de calcium serait un corps extrait du calcium qui donc ne serait pas un corps pur. La définition du corps pur utilisée est ici basée sur l'impossibilité de séparation, ce qui correspond, dans cette logique d'interprétation des noms, à une non différenciation entre corps pur et corps simple.

L'affirmation par l'interviewer que le calcium qui leur a été présenté dans le flacon est un corps pur, les conduit à réviser la signification du codage en symboles emboîtés qu'ils avaient proposés. Le calcium étant représenté par \bullet , le carbure de calcium est alors représenté par $\triangle \bullet$, ce qui constitue une évolution par rapport au codage des chlorures qu'ils avaient proposés : ils avaient distingué les différents chlorures, maintenant ils spécifient la provenance du carbure.

Le carbure de calcium ayant été présenté comme un corps pur et accepté en tant que tel, la représentation par des symboles emboîtés devient pour les élèves un mode de représentation possible des corps considérés comme corps pur.

La proposition de l'interviewer d'un codage par des symboles accolés plutôt qu'emboîtés est ensuite acceptée par les élèves qui jugent cette représentation satisfaisante, en particulier dans les cas où « on ne sait pas quelle particule est en majorité ». Cela évite en effet les problèmes de choix entre A dans B ou B dans A qui avaient suscité des discussions lorsque le critère de caractéristique dominante qu'ils se sont donné ne fonctionnait pas. Cependant une proposition de dessiner les symboles l'un au dessus de l'autre plutôt que l'un à côté de l'autre laisse penser que le codage reste pour les élèves porteur de plus d'informations que la seule identité des substances.

4.6. Évolution du modèle

La proposition par l'interviewer d'un codage par des symboles accolés est alors utilisée pour un nouvel essai de représentation de l'expérience 8.

Invités à explorer les possibilités de ce nouveau type de codage, les élèves proposent des représentations faisant apparaître des séparations des symboles accolés. Ils utilisent ensuite cette représentation pour interpréter l'expérience en termes de formation de particules différentes constituées des morceaux des particules de chlorure de cuivre et de nitrate d'argent. Ainsi l'analyse des possibilités du codage se répercute sur le modèle ; le fait de dissocier les symboles est traduit par les élèves comme une possibilité de couper les particules. Mais cette idée est controversée car contraire à la propriété d'inséparabilité des particules utilisée

jouer avec les
noms des corps

des symboles
emboîtés aux
symboles accolés

des symboles
accolés à un
modèle de
particules
sécables

jusque-là. L'interviewer les questionne alors sur la façon dont a été construit le premier modèle. Les élèves ont bien conscience de leur participation dans cette construction d'un modèle et de son rôle d'outil pour représenter les phénomènes. Jugeant que les phénomènes étudiés sont différents de ceux étudiés précédemment en classe, ils acceptent l'idée de sécabilité des particules et cherchent à l'utiliser pour représenter l'expérience 8, compte tenu de la persistance de la couleur bleue de la solution lors d'un ajout de nitrate d'argent.

Ils font référence à l'absence de couleur bleue d'une solution de chlorure de sodium (propriété connue du sel de cuisine), pour attribuer la couleur bleue au "cuivre" du chlorure de cuivre. Ils écrivent les différentes possibilités de coupure et de recombinaison et éliminent celles qui ne correspondent pas aux observations.

4.7. Réinterprétation des expériences 6 et 7

C'est tout d'abord l'expérience 7 qui est questionnée. Les élèves avaient précédemment choisi un même codage de symboles emboîtés pour représenter les particules du gaz et du solide formés. Ces symboles emboîtés sont maintenant lus comme représentatifs d'une même substance qui serait présente à la fois sous forme gazeuse et sous forme solide.

Invités à réfléchir sur ce qui différencie l'eau vapeur, de l'eau liquide, les élèves indiquent une différence de volume, de masse, mais aussi le fait que le gaz est obtenu en chauffant le liquide et le liquide en refroidissant le gaz. Ils proposent alors de voir si ces transformations peuvent se faire pour les corps obtenus dans l'expérience 7. Leur choix s'oriente vers le chauffage du solide qui devrait se transformer en un gaz identifiable par son odeur. L'expérience est réalisée sans qu'ils observent de gaz ; les élèves concluent qu'il ne s'agit pas du même corps dans deux états différents. Ils utilisent alors le modèle de particules constituées de plusieurs morceaux et proposent de représenter le carbure de calcium par , l'eau par  ; différentes combinaisons sont proposées pour représenter le solide et le gaz considérés comme des substances différentes :

solide : {  puis {  ou { 
gaz : {  puis {  ou { 

Notons que pour la première fois, les élèves ne dessinent plus une assemblée de particules plus ou moins distantes les unes des autres, mais une seule particule par substance en indiquant éventuellement gaz ou solide par écrit. Peut-être peut-on considérer cette évolution comme caractéristique de la modification de la perception des problèmes posés, des phénomènes étudiés ; il s'agit en effet de phénomènes qui ne sont plus interprétables en terme de modification de répartition de particules (ce qui était le cas pour les

quand dessiner
une seule
particule pour
chaque
substance
devient suffisant
pour représenter
le phénomène

transformations physiques) mais de phénomènes mettant en jeu la nature même des particules indépendamment de leur nombre .

C'est ensuite la représentation de l'expérience 6 (calcium + eau) qui est envisagée. Le gaz et le solide sont reconnus comme des substances différentes. Mais cette fois les noms des substances n'incitent pas les élèves à considérer les particules comme constituées de plusieurs morceaux et, ayant renoncé aux symboles emboîtés, ils ne voient pas comment coder différemment le gaz et le solide formés. L'interviewer leur ayant indiqué que l'eau peut être considérée comme constituée de particules formées de deux morceaux, les élèves proposent différentes combinaisons :

solide : $\left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \circ \bullet \\ \bullet \circ \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \circ \bullet \\ \bullet \circ \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \circ \bullet \\ \bullet \circ \end{array} \right\}$
 gaz : $\left\{ \begin{array}{l} \bullet \bullet \\ \bullet \bullet \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \square \bullet \\ \bullet \square \end{array} \right\}$
 en représentant l'eau par $\square \circ$ et le calcium par \bullet

Ils s'interrogent ensuite sur la possibilité de couper les particules d'eau pour représenter l'expérience 6. Les combinaisons de morceaux de particules qu'ils proposent, font apparaître des possibilités de symboles identiques pour représenter les solides et les gaz dans les expériences 6 et 7. L'interviewer propose alors aux élèves de comparer les solides et les gaz obtenus dans les deux expériences. Les gaz sont reconnus comme différents car ils n'ont pas la même odeur (il s'agit du dihydrogène et de l'acétylène) ; les solides sont considérés comme différents car l'un est perçu comme "plus blanc" que l'autre (il s'agit pourtant du même corps, l'hydroxyde de calcium). L'interviewer propose de recueillir chaque solide, de lui ajouter de l'eau et de souffler dans la solution obtenue ; la solution se trouble dans les deux cas. Les élèves concèdent alors qu'ils s'agit peut-être du même corps mais qu'il faudrait faire plusieurs tests donnant tous le même résultat pour pouvoir l'affirmer. La différence d'aspect est attribuée au fait que les quantités de produits mélangés initialement ne sont pas les mêmes.

identifier des substances grâce à leurs propriétés

CONCLUSION

Des réactions parasites ne nous ont pas permis d'exploiter les expériences choisies comme nous l'avions prévu ; en particulier, la formation d'un même corps dans les expériences 6 et 7 n'a pu être reconnue. On peut remarquer aussi les difficultés survenues du fait de l'odeur perçue pour le calcium et pour le carbure de calcium.

Les symboles utilisés sont pour les élèves porteurs d'informations diverses ; des symboles emboîtés sont censés correspondre à des corps plus denses, l'extérieur d'un symbole emboîté code la caractéristique jugée primordiale du corps.

Les nouveaux symboles proposés par les élèves ne sont pas caractéristiques de nouvelles substances mais de mélanges intimes ayant quand même suffisamment de propriétés intrinsèques pour mériter une représentation particulière, différente de celle d'un mélange en termes de particules dispersées. Ce n'est qu'après une discussion sur les noms des corps et la représentation de corps composés que ces symboles sont considérés comme représentatifs de substances nouvelles.

Après distinction entre substance et "mélange intime" les élèves ont pu discuter la comparaison entre plusieurs substances et distinguer les changements d'état des transformations chimiques.

Les élèves ont pu percevoir la limite du modèle de particules insécables à partir de la représentation de l'expérience 8 et des prévisions qu'ils faisaient pour un ajout de nitrate d'argent. Notons qu'il a fallu pour cela rappeler la conservation des particules qu'ils n'avaient pas mobilisée spontanément.

La proposition de changement de modèle a été d'abord refusée puis jugée satisfaisante principalement sur un critère d'utilité (Strike & Posner, 1985) et les élèves ont vite perçu la diversité des possibilités de recombinaison.

Ces possibilités de recombinaison ne sont pas restées pour eux un exercice de combinatoire, mais elles ont été soumises à une discussion de validité en regard des observations. Certaines combinaisons ont été rejetées comme incompatibles avec l'observation. Cependant aucune règle d'association n'est encore disponible.

Enfin c'est à partir d'un travail sur la symbolisation, articulé avec une étude des propriétés des corps, que la conceptualisation des substances a pu évoluer et qu'un modèle de particules sécables a pu être construit en référence aux observations expérimentales.

Claudine LARCHER
LIREST/INRP

Alain CHOMAT
Collège A. Fournier, Clamart
LIREST/INRP

Catherine LINEATTE
LIREST

BIBLIOGRAPHIE

ANDERSSON B., (1990), "Pupils' conceptions of matter and its transformations", *Studies in Science Education* Vol. 18.

ANDERSSON B., (1986), "Pupils' explanations of some aspects of chemical reactions", *Science Education* 70, 549-563.

BARBOUX M., CHOMAT A., LARCHER C., MÉHEUT M., (1986), *Structure de la matière, modèles particulières*, Rapport de fin de recherche INRP LIREST, document multigraphié.

CHOMAT A., LARCHER C., MÉHEUT M., (1992), "Modèle particulière et démarches de modélisation" in *Enseignement et apprentissage de la modélisation* (119-169), Paris, INRP.

DE VOS W., VENDRONK A., (1985), "A new road to reactions 1", *Journal of chemical Education* 62 (3) 238-240.

DE VOS W., VENDRONK A., (1985), "A new road to reactions 2", *Journal of chemical Education* 62 (8) 648-649.

DUHEIM P., (1985), *Le mixte et la combinaison chimique ; essai sur l'évolution d'une idée*. Paris, Fayard.

LARCHER C., CHOMAT A., MÉHEUT M., (1990), "À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états", *Revue Française de Pédagogie* 93, 51-61.

LINEATTE C., (1991), *Analyse de manuels de 5ème sur l'introduction de la réaction chimique*, Mémoire de Tutorat, Paris, LIREST, Université Paris 7.

MÉHEUT M., LARCHER C., CHOMAT A., 1991, "Apprentissage de la modélisation au collège, quels modèles, quelles stratégies ?" in J.-L. Martinand, C. Bortolussi, *Séminaire de didactique des disciplines technologiques*.

MÉHEUT M., (1989), "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes", *Bulletin de l'Union de Physiciens* 716, 997-1011.

PFUNDT H., (1982), "Preinstructional conceptions about substances and transformations of substances", *Chemica Didactica* 8,320-341.

STAVRIDOU H., SOLOMONIDOU C., (1989), "Physical phenomena-chemical phenomena : do pupils make the distinction ?", *International Journal of Science education* 11 (1) 83-92.

STAVRIDOU H., (1990), *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*, Thèse, Paris 7.

SOLOMONIDOU C., (1991), *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du collège*, Thèse, Paris 7.

STRIKE K.A., POSNER G.J., (1985), "A conceptual change view of learning and Understanding" in L. West and L. Pines (Eds), *Cognitive Structure and Conceptual Change* (211-231), NY, Academic Press.

ANNEXE

Fiche de type A
EXPÉRIENCE 6

Les produits :
eau distillée
calcium

Le matériel :
un grand pilulier
un compte-gouttes
une spatule

L'expérience :
Faire tomber dans le grand pilulier 2 ou 3 morceaux de calcium **sans y toucher avec les doigts**

Ajouter l'eau distillée goutte à goutte

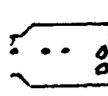
Observer :



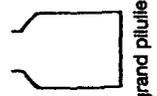
calcium



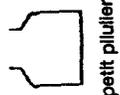
eau distillée



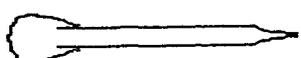
Fiche de type B
LE MATÉRIEL



grand pilulier



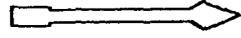
petit pilulier



compte-gouttes



tube à dégagement



spatule



tube à hémolyse



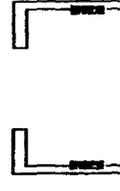
capsule



capsule avec trous



petit bouchon



support lesté

Fiche de type C

RECOMMANDATION

Pour observer

Vous disposez de cinq sens : l'ouïe, le toucher, l'odorat, la vue, le goût

Ne jamais goûter ou toucher un produit !

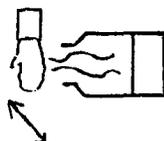
La vue
- regarder à distance
- regarder patiemment, longuement et à plusieurs reprises

L'ouïe

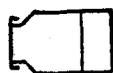
- crépitement
- bruit provoqué par l'inflammation d'un gaz

L'odorat

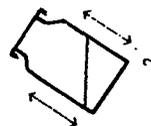
- ne jamais placer son nez directement au-dessus d'un flacon
- faire circuler l'air au-dessus du flacon avec la main



Pour mélanger :



1
pilulier bouché



2
agiter

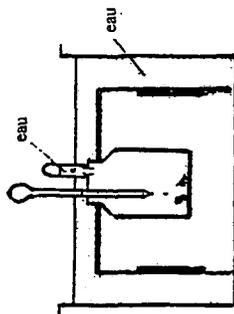
Fiche de type D

RECUEILLIR UN GAZ

Le matériel :

une cuvette
un grand pilulier
un compte-gouttes
un tube à hémolyse
un support lesté
une capsule à 2 trous
un tube à dégagement
une bougie

Le dispositif:



Le tube à hémolyse est rempli d'eau et vient coiffer le tube à dégagement.

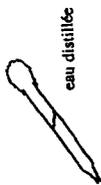
Il se remplit progressivement du gaz produit par l'expérience.

L'essai à la flamme :



bougie

Fiche de type E
EXPÉRIENCE 7



eau distillée



carbure
de calcium

Observations :

Au contact de l'eau le carbure de calcium s'est mis à blanchir et à laisser une odeur. L'eau a frôlé sur le carbure de calcium et a laissé de l'écume sur les rebords du récipient. Le récipient était chaud.

Interprétation :

Fiche de type I

CALCIUM

Description :

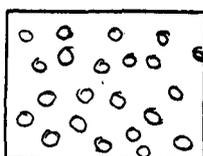
Le calcium est formé "boules" gris et blanc et dégage une petite odeur pas très forte

Propriétés :

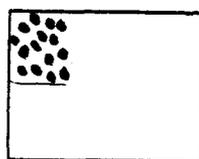
Au contact de l'eau il laisse s'échapper de la fumée et laisse des dépôts blancs, il fait crepiter l'eau et son odeur n'est pas la même

Fiche de type R
REPRÉSENTATION
À L'AIDE DE PARTICULES

Au début

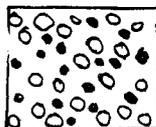


nom du corps: eau
état: liquide



nom du corps: alcool
état: liquide

À la fin



L'APPRENTISSAGE DE LA RÉACTION CHIMIQUE COMME ACTIVITÉ DE RECHERCHE

Carles J. Furió
Juan Bullejos
Esteban de Manuel

Le modèle de "l'enseignement comme activité de recherche" (Gil 1993) dans les sciences conçoit l'apprentissage comme un traitement scientifique de problèmes ouverts. Traitement au travers duquel on tente d'atteindre comme objectif éducatif explicite le changement conceptuel et méthodologique des étudiants. Ce modèle d'enseignement expérimental, pris comme hypothèse didactique, doit être validé par la pratique enseignante dans des domaines concrets des sciences. Dans le cas présent, il a été appliqué à l'enseignement du modèle atomique de la matière avec deux groupes d'élèves de l'enseignement secondaire, et le degré d'apprentissage atteint dans la construction du concept de réaction chimique y a été évalué.

l'enseignement
par la recherche

Les difficultés dans l'apprentissage des sciences que la direction de recherche sur les conceptions alternatives des étudiants, très féconde depuis plus de vingt ans, a mis en évidence, sont en train d'imposer le défi suivant : la nécessité de substituer à un enseignement, peu efficace, principalement basé sur la transmission des connaissances scientifiques établies, un nouvel enseignement ayant une orientation constructiviste par laquelle on conduit les étudiants à élaborer les concepts scientifiques à partir de leurs propres "préconceptions". Cette orientation est en train de donner naissance à différents modèles d'apprentissage fondés sur la nécessité de promouvoir ce **changement conceptuel** ; parmi ceux-ci prend place "l'apprentissage des sciences par l'investigation" (Gil et al., 1991). Dans ce modèle, les stratégies éducatives défendues ont comme objectifs explicites des **modifications méthodologiques et axiologiques** indispensables pour intégrer au processus d'apprentissage les formes de raisonnement propres au travail scientifique et pour rapprocher les activités des élèves de ce qui caractérise la construction de connaissances scientifiques. Modifications sans lesquelles nous supposons que le changement conceptuel ne sera pas aisé.

évaluation des
résultats relatifs à
l'apprentissage
par la recherche

Le présent article rend compte d'un travail de plusieurs années au cours desquelles ce type d'enseignement expérimental a été mis en pratique dans l'ensemble d'un cours d'initiation à la Physique et à la Chimie dans l'Enseignement Secondaire (provoquer des changements méthodologiques exige du temps !). Le problème didactique, lui, était centré sur la caractérisation et l'évaluation des résultats concep-

tuels et méthodologiques obtenus par l'apprentissage par la recherche à propos du **modèle atomique de la matière**, pendant cinq semaines du cursus. Cet enseignement expérimental a été mis en oeuvre avec un groupe mixte de trente-neuf étudiants, marocains et espagnols, de 2^e de BUP, âgés de 15 et 16 ans, à l'Institut Espagnol de Tétouan, pendant l'année scolaire 1987-88 et, ultérieurement, avec un groupe de quarante étudiants espagnols du même niveau et d'âge similaire, du lycée "Albayzin", établissement de la banlieue de Grenade, pendant l'année scolaire 1989-90.

1. RAPPEL DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES EN TANT QU'ACTIVITÉ DE RECHERCHE

le changement
conceptuel et
méthodologique

Dans un travail récent (Gil, 1993), le fondement théorique du modèle constructiviste radical que nous avons été amenés à appeler "*apprentissage par la recherche*" a été amplement exposé. Cette hypothèse didactique suppose que le **changement conceptuel** des étudiants, objectif curriculaire des principales stratégies constructivistes actuelles (Poza, 1989), n'est possible qu'en tenant compte, dans le même temps, du changement méthodologique dans la construction du savoir. C'est-à-dire que le changement conceptuel ne peut pas se produire si l'on ne prend en compte que les pré-conceptions des étudiants. Il faut également considérer les "*savoir-faire*" liés à leur "*méthodologie du sens commun*" comme, par exemple, l'émergence de vérités acceptées sans esprit critique comme des "évidences naturelles", le caractère de certitude attribué aux conclusions fondées sur des observations qualitatives ou le traitement ponctuel des questions sans recherche de la cohérence au moment de l'analyse des différentes situations (Champagne et al, 1985). Au contraire, en faisant en sorte que les élèves pratiquent, aidés de leur professeur, des aspects essentiels de la méthodologie scientifique, comme par exemple préciser une méthodologie jusqu'à parvenir à formuler et formaliser le problème, imaginer des solutions à ce problème sous forme d'hypothèses, concevoir et réaliser des expériences de vérification des hypothèses, etc., ceux-ci pourront dépasser la méthodologie de la "superficialité" et, en conséquence, construire des savoirs (Gil et al., 1991).

la mise en oeuvre
d'éléments
essentiels de la
méthodologie
scientifique

le traitement de
situations
problématiques

De cette façon, ce modèle d'enseignement permet que l'apprentissage se centre sur le **traitement de situations problématiques** plus ou moins ouvertes qui présentent de l'intérêt. L'élaboration des connaissances s'organise de façon similaire à celle des équipes de "*chercheurs novices*" dont la tâche consistera à refaire des travaux déjà connus du professeur, lequel agit en qualité de chercheur expérimenté et de "*directeur de recherche*".

Les éléments essentiels d'une classe de sciences physiques ayant une orientation constructiviste comme celle que nous avons indiquée ont été représentés sur le schéma 1, d'une façon similaire à celle que Wheatley (1991) a proposée pour l'apprentissage coopératif.

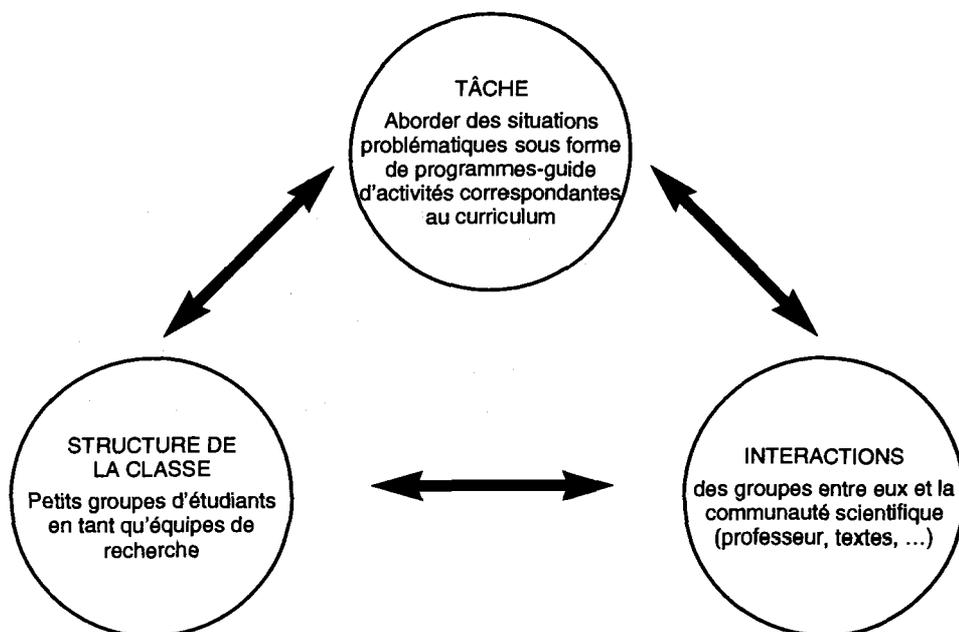


Schéma 1.- Éléments essentiels d'une classe (de Chimie) engagée dans l'apprentissage par la recherche.

le curriculum
focalisé sur les
tâches des
élèves

mettre l'accent
sur le programme
d'activités

En premier lieu, le professeur planifie au préalable le traitement des situations problématiques sous la forme de "*programmes d'activités*" qui ont pour objet de prévoir, à titre d'hypothèse, le développement du curriculum (Furió et Gil, 1978 ; Gil et Martínez-Torregrosa, 1987). Cette nouvelle conception du curriculum plus focalisé sur ce que l'élève a à accomplir a reçu un solide appui des positions constructivistes. Comme l'ont signalé Driver et Oldham (1986), il faut tendre vers une nouvelle conception du curriculum qui passe d'une centration exclusive sur la définition des savoirs et des savoir-faire que doit acquérir l'élève à une centration sur le programme d'activités grâce auquel peuvent se construire ces mêmes savoirs et être acquis ces mêmes savoir-faire.

En second lieu, l'isomorphisme entre l'apprentissage et la recherche postulé par ce modèle didactique nous conduit à une structure d'organisation de la classe sous forme de petits groupes d'étudiants qui pratiquent des activités sous la direction du professeur de sorte qu'il est ainsi possible de

les interactions
entre les groupes
d'élèves et la
communauté
scientifique

mieux stimuler la co-construction des connaissances. A ce propos, Astolfi et Vérin (1985) ont montré l'importance que revêtent dans le domaine scientifique et dans une atmosphère de classe les interactions positives entre les groupes.

Une troisième caractéristique essentielle de ce type de classe est de considérer que le fonctionnement de ces équipes n'est pas autonome mais que doivent être favorisées, de façon organisée et variée, les interactions des groupes entre eux et par rapport à la communauté scientifique incarnée par les professeurs, les manuels scolaires, etc. Cela permet que les solutions données par les équipes dans chaque activité puissent faire l'objet d'allers et retours entre les élèves, qu'elles puissent être complétées, validées, réfutées, etc.. Ces interactions à l'intérieur des groupes et entre eux au moment d'aborder les problèmes ouverts mènent à la (re)construction de la réalité subjective de l'élève au travers de l'interaction sociale. Pour un développement plus complet des fondements théoriques de ces stratégies radicalement constructivistes, on peut lire le travail déjà cité de Gil (1993) dans le numéro précédent de cette revue.

En résumé, cet apprentissage conçu comme une activité de recherche pourrait constituer une solution au grave problème que pose l'insuffisance de l'apprentissage dans le modèle de transmission/réception et à celui, plus grave encore, du peu d'intérêt que suscite l'enseignement relevant de ce modèle. L'application de ces stratégies didactiques dans des contextes éducatifs concrets, tel celui de l'enseignement de la réaction chimique, dans le Secondaire, permet d'avancer l'hypothèse suivante :

remédier à
l'insuffisance de
l'apprentissage
dans
l'enseignement
par transmission
de la science

"Les étudiants du Secondaire qui auront reçu un enseignement sur la théorie atomico-moléculaire de la matière en accord avec les orientations constructivistes de l'apprentissage comme activité de recherche, auront une connaissance significativement meilleure (conceptuelle et procédurale) sur ce thème que les étudiants qui auront reçu un enseignement par transmission de connaissances chimiques déjà élaborées."

Nous passerons brièvement sur la description des contenus choisis ainsi que sur l'évaluation terminale de l'apprentissage que nous avons réalisée pour voir si les effets obtenus par cet enseignement expérimental de la réaction chimique sont en accord avec les objectifs curriculaires poursuivis.

2. QUELS CONTENUS SONT SUSCEPTIBLES DE FAVORISER LA CONSTRUCTION DU CONCEPT DE RÉACTION CHIMIQUE ?

Il est bien connu que la question de la sélection et de l'organisation des contenus de la matière à enseigner peut avoir de multiples solutions. Cependant, dans tous les cas, il est hautement recommandable que ces contenus forment un **corpus cohérent de connaissances** (sur le plan des concepts et des procédures) dont le niveau de formulation puisse être construits par les étudiants avec l'aide du professeur comme directeur de recherche.

tenir compte des problèmes apparus dans l'histoire des sciences

Dans ce projet curriculaire, des contenus pouvant constituer un premier corpus théorique de connaissances semblable à celui qui existait aux origines de la Chimie comme Science Moderne au milieu du dix-neuvième siècle ont été sélectionnés (Holton et Roller, 1963). Le fil conducteur adopté pour le développement de ces contenus tient compte non seulement des résultats mais encore des problèmes principaux apparus dans l'histoire jusqu'à ce qu'on parvienne à la "trame" de l'hypothèse atomico-moléculaire de la matière. Cela ne veut pas dire qu'il faut répéter fidèlement cette problématique mais il faut tirer des leçons des erreurs humaines et éviter les méandres et les va-et-vient que la chimie a connus historiquement dans ses constructions scientifiques. En d'autres termes, la sélection de contenus à enseigner doit dépasser une vision réductrice de la nature de la Science, largement partagée par les enseignants/es, qui se préoccupent plus de présenter les résultats du travail scientifique que de présenter ses problèmes et ses méthodes (Orlandi, 1991).

prévoir les difficultés épistémologiques qui peuvent surgir

Dans l'établissement de la "théorie atomique de la matière", à laquelle nous nous référons, deux directions de travail convergent : l'étude du comportement physique des gaz - état dans lequel les substances présentent une phénoménologie plus simple et plus unitaire -, et les nombreuses recherches sur la connaissance empirique des substances - processus de séparation et de purification des substances à partir de mélanges, études sur les transformations chimiques, etc. Ainsi donc, d'une part l'étude macroscopique des gaz et l'interprétation de leurs propriétés physiques à travers un modèle cinétique de particules peut permettre une première approximation quant à la solution du problème de la continuité ou de la discontinuité de la matière que l'on peut appliquer par extrapolation aux solides et aux liquides. Ensuite, il est possible de poser comme nouveau problème structurant (Gagliardi, 1988) : quelle est la structure interne des particules ? De la réponse à cette question on attend une explication unitaire, simple et plausible, à propos tant de la diversité des substances existantes que de leurs transformations chimiques. On parviendra ainsi à l'élaboration de l'hypothèse atomico-moléculaire de la

matière et au sein de cette hypothèse à un concept de réaction chimique.

En ce sens, un modèle constructiviste doit non seulement délimiter le corpus théorique "terminal" des connaissances à (re)construire par les étudiants et établir des "itinéraires" curriculaires possibles pour aller de l'avant dans ces constructions, mais encore il doit prévoir les difficultés qu'il va rencontrer (Martinand, 1986 ; Astolfi, 1994). Ainsi, par exemple, on sait fort bien ce qu'il en coûtait de concevoir la matérialité des gaz, et, parallèlement, la recherche didactique a montré la résistance à attribuer une masse aux gaz manifestée par les étudiants du Secondaire (Furió et al., 1987).

faire la différence
entre le registre
atomiste et le
registre
empirique
macroscopique

Dans d'autres cas, les obstacles épistémologiques sont inconsciemment créés par l'enseignement. Ainsi, par exemple, il est fréquent, au moment d'introduire l'hypothèse atomique de la matière, de mêler le **registre atomique microscopique**, dans lequel les étudiants doivent interpréter les réactions chimiques, et le **registre empirique macroscopique**, avec lequel il est, en général, nécessaire de familiariser au préalable les élèves novices en Chimie (Furió et al., 1993). Le schéma 2 représente les deux "noyaux durs" correspondant à ces registres et les relations qui existent entre eux : sans cette différenciation il sera difficile que le concept de réaction chimique soit compris. Ainsi le professeur peut-il parvenir à comprendre pourquoi, par exemple, il s'avère si difficile aux étudiants de distinguer entre mélange et composé chimique. En effet, l'absence habituelle dans les textes d'une définition empirique (procédurale) du concept de substance comme type de matériau ayant un profil spécifique de propriétés caractéristiques (Bachelard, 1978), qui s'oppose au concept de mélange, est un obstacle conceptuel qui empêche l'étudiant de parvenir à distinguer, en termes atomistes, un mélange de corps simples et un corps composé formé par les mêmes éléments (Bullejos et al., 1993).

la nécessité
d'une définition
empirique du
concept de
substance

L'ensemble de ces considérations a permis de fonder le choix et l'organisation des contenus opérés pour le cours de Physique et Chimie de 2^e de BUP et le programme d'activités adopté dans cet enseignement expérimental (Bullejos et Sampedro, 1987). Dans le même temps et comme nous allons le voir, ce noyau dur de l'hypothèse atomique de la matière a permis l'élaboration d'un questionnaire d'évaluation de l'apprentissage basé sur des critères non arbitraires et indicatifs du progrès conceptuel et méthodologique atteint par les étudiants.

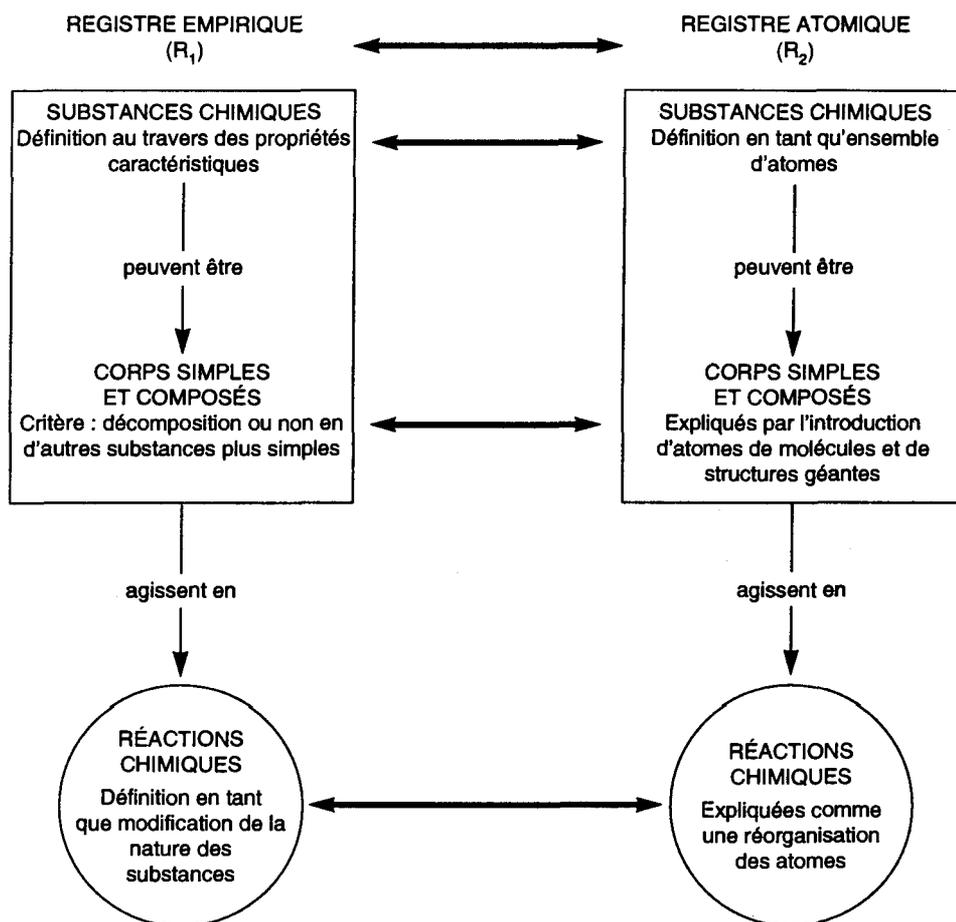


Schéma 2. Registre empirique (R₁) et registre atomique (R₂) du concept de réaction chimique

3. ÉVALUATION DE L'APPRENTISSAGE DE LA RÉACTION CHIMIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT PAR LA RECHERCHE

Une procédure d'évaluation de l'apprentissage réalisé par les étudiants satisfaisante doit être cohérente par rapport aux intentions explicites que propose ce modèle d'apprentissage par la recherche. En principe, le modèle devra dépasser la réduction habituelle de la pratique évaluatrice centrée sur la mémorisation "des connaissances théoriques" et embrasser, autant que possible, tous les **aspects conceptuels et méthodologiques** qui sont aujourd'hui considérés comme

il faut évaluer des apprentissages conceptuels et méthodologiques

importants dans l'apprentissage constructiviste des sciences (Alonso et al., 1992).

3.1. Épreuve d'évaluation des connaissances acquises sur la réaction chimique

Une autre des caractéristiques principales d'une évaluation innovatrice est qu'elle doit se référer à des critères non arbitraires qui fonctionneront comme des indicateurs du progrès réalisé par les étudiants. Il sera ainsi possible d'établir une série d'objectifs principaux et d'obstacles associés pour chaque thème, par rapport auxquels pourront être élaborées les modalités d'évaluation.

fixer les objectifs
principaux et
déceler les
obstacles
associés

C'est pourquoi, vérifier le niveau de compréhension des étudiants relatif à la notion de réaction chimique exige, en premier lieu, d'explicitier de manière synthétique quels sont les connaissances conceptuelles et les procédés de base qui formeraient un **schéma interprétatif de ce concept** dans les deux registres auxquels il a été fait allusion dans le paragraphe 2, et, en second lieu, de sélectionner les **objectifs** de la carte conceptuelle qui, traduits en questions, permettent de vérifier comment pensent les étudiants. Dans ce dernier domaine, il convient d'avoir très présents à l'esprit les difficultés de l'apprentissage qui vont se présenter, et en particulier les objectifs-obstacles connus qui doivent être dépassés pour l'élaboration du modèle atomique de la matière. Cette idée d'**objectif-obstacle** permet de réduire considérablement la "forêt" d'objectifs spécifiques de la pédagogie associationniste et de porter l'attention d'une part sur les conceptions qui constituent véritablement le noyau dur de la théorie, d'autre part, sur les autres qui sont de véritables barrières épistémologiques chez les étudiants eux-mêmes (Martinand, 1986 ; Astolfi, 1994).

Le tableau 1 montre l'un de ces schémas interprétatifs de la réaction chimique qu'il sera souhaitable que les étudiants aient élaboré à la fin de l'enseignement de la Chimie dans le Secondaire. Dans ce schéma, il a été tenu compte de la différenciation de référents indiqués dans le paragraphe précédent.

A partir de ce schéma interprétatif de la réaction chimique, nous avons construit une grille de huit objectifs que doivent atteindre les étudiants et des difficultés d'apprentissage possibles qu'ils doivent surmonter (Tableau 2).

<i>Interprétation phénoménologique de la réaction chimique</i>	<i>Interprétation atomiste</i>
<p>1. Dans une réaction chimique de nouvelles substances se forment.</p> <p>- Dans un processus physique il n'y a pas de formation de nouvelles substances.</p> <p><i>Concepts et procédures en relation :</i></p> <p>-notion de substance en tant que système matériel caractérisé par un ensemble de propriétés caractéristiques (points de fusion et ébullition...)</p> <p>-critère de base pour différencier un mélange homogène de substances d'une substance (corps pur) : par opposition à un mélange, un corps pur maintient ses propriétés caractéristiques constantes</p> <p>-la conservation ou non des substances dans un processus se détermine en utilisant des techniques d'analyses, principalement la séparation de substances et la détermination des propriétés caractéristiques de chacune des substances qui se trouvent à la fin du processus.</p> <p>2. Il existe des substances qui se décomposent en d'autres lorsque la température augmente et/ou lorsque passe un courant électrique. On les appelle des composés chimiques.</p> <p>-Il existe des substances qui ne se divisent par aucun procédé. On les appelle corps simples.</p> <p>3. Dans une réaction chimique la masse des produits est égale à celle des réactifs.</p> <p>4. Dans toute réaction chimique, la constance de la proportion en masse des substances qui réagissent se réalise.</p>	<p>1. Une substance est constituée de particules identiques, d'une seule classe.</p> <p>-Les particules caractéristiques des substances sont formées par des atomes indivisibles.</p> <p>-Les propriétés caractéristiques d'une substance s'expliquent sur la base de la structure de ses particules constituantes caractéristiques (type et nombre d'atomes des éléments qui forment ces particules).</p> <p>- Dans un processus physique, les particules constituantes caractéristiques des substances ne changent pas.</p> <p>-Dans un processus chimique, les particules constituantes caractéristiques des substances changent. Les atomes qui constituent les particules des réactifs se restructurent, formant dans les produits des nouvelles particules.</p> <p>2. Les corps simples sont formés d'une même classe d'atomes. Ces atomes se caractérisent, entre autres propriétés, par leur masse et leur taille et constituent un élément chimique.</p> <p>-Le composé chimique est formé par d'agglutinations de différents atomes (molécules).</p> <p>3. La conservation de la masse dans les réactions chimiques est la conséquence de la conservation des atomes des éléments. Les nouvelles substances se forment par restructuration des atomes présents dans les réactifs.</p> <p>4. La constance de la proportion en masse des substances qui réagissent est aussi la conséquence de la restructuration de ses particules pour former les nouvelles substances.</p>

Tableau 1

Schéma interprétatif "daltonien" de la phénoménologie de la réaction chimique

Objectifs	Difficultés de l'apprentissage
<p>1. Savoir faire empiriquement la différence entre un processus physique et un processus chimique en utilisant comme critère la reconnaissance d'au moins une propriété caractéristique des substances</p> <p>2. Classer correctement ou presque les processus chimiques pour quatre processus familiers (dissolution du sucre dans l'eau, combustion d'une bougie, action d'un acide sur le zinc et mélange de gaz oxygène et hydrogène)</p> <p>3. Reconnaître la différenciation empirique entre un mélange de corps simples et leur combinaison chimique</p> <p>4. Reconnaître la différenciation atomiste entre un mélange de corps simples et leur combinaison chimique</p> <p>5. Interpréter un processus chimique en tant que redistribution des atomes des éléments initialement présents dans les réactifs</p> <p>6. Prédire la conservation de la masse dans un processus chimique dans lequel interviennent des gaz et dans lequel apparaît/disparaît la "matière corporelle".</p> <p>7. Appliquer de façon pertinente la notion de la constance des proportions dans la masse avec laquelle deux corps purs réagissent dans un processus de synthèse</p> <p>8. Mettre en relation l'invariance des proportions massiques de combinaison de deux corps simples avec la constance dans la proportion avec laquelle les atomes des éléments s'unissent quand ils forment les particules du composé (interprétation daltonienne de la loi des proportions constantes).</p>	<p>1. Ambiguïté de la conception empirique de la substance Utilisation de critères superficiels pour définir macroscopiquement une réaction chimique</p> <p>2. Imprécision dans la définition empirique de la réaction chimique (perception de la réaction comme mélange simple de substances, ...)</p> <p>3. Identification empirique du mélange de corps simples avec le composé formé de ces éléments</p> <p>4. Identification du composé chimique en tant que mélange aléatoire d'atomes des éléments qui le forment</p> <p>5. Absence du concept de réaction en tant qu'interaction de substances où les éléments se redistribuent</p> <p>6. Les gaz sont des substances sans poids</p> <p>7. Fixation fonctionnelle des poids de combinaison dans une réaction. Toutes les masses qui se mélangent font réaction (syncrétisme fonctionnel).</p> <p>8. L'agglutination atomique des particules d'un composé ne reste pas constante.</p>

Tableau 2

Objectifs et difficultés de l'apprentissage dans le domaine de la réaction chimique

4. CONDITIONS DE RÉALISATION DE L'ENSEIGNEMENT EXPÉRIMENTAL

Pour la réfutation de l'hypothèse émise on a élaboré une épreuve post-enseignement dans laquelle on compare les résultats de l'apprentissage atteint par les échantillons expérimentaux et de contrôle. Dans ces échantillons le changement conceptuel et méthodologique obtenu a été analysé.

4.1. Échantillons choisis

L'échantillon expérimental est constitué de deux groupes d'étudiants de 15 et 16 ans (au total vingt-six marocains et treize espagnols) qui suivaient les cours de Physique et Chimie de 2^e de BUP à l'Institut Espagnol de Tétouan (Maroc) pendant l'année scolaire 1987-1988.

Comme les groupes expérimentaux comprenaient des étudiants de cultures différentes, deux types de groupes de contrôle ont été sélectionnés. L'un est un échantillon représentatif de la population scolaire également culturellement mixte (Ci) de deux Centres espagnols au Maroc (Tétouan et Tanger) et l'autre comprend des élèves espagnols de quatre Centres de Grenade (CE) dont le "rendement scolaire" en Chimie avait été trouvé meilleur que celui de l'échantillon précédent. Des échantillons de contrôle composés d'élèves n'ayant pas encore commencé leurs études secondaires de Chimie (2^e BUP) ont également été étudiés dans le but de mieux analyser le changement conceptuel atteint tant chez les groupes de contrôle que chez les groupes expérimentaux. Enfin, on a inclus dans les échantillons de contrôle des étudiants qui avaient reçu un cours de Chimie supplémentaire par rapport aux étudiants des groupes expérimentaux.

Un second échantillon expérimental de quarante-neuf élèves du même âge, constitué de deux groupes du lycée "Albayzin" de Grenade, a reçu le même enseignement expérimental à la fin de l'année scolaire 1989-90.

4.2. Planification de l'enseignement mis en oeuvre dans les groupes expérimentaux

L'enseignement donné aux élèves des groupes expérimentaux a été un enseignement par recherche, conduit comme décrit antérieurement, au moyen d'un programme d'activités (Furió et Gil, 1978 ; Gil et Martínez-Torregrosa, 1987) qui développe le chapitre V d'un cours de Physique et Chimie de 2^e de BUP établi suivant les orientations du modèle (Bullejos et Sampedro, 1987). Les classes ont été organisées en petits groupes stables de quatre ou cinq élèves qui ont discuté et réalisé les activités proposées avec mises en commun sous la direction du professeur.

établir une
comparaison
entre un
échantillon
expérimental et
un échantillon
de contrôle

l'enseignement
au moyen d'un
programme
d'activités

de petits groupes
fixes d'élèves

4.3. Mise au point d'un questionnaire pour évaluer les résultats de l'apprentissage

Pour l'évaluation des connaissances sur la réaction chimique, un questionnaire (CM) de huit items a été élaboré, en relation avec le schéma interprétatif idéal du changement chimique, comme cela a été exposé dans le paragraphe 3.1. Chacun de ces items a pour finalité le fait de voir dans quelle mesure les huit objectifs signalés dans le tableau II ont été atteints. La validité des items de ce questionnaire a été jugée par un éventail de huit professeurs experts, montrant un accord de 90% sur la validité du contenu pour répondre aux finalités attendues.

4.4. Passation du questionnaire

le questionnaire est proposé au début de l'année scolaire

Le questionnaire CM a été présenté à tous les groupes de l'échantillonnage de contrôle retenus, au début de l'année scolaire 1987-1988, tandis qu'il a été présenté aux groupes de l'échantillonnage expérimental en début de cursus 1988-89, en espérant qu'ils n'auraient encore reçu aucun cours en relation avec les concepts en question. Cela fut le cas pour l'échantillonnage expérimental, mais ne fut pas possible pour tous les groupes d'élèves de l'échantillonnage de contrôle.

Un questionnaire identique au précédent, dans lequel seul l'item correspondant à l'objectif trois avait été modifié, a été proposé au deuxième échantillonnage d'élèves du groupe expérimental et du groupe du contrôle au début du cursus 1990-1991.

5. PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans le tableau III sont présentés les pourcentages des réponses correctes obtenues pour chacun des items dans les différents cursus et échantillons du premier groupe expérimental et de contrôle (1). A côté de ces pourcentages et entre parenthèses ont été indiqués les écarts-types de chaque résultat (Garret, 1983). Il faut souligner que les résultats de chaque niveau correspondent à des élèves qui viennent de commencer le cours ; par conséquent, les résultats de 3^e de BUP correspondent à des élèves qui avaient étudié la Physique et la Chimie l'année précédente en 2^e de BUP, etc.

(1) Les résultats obtenus par le second échantillonnage expérimental et de contrôle, lorsqu'ils ont répondu au même questionnaire, sont semblables à ceux du premier échantillonnage.

Cours	Échantillonnage (N)	Item 1 (explicitement au moins 1 preuve)	Item 2	Item 3	Item 4	Item 5	Item 6	Item 7	Item 8
2 ^e	Esp (144)	5,6 (1,9)	27,8 (3,7)	11,8 (2,7)	47,9 (4,2)	16,7 (2,5)	39,6 (4,1)	22,2 (3,5)	33,3 (3,9)
	Mar (42)	7,1 (4,0)	7,1 (2,4)	2,4 (2,4)	14,3 (5,4)	7,1 (2,4)	28,6 (7,0)	9,5 (4,5)	16,7 (5,8)
3 ^e	C _E (183)	14,8 (2,6)	20,8 (3,0)	36,6 (3,6)	49,3 (3,7)	31,7 (2,4)	51,4 (3,7)	25,7 (3,2)	47,0 (3,7)
	C _I (72)	6,9 (3,0)	22,2 (4,9)	11,1 (3,7)	29,2 (5,4)	18,1 (3,0)	50,0 (5,9)	18,1 (4,5)	16,7 (4,4)
	E (39)	69,2 (7,4)	76,9 (6,8)	61,5 (7,8)	92,3 (4,3)	71,8 (7,7)	97,4 (2,6)	33,3 (7,6)	69,2 (7,4)
COU	C _E (197)	14,3 (2,8)	28,4 (3,2)	37,6 (3,5)	60,9 (3,5)	53,3 (3,2)	67,7 (3,3)	37,6 (3,4)	63,5 (3,4)
	C _I (33)	6,1 (4,2)	12,1 (5,7)	18,2 (6,7)	48,5 (8,7)	33,3 (5,7)	48,5 (8,7)	30,3 (8,0)	36,4 (8,4)

Tableau III.

Pourcentage de réponses correctes obtenues pour chaque item par les différents groupes de contrôle (espagnol C_E et marocain C_I) et d'expérimentation (E)

le groupe expérimental produit de meilleurs résultats

On peut remarquer que les résultats obtenus par le groupe expérimental sont significativement plus élevés que ceux obtenus par les groupes de contrôle pour tous les items, à l'exception de l'item 7. Les résultats sont d'autant plus significatifs que le groupe expérimental comprend 28% d'étudiants qui n'avaient pas été reçus en fin de cursus et qui, par conséquent, redoublent ; d'autre part également, 20,5% de ce même groupe n'ont pas réussi à passer en 3^e dans la matière de Physique et Chimie. En revanche, les élèves des groupes de contrôle avaient réussi le cursus précédent et, de plus, ils avaient choisi l'option Physique-Chimie en 3^e ou la Chimie en COU. Passons, pour ne pas nous étendre de manière excessive sur cette analyse, aux commentaires des résultats particuliers obtenus pour trois items (les items 1, 3 et 5) du questionnaire.

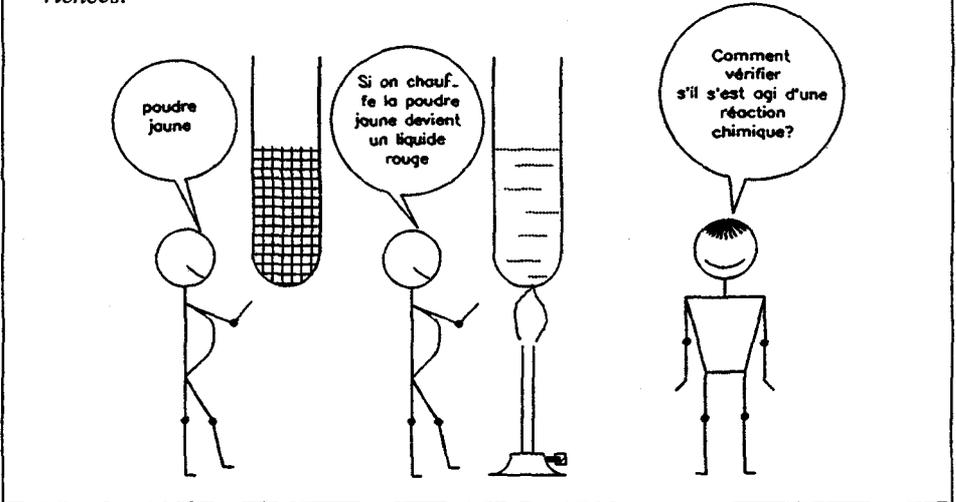
5.1. Item 1 : critères opérationnels utilisés dans la reconnaissance empirique d'une réaction

les élèves de contrôle ne proposent pas d'opération précise

Les réponses fournies par les étudiants des groupes de contrôle à cet item montrent une absence quasi totale de critères opérationnels significatifs qui permettent de classer un processus inconnu comme processus chimique. Seulement quelques 15% des élèves espagnols qui ont commencé à étudier en 3^e et en COU emploient au moins une preuve opérationnelle significative ; on ne note aucun progrès résultant de l'enseignement qui serait lié au passage d'un niveau de classe à l'autre.

En revanche, dans le groupe expérimental, 69% des élèves emploient une preuve significative comme, par exemple, la comparaison des points de fusion ou d'ébullition entre les substances initiales et les substances finales ; 26% en utilisent deux et 13% trois.

Item 1.- On verse de la poudre jaune dans un tube à essai. Quand le tube à essai est chauffé, la poudre jaune se transforme en un liquide de couleur rouge foncé (voir schéma). Ce qui s'est passé peut être ou non une réaction chimique. Propose quelques expériences, épreuves ou essais qui peuvent servir à prouver s'il s'est produit une réaction chimique et explique à quoi serviraient ces expériences.



De nombreux étudiants du groupe de contrôle fournissent des réponses dans lesquelles est exprimée une notion correcte de processus chimique mais ils ne proposent aucune preuve permettant de discerner de quelle sorte de processus il s'agit. Poursuivons en considérant deux réponses fréquentes parmi les élèves de groupes de contrôle et deux autres données par deux élèves du groupe expérimental qui avaient obtenu une note faible à leur cursus de 2^e de BUP.

Réponses d'étudiants des groupes de contrôle

Elève A : "En premier je vérifierais de quoi est composée la poudre jaune et ensuite j'examinerais le liquide rouge pour voir s'il est formé d'atomes d'une nouvelle substance ou simplement si ce qui est arrivé est un changement de couleur, mais sans aucune réaction."

Elève B : "Nous devrions voir si la poudre jaune se trouvait seule ou s'il s'agissait d'un mélange de plusieurs éléments. S'il s'agissait d'un mélange il se peut qu'en le chauffant se soit produit une réaction chimique.

On vérifie si le liquide rouge foncé était formé d'une seule substance ou s'il est formé de plusieurs. S'il est formé d'une seule il n'y a pas de réaction, la poudre a fondu toute seule."

Réponses d'étudiants des groupes expérimentaux

Elève C : "J'analyserais la première substance et je verrais s'il s'agit de la même : 1° en voyant si leurs points d'ébullition ou de fusion continuent à être les mêmes que ceux de la première substance que nous avons. Si c'est pareil la substance n'a pas changé. 2° Je distillerais. Si cela a été une réaction, la masse rouge continuera à se manifester après avoir été distillée."

Elève D : "Pour savoir si c'est une réaction chimique, la poudre jaune doit être une substance distincte de la masse rouge. Pour le vérifier je la pèserais (si elle pèse plus c'est qu'elle s'est combinée avec l'oxygène et il y a réaction). Je prendrais la masse rouge, je regarderais le point de fusion, et je le comparerais avec la poudre jaune, s'il est différent il y a eu réaction (toutes les propriétés de la masse rouge se comparent avec la poudre jaune). Je considérerais la densité de la masse rouge pour voir si elle a changé ; je la ferais dissoudre dans différentes substances. Je ne me fie pas beaucoup à la couleur parce qu'au changement d'état elle peut changer de couleur pour une raison quelconque."

Comme il est possible de l'observer dans la réponse de l'élève B, l'idée que pour qu'une réaction chimique se produise la condition nécessaire est qu'il y ait deux substances différentes est une idée fréquente. Elle apparaît également comme condition suffisante pour que ces deux substances se mélangent.

D'autre part, dans les réponses des élèves des groupes expérimentaux C et D, on peut observer comment ceux-ci mettent en avant la nécessité de rechercher les propriétés du système initial et du système final. Ils proposent des opérations concrètes qui permettent d'identifier ces propriétés et finalement ils discutent des conclusions qui pourraient être déduites à partir des résultats obtenus dans ces manipulations.

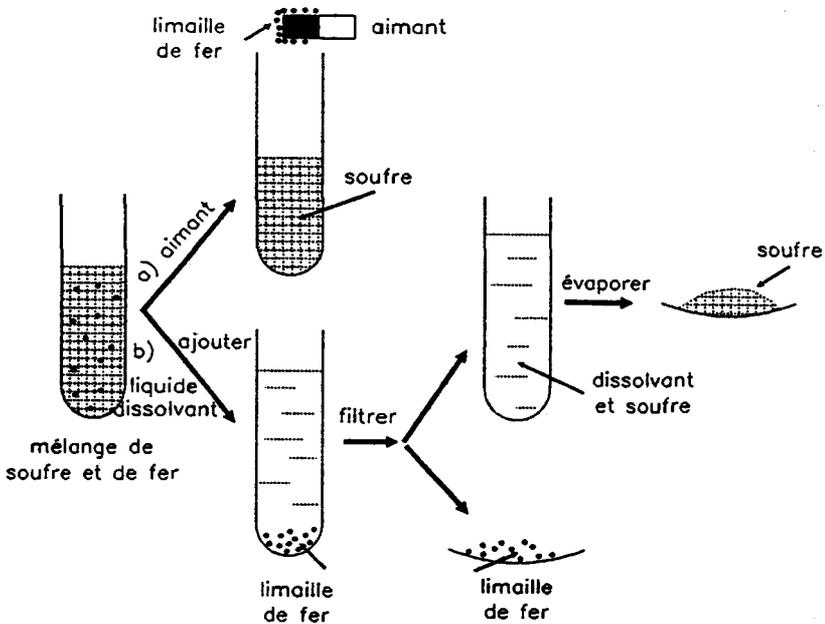
5.2. Item 3 : différenciation empirique entre le mélange de corps simples et la combinaison chimique de leurs éléments

En relation avec le contenu de cet item, un autre des obstacles les plus difficiles à surmonter par les étudiants est l'idée que les éléments chimiques (en tant qu'atomes) qui constituent un composé chimique se trouvent dans le composé chimique en tant que corps simples, lesquels conservent leurs propriétés. Cette difficulté épistémologique dérive de la non-différenciation, généralisée chez les étudiants, des concepts de mélange et de combinaison chimique. D'autre part, l'utilisation indifférenciée des termes "élément chimique" et "corps simple" que font en général les manuels conduit, de façon logique, à renforcer l'identité "composé = mélange d'éléments en tant que corps simples" (Bullejos et al 1993).

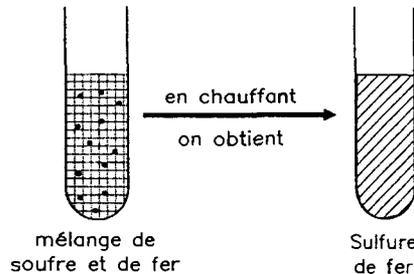
les élèves expérimentaux possèdent des connaissances quant aux processus

les élèves ne différencient pas mélange et corps composé

Item 3. Lorsqu'on mélange dans un tube à essai du soufre en poudre et de la limaille de fer, le soufre peut se séparer du fer par l'une ou l'autre de ces méthodes : a) en attirant le fer avec un aimant et b) en dissolvant le soufre avec un liquide qui ne dissout pas le fer et ensuite en filtrant (voir schéma).



Si l'on chauffe le mélange de soufre et de fer, après l'avoir refroidi, on obtient une nouvelle substance solide, de couleur gris sombre, appelée sulfure de fer. Si, une fois le sulfure de fer formé, nous souhaitons, à partir de lui, retrouver séparés le soufre et le fer, quelle méthode emploierais-tu?



Ajouter du dissolvant au sulfure de fer pour que le soufre se dissolve et que le fer reste. Ensuite on filtre et on sépare le fer.

Approcher un aimant très puissant du sulfure de fer. Le fer serait attiré par l'aimant et il resterait le soufre seul.

Ajouter un produit quelconque au sulfure de fer pour qu'il fasse réaction avec le soufre et que le fer soit libéré.

Autre procédé :

En effet, moins de 40% des étudiants de 3^e et de COU du groupe de contrôle choisissent la réponse correcte et emploient des idées appropriées dans leurs explications, contre 61% des élèves des groupes expérimentaux. Voici des exemples de réponses qui laissent apparaître cet obstacle.

Elève A : "J'utiliserais une autre méthode. On continue à chauffer pour que le soufre s'évapore et que le fer demeure".

Elève B : "Le soufre et le fer se sont liés au moyen de la chaleur. La chaleur a provoqué l'union, les rendant unis en un bloc homogène. Le dissolvant dissoudra le soufre et laissera le métal, le fer".

les élèves
expérimentaux
discutent de la
méthode
adéquate

De leur côté, les élèves des groupes expérimentaux donnent des réponses dans lesquelles ils différencient nettement une substance composée de deux éléments (en tant que catégories d'atomes) et les corps simples constitués de ces mêmes éléments. Dans leurs réponses ils ne se bornent pas à proposer la procédure adéquate pour récupérer les substances de départ, mais ils discutent également et disent pourquoi la méthode qu'ils proposent est la plus adéquate voire même pourquoi les autres méthodes ne conviennent pas, ainsi qu'on peut l'observer dans la réponse de l'élève suivant, d'un niveau faible.

Elève C : "Je crois que si on nous dit qu'on obtient une nouvelle substance c'est qu'il s'est produit une réaction chimique. C'est pour cela que ce produit n'a déjà plus rien à voir avec les réactifs, de sorte que les propriétés des produits sont différentes de celles des réactifs.

Si l'on verse du dissolvant sur le sulfure de fer pour que le soufre se dissolve et que le fer demeure, ceci ne peut se produire parce que si l'on a obtenu une nouvelle substance, les atomes de soufre et ceux de fer sont combinés et n'ont plus les mêmes propriétés que le soufre et le fer. En approchant un aimant très puissant du sulfure de fer, le fer ne serait pas attiré parce que, comme je l'ai dit dans le cas précédent, le fer s'est combiné avec le soufre et il n'a plus les mêmes propriétés".

ils ont acquis
l'idée clef
permettant
d'identifier la
transformation
chimique

Pour cet élève, l'information qu'une nouvelle substance se forme lui fait penser que cette substance a des propriétés différentes de celles des réactifs et il en conclut qu'on ne peut utiliser aucune méthode fondée sur la différence des propriétés des substances initiales parce que ces substances n'existent plus. Sa réponse montre, par conséquent, qu'il a appris de façon significative les connaissances scientifiques essentielles pour interpréter le changement chimique : les éléments (les atomes) se conservent mais non les substances.

Un autre aspect qui ressort des réponses que donnent les élèves des groupes expérimentaux est l'utilisation fréquente d'interprétations atomistes du changement chimique (daltoniennes), même lorsque l'énoncé de l'item ne les exige pas explicitement. La réponse de l'élève D illustre bien ce qui est dit :

Elève D : "Même si l'on essaie de dissoudre le soufre ou d'attirer le fer avec un aimant, cela ne se produira pas parce que les atomes du soufre et du fer sont unis, formant une nouvelle molécule aux propriétés totalement distinctes de celles du fer et du soufre séparément. Par conséquent la seule méthode consiste à recourir à une réaction chimique pour pouvoir séparer de nouveau les atomes".

l'enseignement
par la recherche
favorise la
construction
d'arguments
cohérents

Dans la comparaison des réponses données par les uns et les autres des élèves, on peut observer une fois de plus les différences quant aux aspects méthodologiques. Ainsi, alors que les élèves des groupes de contrôle se bornent à donner des réponses brèves, sans arguments, qui se limitent généralement à expliquer avec plus de détails la méthode proposée (généralement erronée), les élèves des groupes expérimentaux justifient les opinions qu'ils émettent, en cherchant la cohérence de ces opinions avec le corpus de connaissances établi, témoignant ainsi clairement d'une certaine formation au savoir-faire scientifique.

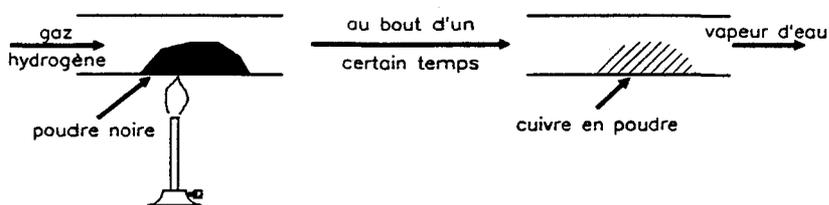
5.3. Item 5 : interprétation atomiste d'un processus chimique comme recombinaison des atomes présents dans les réactifs lorsqu'ils deviennent des produits

maîtriser l'idée
de
transformation-
conservation en
ce qui concerne
la réaction
chimique

L'interprétation empirique de la réaction chimique comme changement de substance est un pré-requis pour accéder à son interprétation atomiste. Cette idée de changement exige de prendre en considération en même temps "la conservation des éléments chimiques (en tant que catégories d'atomes) mais non celle des corps simples, formés de mêmes éléments". L'item 5 a été conçu pour voir si les étudiants sont capables de manier correctement l'apparent paradoxe de "changement-conservation" des corps simples - éléments chimiques pour pouvoir expliquer la transformation observée. Cependant, une réponse atomiste correcte à cet item demande de dépasser, dans le même temps, deux obstacles dont on a déjà tenu compte dans les items 3 et 4, à savoir : a) considérer le composé initial comme un mélange de ses éléments, identifiés comme corps simples et non comme catégories d'atomes et b) supposer la même chose dans l'eau qui s'est formée. Pour cette raison, le critère de correction de l'item qui a été choisi correspond au niveau d'exigence le moins élevé, relatif à l'identification des

éléments qui se trouvaient dans le composé initial, même s'il est toujours considéré comme un mélange.

Item 5. La poudre noire présente dans le tube du schéma joint est un corps composé. Elle est chauffée au moment où l'on fait passer un jet d'hydrogène gazeux (schéma 1). On constate qu'au bout du tube on obtient de la vapeur d'eau tandis que la poudre noire se transforme en poudre de l'élément cuivre (schéma 2). Explique ce qui s'est produit pour qu'apparaissent l'eau et le cuivre.



Dans les résultats obtenus, on a observé une augmentation significative du pourcentage des élèves qui interprètent le changement chimique comme une recombinaison d'éléments, tout au long du curriculum du secondaire, mais la confusion entre corps composé et mélange d'éléments (en tant que corps simples) persiste. Ainsi, seulement 28% des élèves du groupe contrôle de COU qui identifient les éléments du composé initial (CuO) donnent une interprétation correcte du processus, alors que 53% des élèves donnent des explications dans lesquelles il est considéré comme un mélange de cuivre et d'oxygène de telle sorte qu'en le chauffant l'oxygène s'évapore. Considérons l'une de ces réponses :

Elève A : "Quand on chauffe la poudre noire O se dégage et elle se transforme en Cu. Le O dégagé s'unit au H qui passait dans le tube et il donne lieu au H_2O ".

l'absence d'une conception de la réaction chimique en tant qu'interaction de substances

L'absence d'une conception de la réaction chimique en tant qu'interaction des substances est fréquente, et donne lieu à une interprétation en termes de formation des produits par des processus indépendants, ainsi qu'on peut le noter dans la réponse suivante, produite par un élève de groupe contrôle.

Elève B : "La réponse au fait que l'hydrogène se convertisse en vapeur d'eau est qu'au contact de l'hydrogène avec l'oxygène produit par l'action de la bougie, la réaction chimique se produit et il se transforme en eau. Et la réponse au fait que la poudre noire se convertisse en cuivre est qu'en chauffant la poudre et en établissant le contact avec l'hydrogène, la poudre s'oxyde et laisse place au cuivre."

Dans tous les cas, la moitié des élèves qui commencent COU ne savent pas interpréter un processus chimique en termes de recombinaison des éléments (en tant que catégories d'atomes), tandis que les élèves de l'échantillonnage expérimental, avec seulement un cours d'apprentissage de la Physique et de la Chimie par des activités de recherche, le font pour 72% d'entre eux, donnant 64% de réponses correctes.

utilisation des
idées à titre
d'hypothèses

Non seulement les élèves des groupes expérimentaux donnent un pourcentage plus élevé de réponses correctes, mais encore, comme nous l'avons montré pour quelques items, leurs réponses présentent des différences quant à l'explicitation de certains aspects méthodologiques caractéristiques de la connaissance scientifique. Ainsi, dans les réponses des élèves des groupes expérimentaux présentées ci-après, on peut apprécier comment des arguments détaillent leur réponse, explicitant l'idée clef pour l'interprétation du phénomène décrit : la conservation des éléments (en tant que catégories d'atomes). On peut donc évaluer une attitude de recherche qui utilise les idées à titre d'hypothèses et qui envisage plusieurs possibilités. Ainsi, l'élève C prend en considération également la possibilité qu'il y ait eu de l'oxygène dans l'air du tube, mais elle l'écarte pour la raison qu'elle est incohérente par rapport à l'information disponible, et elle conclut en accord avec l'information dont elle dispose, que nécessairement la poudre noire "doit contenir de l'oxygène et du cuivre".

Elève C : "Si à la fin nous avons de l'hydrogène, de l'oxygène et du cuivre, et au début de l'hydrogène et de la poudre noire, cette poudre doit comporter du cuivre et de l'oxygène. S'impose également à moi l'idée que l'oxygène se trouvait déjà dans le tube, mais je crois qu'il devait y en avoir dans la poudre noire, parce que sinon, dans le premier cas (dans le premier schéma) on n'aurait pas dit qu'il y a de la poudre noire mais du cuivre en poudre, comme à la fin."

le plus grand
nombre des
réponses
correctes est lié à
la connaissance
méthodologique

A notre avis, si le pourcentage de réponses correctes à cet item, comme aux autres items, est plus élevé dans le groupe expérimental, c'est qu'ils est intimement lié à cette connaissance méthodologique qui semble faire défaut aux élèves non sujets d'expérimentation, ou que du moins ils ne manifestent explicitement. Par exemple, nous trouvons dans les réponses des élèves des groupes expérimentaux des explications détaillées du mécanisme de l'interaction entre les particules caractéristiques des réactifs (voir l'explication de l'élève E). Il faut souligner que la sélection et l'organisation des contenus ont été réalisées en prenant en compte les difficultés épistémologiques dans la construction des modèles de la matière, en insistant au cours du processus d'apprentissage sur la clarification des distinctions entre le registre empirique macroscopique et le registre atomiste et en

essayant que soient données des interprétations différenciées des phénomènes à partir des deux points de vue.

Elève E : "Il arrive que, lorsqu'on chauffe, les particules du composé pur acquièrent plus d'énergie et au passage des atomes d'hydrogène l'un des éléments qui forment le composé chimique qui est l'oxygène subit des forces d'attraction plus intenses que celles qui s'établissent entre l'oxygène et le cuivre, donnant lieu à l'apparition du cuivre d'un côté et de l'eau d'un autre côté".

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les résultats obtenus à ces épreuves expérimentales constituent un début de preuve de ce que l'application d'un enseignement dispensé selon les orientations de l'apprentissage comme activité de recherche permet aux étudiants la construction d'idées à propos du concept de réaction chimique dans un pourcentage significativement supérieur à celui des élèves qui reçoivent un enseignement "transmissif". Quoiqu'il en soit, il conviendra cependant de mettre en oeuvre d'autres projets élargissant ces enseignements expérimentaux à de nouveaux groupes d'étudiants et à des professeurs formés dans ce sens pour contrôler plus largement l'hypothèse de travail.

Il a été d'autre part montré, dans cette étude, que les élèves des groupes de contrôle augmentent grâce à l'enseignement leur bagage de connaissances significatives relatives au modèle atomique de la matière, mais que leur compréhension reste très déficiente, en particulier dans les cas où le contenu scientifique interfère avec leurs idées alternatives fortement liées à l'expérience, certaines d'entre elles persistant dans des pourcentages élevés. Se détachent en particulier l'idée de réaction chimique comme simple mélange de substances, la confusion entre mélange de corps simples et composés chimiques, la diminution de la masse au cours des transformations dans lesquelles s'obtiennent des gaz, etc. Il a été également constaté que d'autres idées importantes leur font défaut telles que la conception de la réaction chimique comme recombinaison des éléments (identifiés comme ensembles d'atomes) présents dans les réactifs, ou des savoir-faire de base comme peuvent l'être l'utilisation de preuves et celle d'essais permettant de définir opérationnellement s'il existe ou non un changement de substance dans un processus. Les représentations atomistes qu'utilisent les étudiants pour interpréter la réaction chimique sont également déficientes.

Les résultats obtenus dans le groupe expérimental sont supérieurs sur le plan cognitif. On a également constaté que

l'enseignement par la recherche permet d'améliorer les connaissances significatives

les idées alternatives des "élèves contrôle" persistent

le rôle du
professeur en
tant que
chercheur dans
l'action

l'enseignement par la recherche peut également permettre d'atteindre de meilleures conditions d'apprentissage sur le plan affectif que dans les groupes de contrôle (Bell et Pearson, 1992). Cependant, les résultats ont été insuffisants sur certains aspects, comme par exemple dans les apprentissages liés à l'item 7, et cela impliquera la nécessité de modifier légèrement le plan d'instruction. Cette révision de l'enseignement entre dans la dynamique propre du modèle d'apprentissage proposé. Le rôle du professeur acquiert, dans ce modèle, une importance particulière quant à son propre développement professionnel dans la mesure où il se convertit en un chercheur dans l'action qui, au travers des interactions éducatives et des échanges avec des équipes d'enseignants, effectuera sa propre réflexion critique et perfectionnera son action éducative (Furió, 1992). Cependant, il faut tenir compte de ce que le modèle d'apprentissage en tant qu'activité de recherche qui a été appliqué ici à l'enseignement de la réaction chimique est une hypothèse qui devra être réfutée ou non par la pratique enseignante, non seulement dans ce domaine mais aussi dans d'autres domaines d'enseignement de la Physique-Chimie. Et de là de nouveaux problèmes pour la recherche !

Carles J. FURIÓ

Departament de Didàctica de les Ciències
Experimentals i Socials
Universitat de València

Juan BULLEJOS

Instituto de Bachillearto "Albayzin"
Granada

Esteban DE MANUEL

Departamento de Didáctica de las
Ciencias Experimentales
Universidad de Granada

BIBLIOGRAPHIE

ALONSO M., GIL D. y MARTÍNEZ TORREGROSA J., 1992, Los exámenes de Física en la enseñanza por transmisión y en la enseñanza por investigación, *Enseñanza de las Ciencias*, 10 (2), 127-138.

ASTOLFI J.P., 1994, El trabajo didáctico de los obstáculos, en el corazón de los aprendizajes científicos, *Enseñanza de las Ciencias* 12 (2), 206-216.

ASTOLFI J.P. et VÉRIN A. (coord.), 1985, *Formation scientifique et travail autonome* (INRP : Paris).

ASTOLFI J.P. et DEVELAY M., 1989, *La didactique des Sciences* (PUF : Paris).

BACHELARD G., 1978, *La filosofía del no* (Amorrortu : Buenos Aires).

BELL B. and PEARSON J., 1992, 'Better learning', *International Journal of Science Education*, 14 (3), 349-361.

BULLEJOS J., de MANUEL E. y FURIÓ C., 1993, ¿Sustancias simples y/o elementos? Usos del término "elemento químico" en los libros de texto. Comunicación presentada al IV Congreso Internacional de Investigación en la Didáctica de las Ciencias y de las Matemáticas, *Enseñanza de las Ciencias*, Vol. extra IV Congreso, 217-218.

BULLEJOS J. y SAMPEDRO C., 1987, *Construir los conocimientos de Física y Química. Propuesta para el aprendizaje en la Enseñanza Secundaria* (Elzevir : Vélez-Málaga, 1992).

CHAMPAGNE A.B., GUNSTONE R.F. et KLOPPER L.E., 1985, "Effecting changes in cognitive structures among physics students". In West L.H.T. and Pines A.L. (Eds) *Cognitive structure and conceptual change* (Orlando F.L. Academic Press).

DRIVER R. and OLDHAM V., 1986, "A constructivist approach to curriculum development in Science", *Studies in Science Education*, 13, 105-122.

FURIÓ C., 1992, ¿Por qué es importante la teoría para la práctica de la educación científica?, *Aula de Innovación Educativa*, 4-5, julio, 5-11.

FURIÓ C., HERNANDEZ J. and HARRIS H., 1987. Parallels between adolescents' conception of gases and the history of Chemistry, *Journal of Chemical Education* 64, (7), 617-618.

FURIÓ C. et GIL D., 1978, *El Programa-guia : una propuesta para la renovación de la Didáctica de la Física y Química en el Bachillerato* (ICE Universidad de Valencia : Valencia).

GAGLIARDI R., 1988, Cómo utilizar la historia de las Ciencias en la enseñanza, *Enseñanza de las Ciencias*, 6 (3), 291-296.

GARRET H.F., 1983, *Estadística en Psicología y Educación* (Paidós : Barcelona).

GIL D., 1993, Apprendre les Sciences par une démarche de recherche scientifique, *Aster*, 17, 41-64.

GIL D., CARRASCOSA J., FURIO C. et MTNEZ-TORREGROSA J, 1991, *La enseñanza de las ciencias en la educación secundaria* (Horsori : Barcelona)

GIL D. y MTNEZ-TORREGROSA J, 1987, Los programas-guía de actividades : una concreción del modelo constructivista de aprendizaje de las ciencias, *Investigación en la Escuela*, 3, 3-12.

HOLTON G. y ROLLER D., 1963. *Fundamentos de la Física Moderna* (Reverté : Barcelona).

MARTINAND J.-L., 1986, *Connaître et transformer la matière* (P. Lang : Berne).

ORLANDI E., 1991, Conceptions des enseignants sur la démarche expérimentale, *Aster*, 13, 111-132.

POZO J.I., 1989, *Teorías cognitivas del aprendizaje* (Morata : Madrid).

WHEATLEY G.H., 1991, Constructivist perspectives on Science and Mathematics learning, *Science Education*, 75(1), 9-21.

LE CONCEPT DE RÉACTION CHIMIQUE EN GESTATION

Entre les affinités électives et l'attraction universelle

Maurice Padeloup
André Laugier

Dès son élaboration en tant que science, au début du XVIII^e siècle, la chimie s'affirme comme science des réactions, plutôt que comme science de la matière qui aurait pu alors n'être qu'une branche de la physique. Ayant ensuite vigoureusement contesté les théories corpusculaires de la matière, c'est de la thermodynamique, science non newtonienne, que la chimie va tirer les lois qui régissent les réactions chimiques à l'échelle macroscopique. Cette histoire du concept de réaction chimique, tel qu'il s'est forgé lentement au cours des siècles peut être l'occasion pour le didacticien de jeter un regard récurrent sur les tâtonnements et les errements d'une pensée scientifique en gestation. Ce regard peut-il suggérer des hypothèses fructueuses pour étudier les obstacles rencontrés par les élèves ?

comme toute science la chimie s'est construite par une suite de "percées" épistémologiques qu'il est utile d'élucider

Le Siècle des Lumières est aussi le siècle de la chimie, celui au cours duquel, de Stahl à Lavoisier, se sont accumulés les résultats et déroulés les affrontements qui ont permis de construire des bases solides pour cette science devenue autonome. Mais, tout au long du XIX^e siècle, les obstacles vont se multiplier, plongeant les chimistes dans le doute et divisant leur communauté. Pour Bachelard (1) c'est cette *dialectique des obstacles épistémologiques et des actes épistémologiques* qui va permettre à la chimie d'accéder à la rationalité scientifique d'une science adulte. Nous faisons l'hypothèse que c'est dans l'étude de ces "*saccades du génie scientifique*" (2), que le didacticien pourra trouver une aide pour analyser les difficultés des élèves. Rappelons aussi que pour Bachelard (3) "*la notion d'obstacle épistémologique pouvait être étudiée dans le développement historique de la pensée scientifique et dans la pratique de l'éducation*". Plus récemment A. Kerlan (4) affirmait que c'est autour de la notion de représentation que s'organise une bonne part des convergences de la didactique des sciences et de

(1) BACHELARD G. Conférence au Palais de la Découverte (1951) citée par D. LECOURT dans *Bachelard - Epistémologie*. Paris. PUF. 1971.

(2) BACHELARD *ibidem* 1

(3) BACHELARD G. *La formation de l'esprit scientifique*. Paris. Vrin. 1938. p.17.

(4) KERLAN A. "Didactique et épistémologie : éclairages bachelardiens". *Aster* n° 5. 1987.

l'épistémologie historique restitue ses racines et son épaisseur dans le temps au "produit fini" du savoir enseigné, qu'elle rend plus tangible

l'épistémologie historique bachelardienne, soulignant aussi que c'est dans leur histoire et dans l'éducation "*que les sciences retrouvent toute une matérialité que dissimulent les formes dominantes du rationalisme*".

C'est donc une convergence d'arguments qui nous autorise à penser que les tâtonnements d'une science à ses débuts peuvent nous informer sur les difficultés rencontrées par les élèves. Si, selon la belle formule de Piaget, *comprendre c'est inventer*, il doit être utile pour la didactique de chaque discipline de savoir comment ses fondements ont pu être élaborés.

En ce qui concerne la chimie, elle se définit aujourd'hui comme **la science de la matière et de ses transformations**. Si ces deux aspects se concilient bien aujourd'hui il n'en a pas toujours été ainsi à ses débuts.

1. LE CONCEPT DE RÉACTION CHIMIQUE ET LE STATUT ÉPISTÉMOLOGIQUE DE LA CHIMIE DÉBUTANTE

Les transformations qu'étudie la chimie, à savoir les réactions chimiques, sont radicalement différentes de celles qui s'observent le plus couramment dans la nature. Elles manifestent des capacités particulières d'interaction entre certaines substances, irréductibles aux lois de la dynamique des processus continus et réversibles (tels que par exemple les changements d'état).

Le problème de la nature et de l'objet (5) de la chimie se trouve alors posé.

grave dilemme pour la chimie débutante : sera-t-elle une science de la matière, ou bien une science des réactions ?

- S'agit-il d'une science de la matière qui devrait être considérée comme une branche de la physique ? La mécanique des forces d'attraction de Newton s'affirmant comme triomphante, certaines tendances de la chimie cherchent à l'aligner sur une science de la matière d'obédience newtonienne. Tout se ramènerait alors à des attractions variables entre les particules constitutives, dont il suffirait de reconnaître les différents modes d'arrangement possibles. Les réactions chimiques seraient alors des processus parmi les autres et de même nature.

- S'agit-il d'une science des réactions relevant d'une discipline autonome ? Cette voie est celle qui s'est affirmée en

(5) Remarquons, dans cet ordre d'idées, que nous savons aujourd'hui que les propriétés chimiques (et la plupart des propriétés physiques) des substances viennent de la distribution des électrons à l'intérieur des atomes et des molécules. Or, dans les atomes des éléments de l'écorce terrestre, c'est en moyenne 99,97 % de la matière qui se trouve concentrée dans les noyaux. C'est donc avec une minorité agissante de seulement 0,03 % de la matière qui entraîne le reste que se réalisent les transformations de la chimie !

chimie depuis ses débuts et qui prend en compte le caractère spécifique des réactions chimiques par rapport à l'ensemble des transformations de la matière. Cette spécificité se vérifiera tout au long du XVIII^e siècle par la publication de *tables d'affinité* toujours plus précises et plus complètes.

La chimie sera-t-elle une branche de la physique newtonienne ou une science autonome non newtonienne ? Tel est donc l'enjeu majeur qui s'impose vers les années 1800.

2. LES ÉLÉMENTS-PRINCIPES, L'AFFINITÉ ET L'ÉLÉMENT CHIMIQUE

Très tôt on remarque les réactions de déplacement des acides ou des métaux dans leurs sels, et de double décomposition réciproque des sels en solution. L'idée s'affirme que certains éléments tendent systématiquement à s'apparier, jusqu'à se séparer d'un partenaire qui les attire moins dans une autre combinaison. Le concept d'affinité naît du souci des premiers chimistes de déchiffrer les règles de ce jeu des "amours" et des "haines" moléculaires, héritées d'Empédocle, mais qui leur paraissent stables, précises et compréhensibles.

2.1. L'élément-principe à l'appui de l'affinité

La doctrine des affinités, concept clé qui spécifie la chimie et dont l'idée remonterait à Albert le Grand, s'est développée parallèlement à celle du phlogistique. C'est en effet Stahl au début du XVIII^e siècle qui prend en compte le fait que de nombreux corps se combinent alors que rien ne semble les y prédisposer. En particulier ils échappent au fameux principe de similitude (*qui se ressemble s'assemble ...*) auquel on se réfère volontiers à cette époque. Si ces corps réagissent malgré tout c'est qu'ils échangent quelque chose de matériel.

Lors des réactions de combustion ou de calcination des métaux il y a libération d'un élément-principe : le *phlogistique*. Ce dernier s'ajoute donc aux précédents déjà classiques (soufre, sel, mercure). Avec cette théorie une bougie allumée, placée sous un vase s'éteint non par privation d'un élément aérien mais par saturation en phlogistique de l'atmosphère du vase (6).

(6) Derrière cette difficulté à interpréter correctement la combustion il y a aussi l'incapacité des premiers chimistes à concevoir l'état gazeux comme un état de la matière, et l'air comme un mélange. Cet obstacle fait partie des obstacles persistants que rencontrent tous les jeunes élèves confrontés à ce type de situation. (Voir l'article de LAUGIER et PASDELOUP dans ce numéro sur la combustion de la bougie à l'école élémentaire)

les tables
d'affinités
comme premier
outil de la
chimie-science
des réactions

Le succès de ces tables culmine avec celles qui furent établies par Bergman en 1775, et qu'il tira de la comparaison de nombreuses réactions effectuées par *voie sèche* (entre solides ou corps fondus) et par *voie humide* (en solution) et de résultats d'analyses quantitatives sur 59 substances représentant un potentiel de 30 000 expériences distinctes. Il ne faut pas se méprendre sur l'intitulé que ce dernier leur a donné (*affinités chimiques ou attractions électives*). Bien que leur auteur se déclare acquis à la théorie de la gravitation universelle, ces attractions électives ne sont pas celles que décrivent les fonctions continues de Newton ou de Laplace. Elles traduisent au contraire la nécessité de traiter chaque réaction chimique comme un état discret, reproductible mais spécifique. La chimie serait alors une science des réactions, plutôt qu'une science de la matière.

2.3. L'affinité peut-elle se mesurer ?

Il y eut en outre au cours de ce même XVIII^e siècle plusieurs tentatives faites en vue de mesurer les affinités. Ceci dès 1700 où Homberg essaya de mesurer les quantités de base nécessaires pour neutraliser différents acides. En 1777, Wenzel essaya de déterminer les proportions de métaux dans les acides pour qu'il y ait dissolution. Enfin, Kirwan en 1781 avance l'idée que les poids de base nécessaires pour neutraliser un poids donné de différents acides pourraient être une mesure de l'affinité de ces acides pour les bases. Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle ce fut la quantité de chaleur dégagée au cours des réactions qui fut utilisée par Thomsen entre 1850 et 1860 comme mesure de l'affinité entre les réactifs. Berthelot crut, à tort, pouvoir généraliser ces résultats en dehors des lois de la thermodynamique, sous le nom de *principe du travail maximum*.

la quantité de
chaleur n'est pas
le bon
paramètre...

2.4. Les premières lois quantitatives de la réaction chimique

C'est Richter qui structura et systématisa ces ébauches de lois pondérales. Il dressa une table des nombres des parties des différents acides nécessaires pour neutraliser 1 000 parties de base. L'attention très poussée qu'il porta à l'étude des réactions de double décomposition entre sels neutres, le conduisit à poser des équivalences entre les *parties acides* et les *parties basiques* à l'intérieur d'un même sel et d'un sel à l'autre. Et, peut-être à cause de sa volonté affirmée de tout ramener à des relations mathématiques, il forgea le mot et le concept de *stœchiométrie* avec sa fameuse loi dite des *nombres proportionnels* : les quantités de deux corps A et B qui se combinent à un troisième corps C sont dans un rapport simple avec les quantités de A et B qui se combinent entre elles.

mais la loi,
générale et
abstraite, de la
stœchiométrie
des réactions
suffit pour
"équibrer les
réactions
chimiques"

Les résultats obtenus sur des composés chimiques simples permirent à Proust, élève de Rouelle comme Lavoisier, de

formuler plus clairement, vers 1808, la *loi des proportions définies* : deux corps simples se combinent toujours dans les mêmes proportions lorsqu'ils forment un même composé, lui-même défini par une composition fixe.

2.5. La dérobade de Lavoisier et l'audace de Mendeleïev

• *Le calorique se substitue au phlogistique*

Dans son célèbre *Traité élémentaire de Chimie* publié en 1789, Lavoisier élude la question des affinités au même titre que celle de l'élément chimique, en alléguant l'état d'avancement insuffisant de la chimie de son époque par rapport à l'idéal mathématique qu'il lui propose, et lui oppose...

Ce qui ne l'empêche pas de développer largement, et particulièrement dès le début de ce même traité, sa théorie du *calorique* comme *matière de la chaleur* alors que la chimie n'est pas plus avancée dans ce domaine (le calorimètre de Lavoisier et Laplace a fourni des données mais aucune indication sur la nature de la chaleur, sinon qu'il confirme le paradoxe d'une matière de la chaleur que les deux auteurs sont bien obligés de considérer comme *impondérable*).

Document 2

I.		II
SUBSTANCES NON DÉCOMPOSÉES.		MISES A L'ÉTAT PAR LE CA
NOMS NOUVEAUX, OU ADOPTÉS.	NOMS ANCIENS.	NOMS NOUVEAUX, OU ADOPTÉS.
1 Lumière.		
2 Calorique.	<i>Chaleur latente, ou matière de la chaleur.</i>	
3 Oxygène.	<i>Base de l'air vital.</i>	Gaz oxygène. <i>Nota. Il paroît que la lumière concourt à le mettre en état de gaz.</i>
4 Hydrogène.	<i>Base du gaz inflammable.</i>	Gaz hydrogène.
5 Azote, ou Radical azotique.	<i>Base de l'air phlogistique, ou de la moitié atmosphérique.</i>	Gaz azotique.
6 Carbone, ou Radical carbonique.	<i>Charbon pur.</i>	

Fac-similé d'une partie du tableau joint au mémoire de Lavoisier sur la nouvelle nomenclature

Pour quelle raison un scientifique aussi brillant et intrinsèque que Lavoisier a-t-il pu se contenter de substituer au *phlogistique*, qu'il avait si implacablement discrédité (7), cette hypothèse si peu justifiée du calorique comme fluide matériel cause de la chaleur ?

Apparemment parce qu'elle prenait place dans le cadre de la théorie des attractions newtoniennes. Pour lui, *les molécules des corps peuvent être considérées comme obéissant à deux forces, l'une répulsive, l'autre attractive, entre lesquelles elles sont en équilibre.*

Cette force répulsive qu'il faut bien faire intervenir comme antagoniste de l'attraction universelle pour expliquer les changements d'état ainsi que l'ensemble des réactions chimiques (décompositions et synthèses) n'est pas pour Lavoisier une action à distance comme l'attraction de Newton. Elle *résulte des efforts du calorique qui tend à écarter les molécules de tous les corps de la Nature*, tout en suggérant plus loin qu'*il est probable que l'écartement des molécules des corps par le calorique tient de même (que l'attraction réciproque des molécules) à une combinaison de différentes forces attractives...*

Lavoisier distingue le calorique libre, qui n'est engagé dans aucune combinaison, de ce qu'il appelle le *calorique combiné, qui est enchaîné dans les corps par la force d'affinité ou d'attraction, et qui constitue une partie de leur substance...* N'oublions pas que pour lui, les gaz résultent de la combinaison d'une *base* hypothétique avec le calorique. C'est le cas en particulier pour l'oxygène qui, lors des combustions, libère son calorique.

Lavoisier engage le problème de la réaction chimique dans une impasse, mais il reste suffisamment substantialiste pour ne pas abandonner la chimie à l'interactionisme radical impliqué par la mécanique newtonienne et qui subvertirait nécessairement les tables d'affinités (cf. Berthollet, 3.2).

• **Un acte épistémologique majeur :**
l'élément chimique et le tableau de Mendeleïev

En 1869, le chimiste russe affirme, à contrepied de la confusion entretenue depuis Lavoisier, la distinction entre corps simple et élément chimique. Avec Mendeleïev l'élément devient l'individualité chimique sous-jacente présente dans tous les corps de la chimie qu'ils soient simples ou composés, connus ou à découvrir. Avec son tableau périodique,

(7) Il est intéressant de rapprocher ce que disait Lavoisier pour tourner en dérision le phlogistique "*tantôt ce principe est pesant, tantôt il ne l'est pas, tantôt il est le feu libre et tantôt il est le feu combiné avec l'élément terreux, (...), tantôt il perce les pores des vaisseaux, tantôt ils sont perméables pour lui, (...), c'est un véritable protéé qui change de forme à chaque instant*" ; et ce qu'il écrivait pour présenter le Calorique : "*C'est un fluide très subtil, très élastique, qui environne de toutes parts la planète que nous habitons, qui pénètre avec plus ou moins de facilité les corps qui la composent, et qui tend, lorsqu'il est libre à se mettre en équilibre dans tous*".

Lavoisier et
l'impasse du
calorique :
un obstacle
substantialiste
délibérément
accepté

Mendeleïev réussit un coup de force exemplaire tout à fait payant pour la chimie

"loi devenue table, (...), ce n'est pas en allant au-delà de l'image ou du paysage chimique, ni en deçà, qu'auront lieu, à l'avenir les découvertes, mais à mieux scruter les lignes ou les colonnes de cette sorte de temple, où se rendent les oracles." (8)

3. LES THÉORIES CORPUSCULAIRES, L'ATTRACTION UNIVERSELLE, LES ATOMES ET LES MOLÉCULES

Un courant pour transcrire les affinités chimiques en fonction des attractions purement newtoniennes s'était déjà dessiné avant Lavoisier, dans les positions des encyclopédistes comme d'Alembert et même d'un chimiste comme Macquer. En revanche, d'autres chimistes de l'époque défendirent la conception d'une chimie des réactions se situant en dehors des lois de l'attraction universelle. Ce fut le cas de Rouelle, auprès duquel se forma Lavoisier, et surtout de Venel, qui s'opposa à d'Alembert dans sa rédaction du chapitre *Chimie* de l'Encyclopédie.

La tendance à développer la chimie comme science de la matière avant de chercher à expliquer les réactions vient d'Angleterre avec Boyle, Newton et Dalton.

3.1. Le renouveau des conceptions corpusculaires

des modèles à particules indifférenciées qui n'excluent pas la transmutation

- Boyle (1627-1691) concevait la matière comme entièrement corpusculaire, à la manière de la théorie atomique des anciens Grecs. Les atomes, entités ultimes insécables, étaient les mêmes pour toutes les substances, et la matière se trouvait donc transmutable. Cette option n'était pas compatible avec celle de la majorité des chimistes de son temps, qui cherchaient à reconstituer les composés connus à partir de leurs éléments considérés déjà comme non transmutables.

C'est une explication mécanique des propriétés physiques et des réactions chimiques que Boyle chercha à substituer aux vieux concepts d'amour et de haine animant les substances. Pour lui, l'affinité découlait de la mutuelle adéquation de la forme et du mouvement des particules.

- Newton adopta les théories de la matière de Boyle, en y ajoutant l'attraction à distance entre les particules (qu'il n'appellera cependant pas *atomes*). Le génial fondateur de la mécanique classique s'intéressa beaucoup à la chimie, qu'il a pratiquée pendant toute sa carrière, jusqu'à en compromettre sa santé par une intoxication au mercure comme l'ont montré des analyses récentes faites sur une mèche de

(8) DAGOGNET F. *Tableaux et langage de la chimie*. Paris : Seuil. 1969, p. 99.

ses cheveux (9). Si sa contribution à la chimie est loin d'avoir été aussi décisive, il n'a cependant pas été l'alchimiste crédule dépeint par certains auteurs.

Ses conceptions sont exposées dans un appendice à son ouvrage d'optique publié en 1710. Elles visent, d'après le titre, à expliquer la nature des acides à partir d'une vision hiérarchisée de la structure de la matière suivant différents *degrés de composition*. Les réactions chimiques correspondent à la dissociation des agrégats d'un certain degré, jusqu'au terme ultime qui soit accessible à la chimie. Il ne se prononce pas sur la nature des forces attractives propres à la chimie, mais invoque *un esprit universel* d'origine électrique.

Bien que pour Newton la lumière soit de nature matérielle et corpusculaire, la chaleur pour lui est due aux mouvements violents des particules qui se trouvent projetées, en particulier lors des réactions chimiques.

Mais ses raisonnements sont développés sous forme d'une suite d'interrogations et de doutes sur les phénomènes de la chimie, qui tranchent avec la rigueur et les certitudes des *Principia*. Newton ne parvint pas à dériver les lois de l'attraction chimique, ni même les relations numériques simples la concernant.

Bien que n'ayant pas conduit à une explication satisfaisante de la réaction chimique, ces théories ont contribué à réactualiser la question de la structure de la matière, quelque peu éclipsée en chimie par le problème de l'affinité et par la controverse phlogistique-oxygène.

3.2. Les masses chimiques et les proportions continues

L'une des objections faites à l'assimilation des forces chimiques aux attractions de la mécanique et de la physique, se fondait sur la conviction que les entités élémentaires qui réagissent en chimie ne sont pas des masses au sens newtonien, et qu'il fallait trouver des lois spécifiques aux interactions de la chimie.

Pour répondre à cette objection, Berthollet, au tout début du XIX^e siècle, inventera la notion de *masse chimique*, et ira jusqu'au bout de l'option mécaniste et physicaliste que Lavoisier avait esquissée.

Berthollet définit la masse chimique comme le produit de l'affinité (qui lui paraît être une force de même nature que la gravitation) par la quantité de substance mise en jeu (sens qui perdure partiellement dans l'appellation actuelle de *loi d'action de masse*).

Les actions chimiques dépendent de la grandeur des masses chimiques en présence, mais aussi des forces de cohésion entre les molécules, elles-mêmes variables suivant les condi-

l'erreur manifeste de l'idée de la réaction chimique conçue comme un processus continu et réversible

(9) BROAD W.J., "Sir Isaac Newton : Mad as a Hatter", *Science*, 1981, 213, p. 1341-1344.

tions dans lesquelles la réaction chimique est réalisée : état physique, solubilité, concentration, température.

Ceci conduit Berthollet à deux conclusions qui sont en rupture avec la chimie de son temps comme avec la nôtre :

- les tables d'affinités sont inutiles ou illusoirs, puisque le résultat d'une réaction chimique ne dépend pas de propriétés propres aux réactifs mais des conditions physiques suivant lesquelles ils sont mis en présence ;
- les réactifs peuvent se combiner en proportions variables, et la composition des produits obtenus est aussi variable suivant les conditions de la réaction.

Berthollet développa sa théorie dans son *Essai de Statique Chimique* publié en 1803. Par ailleurs excellent chimiste, le premier rallié à la *nouvelle chimie* qu'avait fait triompher Lavoisier, bénéficiant de l'estime de Napoléon, sa conception de la réaction chimique pesa lourdement sur l'évolution de la chimie au début du XIX^e siècle.

erreur réfutée
par Proust

C'est Proust, entre 1801 et 1808, qui réfuta méthodiquement sa *loi des proportions continues* au moyen d'analyses très soignées effectuées dans son laboratoire de Madrid sous le mécénat du roi d'Espagne.

Mais les errements de la théorie de Berthollet ont bénéficié d'une grande indulgence dans la mémoire de la communauté scientifique. En lui attribuant l'intuition des équilibres chimiques on oublie sa négation de la stœchiométrie des réactions, et on enseigne encore sous le nom de *lois de Berthollet* (réaction complète en solution si un des produits est insoluble ou volatil) ce qui pour lui ne constituait que des exceptions à sa théorie des combinaisons en proportions variables. Et son refus de faire la distinction entre combinaison et dissolution a conduit à donner son nom aux alliages et composés non-stœchiométriques, les *berthollides*, qu'on distingue ainsi des composés chimiques normaux qu'on nomme *daltonides* en mémoire du chimiste anglais Dalton, promoteur de la théorie atomique.

3.3. L'affirmation du concept moderne d'atome

C'est Dalton qui actualise complètement à la fois le nom et le concept d'atome.

l'atome comme
objet physique
matérialisant
chaque élément
chimique

Ce n'est plus simplement un être abstrait conçu à l'appui d'un raisonnement, il est pour lui un objet physique à part entière, l'unité minimale de matière, qu'il pose d'emblée comme différent d'un élément à l'autre, ce qui exclut la transmutation. La réaction chimique se traduit alors par un nouvel arrangement entre les atomes, qui ne subissent eux-mêmes aucune modification. Dalton exposa les détails et les applications de ce qu'on allait appeler ensuite en chimie la théorie atomique, dans son livre *A New System of Chemical Philosophy* publié en 1808.

Document 3

EXPLANATION OF THE PLATES. 219

PLATE IV. This plate contains the arbitrary marks or signs chosen to represent the several chemical elements or ultimate particles.

Fig.		Fig.	
1	Hydrog. its rel. weight 1	11	Strontites - - - - 46
2	Azote, - - - - 5	12	Barytes - - - - 68
3	Carbone or charcoal, - 5	13	Iron - - - - 38
4	Oxygen, - - - - 7	14	Zinc - - - - 56
5	Phosphorus, - - - - 9	15	Copper - - - - 56
6	Sulphur, - - - - 13	16	Lead - - - - 95
7	Magnesia, - - - - 20	17	Silver - - - - 100
8	Lime, - - - - 23	18	Platina - - - - 100
9	Soda, - - - - 28	19	Gold - - - - 140
10	Potash, - - - - 42	20	Mercury - - - - 167
21.	An atom of water or steam, composed of 1 of oxygen and 1 of hydrogen, retained in physical contact by a strong affinity, and supposed to be surrounded by a common atmosphere of heat; its relative weight = 8		
22.	An atom of ammonia, composed of 1 of azote and 1 of hydrogen - - - - 6		
23.	An atom of nitrous gas, composed of 1 of azote and 1 of oxygen - - - - 12		
24.	An atom of olefiant gas, composed of 1 of carbone and 1 of hydrogen - - - - 6		
25.	An atom of carbonic oxide composed of 1 of carbone and 1 of oxygen - - - - 12		

Fac similé de la nomenclature et des poids relatifs des atomes

Extrait de : MASSAIN. *Chimie et chimistes*. Paris. Magnard. 1982. p. 151.

Pour Dalton un composé se forme par union d'un nombre entier d'atomes d'un élément avec un nombre entier d'atomes d'un autre élément, mais il pose en plus que lorsqu'on ne connaît qu'un seul composé de ces deux éléments il est obligatoirement binaire (voir le tableau ci-dessus pour la vapeur d'eau et l'ammoniac).

De sorte que si on transcrit les symboles qu'il a introduits et qu'on a utilisés pendant un temps pour représenter les éléments dans les listes de poids atomiques et dans les composés, l'eau s'écrivait OH et l'ammoniaque NH.

Ce n'est que lorsqu'on connaît plusieurs composés de deux mêmes éléments qu'il y a combinaison en *proportions multiples*, mais toujours définies par des rapports simples, contrairement à ce qu'affirme Berthollet.

Dalton pose aussi que la masse de l'entité élémentaire d'un composé est égale à la somme des masses des atomes qui la constituent.

Mais il appelle encore *atome* l'entité ainsi formée, de sorte que pour lui il n'y a que des atomes, que les corps soient simples ou composés !

Les résultats tirés de l'étude des réactions chimiques entre réactifs gazeux menée par Gay-Lussac entre 1805 et 1808, dans la lignée de la chimie des gaz brillamment engagée à la fin du XVIII^e siècle, confirmaient les *proportions définies*, mais sans privilégier les composés binaires. Aussi, Dalton n'accepta jamais que l'eau se forme par combinaison d'un volume d'oxygène avec deux volumes d'hydrogène.

3.4. Une hypothèse pour concilier Dalton et Gay-Lussac

Un pas décisif fut franchi en 1811 quand Avogadro tira la loi qui découlait des considérations de Dalton sur l'état gazeux mais que celui-ci refusait, à savoir que des volumes égaux de différents gaz contiennent, dans les mêmes conditions, le même nombre de molécules. Car pour Avogadro, il n'y a que des molécules : *molécules intégrantes* (pour nous les molécules tout court), et *molécules élémentaires* (pour les corps simples dont il postule que, dans le cas des gaz courants, ils peuvent être sous forme d'*atomes doubles*). Les réactions se font molécule à molécule, et il semble qu'alors tout aurait dû s'éclaircir, les théories de la structure de la matière et celles de la réaction chimique se rejoignant harmonieusement.

un demi siècle de confusion sur le mécanisme de la réaction chimique, alors que les bonnes hypothèses ont été formulées

Mais il se trouva que les hypothèses d'Avogadro, pourtant publiées en français (*Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molécules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans les combinaisons*) et formulées indépendamment par Ampère en 1814, restèrent complètement ignorées jusqu'en 1860 quand Canizzaro les explicita brillamment au congrès international de chimie de Karlsruhe.

3.5. L'opposition à la théorie atomique

J.B. Dumas d'abord favorable à la théorie atomique, mais ayant échoué dans sa détermination des poids atomiques, refusa catégoriquement toute pertinence à la notion d'atome en chimie. Ignorant l'hypothèse d'Avogadro et se référant seulement à Dalton, Dumas enferma la théorie atomique dans son fameux paradoxe, en déniaut au niveau microscopique tout parallèle possible avec la loi des combinaisons en volume.

D'après Gay-Lussac :

1 volume d'hydrogène + 1 volume de chlore = 2 volumes de HCl.

Dans le cadre de l'hypothèse atomique de Dalton ceci se traduit par :

1 atome d'hydrogène + 1 atome de chlore = 2 molécules de HCl

l'atome, un concept-paria pour la chimie

ce qui impliquerait que l'atome d'hydrogène et celui de chlore puisse se couper.

D'où les sarcasmes de Dumas fustigeant une théorie qui, après avoir posé les atomes comme insécables, les oblige à se partager pour expliquer les réactions chimiques.

Dumas ignore aussi, comme la plupart des chimistes, qu'un de ses collègues a tout compris.

Le chimiste français Gaudin a en effet proposé dès 1833 une interprétation parfaitement cohérente et rigoureuse des réactions de ce type, en même temps qu'une définition précise des mots atome et molécule qui permet de les distinguer clairement (10).

S'enfermant dans une attitude strictement positiviste, les chimistes français suivent Dumas (11) dans son refus de la théorie atomique.

Vers 1840, celle-ci est délaissée au profit de raisonnements qui ne se basent que sur les résultats d'analyse pondérale et sur la loi des nombres proportionnels, évitant ainsi toute hypothèse sur la structure particulière de la matière (12).

Cette démarche conduisit à différents systèmes d'équivalents chimiques dont on ne parvint pas à tirer la bonne base, ce qui entretint une confusion croissante jusque vers 1865 où les résultats d'une grande précision obtenus par Stas stabilisèrent enfin les données de référence.

De concurrents qu'ils furent d'abord, les équivalents chimiques devinrent progressivement synonymes des *poids atomiques*, ce qui permit aux antiatomistes attardés comme Berthelot de ne pas perdre la face.

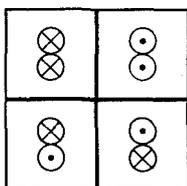
(10) "Nous établirons donc une distinction bien tranchée entre les mots atome et molécule, et cela avec d'autant plus de raison, que si jusqu'à ce jour on n'est pas parvenu aux mêmes conclusions que moi, c'est uniquement faute d'avoir établi cette distinction : un atome sera pour nous un petit corps sphéroïde homogène, ou point matériel essentiellement indivisible, tandis qu'une molécule sera un groupe isolé d'atomes, en nombre quelconque et de nature quelconque". GAUDIN A., *Annales de Chimie et de Physique*. 1833. t. LII p.113.

(11) En 1836 dans ses *Leçons sur la philosophie chimique* J.B. Dumas écrira "Que nous reste-t-il de l'ambitieuse excursion que nous nous sommes permise dans la région des atomes ? Rien, rien de nécessaire du moins. Ce qui nous reste c'est la conviction que la chimie s'est égarée là, comme toujours, quand, abandonnant l'expérience elle a voulu marcher sans guide au travers des ténèbres. (...) Si j'en étais le maître j'effacerais le mot atome de la science, convaincu qu'il va plus loin que l'expérience et jamais en chimie nous ne devons aller plus loin que l'expérience".

(12) En 1877 lors d'une controverse avec Wurtz, Berthelot taxera de "conception mystique la combinaison d'un atome avec lui-même".

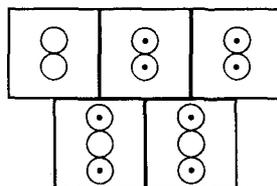
Document 4

Figure I
Chlore et hydrogène



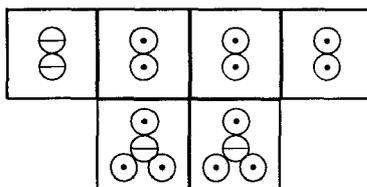
donnent gaz hydrochlorique

Figure II
Oxigène Hydrogène



Vapeur d'eau

Figure III
Azote Hydrogène



Gaz amoniac

A.-M. Gaudin, *Annales de Chimie et de Physique*, 1833, 52, 132-133.

Remarquons que Dumas rêve quand même de reconnaître les mouvements des petits systèmes qui constituent les corps et de soumettre ces petits mouvements au calcul, comme Newton l'a fait pour les corps célestes.

Alors les réactions des corps dans des circonstances données se prédiront comme l'arrivée d'une éclipse, et toutes les propriétés des diverses sortes de matière ressortiront du calcul.

Face à l'opposition obstinée de scientifiques aussi importants que Berthelot, Ostwald, ou Mach les chimistes ne reconnurent la réalité physique des atomes qu'au moment où ils ne méritaient déjà plus leur nom !

les atomes ne
sont plus
insécables

3.6. Vers un modèle électrostatique de la structure des molécules

Les phénomènes physiques qui focalisent l'attention à cette époque sont beaucoup plus du côté de l'électricité que de la gravitation. C'est ce qui conduisit Berzélius, maître à penser universel de la chimie pendant la première moitié du XIX^e siècle, à élaborer et maintenir sa théorie électrochimique

dans l'intimité de
la matière c'est
le "tout
électrique"

dite *dualistique*. Pour lui, l'affinité chimique, qui conduit deux corps à réagir, a pour origine des attractions électriques entre atomes chargés qui tendent à se neutraliser. Vers 1830, les raisonnements de Berzélius parviennent à englober de façon cohérente toute la chimie minérale, mais ils ne pourront pas s'appliquer à la chimie organique. On peut cependant estimer que ses conceptions trouvent certains prolongements dans la notion d'électronégativité et dans l'interprétation actuelle de certains mécanismes réactionnels.

Mais on est encore très loin de la description moderne des molécules qui selon la théorie des orbitales moléculaires résulte des interactions mutuelles entre l'ensemble des noyaux et l'ensemble des électrons (13).

4. LA RÉACTION CHIMIQUE : ÉNERGIE LIBRE, POTENTIEL CHIMIQUE, DYNAMIQUE MOLÉCULAIRE

Si malgré les aléas des affrontements entre atomistes et équivalentistes, la loi des combinaisons en proportions définies confirmée par Proust ne fut plus remise en cause, la notion d'affinité restait mal acceptée par des chimistes qui y voyaient la survivance de principes occultes incompatibles avec l'idéal d'une science positive et rationnelle. C'est ce que manifeste un Sainte Claire Deville, autre antiatomiste acharné, quand dans ses *Leçons sur l'affinité* il affirme en 1867 : *l'hypothèse de l'affinité ne nous sert donc à rien, si ce n'est à nous faire oublier notre profonde ignorance sur la cause des combinaisons chimiques ; et en nous cachant cette ignorance, elle nous empêche de la percer.*

Dans la deuxième moitié du XIX^e siècle, la thermodynamique, affranchie de l'impasse du calorique, s'affirme comme science typiquement non newtonienne. Et ce sont les lois tirées du deuxième principe qui permettent de prévoir et calculer les réactions chimiques au niveau macroscopique, ceci sans tomber dans le piège de l'*énergétisme* comme dernier avatar de l'antiatomisme.

Mais si, au XX^e siècle, l'école américaine de Lewis et Randall conduit à remplacer l'affinité par la variation d'*énergie libre* mise en jeu lors d'une réaction, l'école rivale belge de De Donder et Prigogine l'assimile à une *force chimique* dérivant d'un *potentiel chimique*, qui détermine le sens de la réaction et qui ne s'annule que lorsque le système atteint l'équilibre chimique, son état *attracteur*. L'affinité accède alors au statut privilégié de *fonction d'état* d'un système chimique. Pour Prigogine, cette affinité en langage moderne serait cepen-

la réaction
chimique est régie
par les "fonctions
d'état" de la
thermodynamique
elle se conçoit
donc d'abord
et presque
uniquement
à l'échelle
macroscopique

(13) PASDELOUP M. "Historique de la notion de liaison chimique".
L'Actualité Chimique, 1986, (8), p. 31-35.

au niveau
microscopique,
il n'y a que des
interactions entre
"cœurs"
atomiques positifs
et électrons

dant dans la droite ligne des anciennes affinités que les chimistes percevaient comme radicalement différentes des forces régies par les lois dynamiques de Newton.

Mais au niveau moléculaire, les méthodes de la chimie quantique ne permettent pas un suivi et une analyse capables de trancher sur la nature et l'origine de ce qu'on entend par *réaction chimique*. L'instant zéro en est toujours le moment où s'est produit une collision efficace (environ 1 sur 10^{15}) entre deux molécules de réactifs et où commence le *chemin réactionnel* qui, passant par un stade intermédiaire appelé *complexe activé*, aboutit aux produits de la réaction. Ceci se réalise par des changements de structure impliquant des mouvements d'atomes ou de groupes d'atomes.

Or, ce parcours au ras des minima des hypersurfaces de potentiel se calcule au moyen des équations du mouvement de la mécanique classique, et se trouve être du ressort de la *dynamique moléculaire*. Même s'il ne s'agit plus de l'attraction universelle, Newton n'a donc pas dit son dernier mot !

Le concept d'affinité, contemporain et frère jumeau du phlogistique, a bénéficié d'un bien meilleur sort que lui, puisqu'il aura survécu à toutes les crises et à tous les défis, jusque dans la chimie d'aujourd'hui, en la débordant même vers la biochimie et la biologie moléculaire où l'affinité d'une enzyme pour un substrat ou d'un ligand pour un récepteur est devenue un concept-clé.

La vitalité de ce concept et sa pertinence enfin reconnue viennent sans doute de ce que l'affinité est indissociable d'une chimie se développant en tant que science des réactions, autonome et capable de maintenir le nécessaire équilibre entre approche qualitative et analyse quantitative sur lequel elle s'est toujours fondée. Comme le signalait déjà Boerhaave (14) au début du XVIII^e siècle, c'est cette spécificité et cette dualité qui en font "*une science difficile à enseigner*".

(14) Boerhaave cité par Bachelard dans *La formation de l'esprit scientifique*, p. 244.

CONCLUSION

Nous avons suivi l'élaboration du concept de réaction chimique depuis que la chimie fonctionne en tant que science. Là comme ailleurs il apparaît clairement qu'il faut renoncer au mythe d'une science construite linéairement, avec la logique et la rigueur du savoir accompli. Les meilleures contributions n'ont pas été que positives, des percées géniales ont été ignorées sinon refusées.

Nous avons rappelé au début de cet article quelques-uns des arguments qui peuvent amener le didacticien à s'intéresser à l'histoire de sa discipline.

Les travaux menés en didactique de la chimie ces dernières années ont permis de repérer des obstacles auxquels se heurtent les élèves et les étudiants. À la suite de notre étude il paraît intéressant de noter les convergences très fortes entre certains de ces obstacles et les difficultés qu'ont dû vaincre les chimistes.

des obstacles
substantialistes et
mécanistes...

- Qu'il s'agisse d'obstacles d'ordre substantialiste : reconnaissance de l'état gazeux comme état de la matière (15), prise en compte de l'air dans les combustions (16), substantialisation de la chaleur et de la lumière (17), structure continue de la matière (18).

- Qu'il s'agisse d'obstacles d'ordre mécaniste : distinction entre atome et molécule, passage du microscopique au macroscopique, fonctionnement du modèle particulaire de la matière (19).

Dans l'obstacle substantialiste si on ne perçoit pas l'objet, on ne voit pas non plus sa fonction. Dans l'obstacle mécaniste l'objet est bien perçu mais on ne prend en compte qu'un nombre limité de degrés de liberté.

(15) SÉRÉ M.G. *Les conceptions de l'état gazeux chez les enfants de 11 à 13 ans*. Thèse de doctorat d'état. Paris. 1985.

(16) MARESCOT R. (1976). *Les combustions*. Rapport interne INRP.
MÉHEUT M. (1982). *Combustions et réactions chimiques dans un enseignement destinés à des élèves de sixième*. Thèse de troisième cycle. Université de Paris VII.

(17) Recherches non publiées de ANDERSON et RENSTRÖM (1981, 1988). Résultats cités dans RENSTRÖM L., ANDERSON B. et MARTON F. "Students' Conceptions of Matter". *Journal of Educational Psychology*. 1990, Vol. 82, 555-569.

(18) NAKHLEL M. 1992. "Why some students don't learn chemistry ?" *Journal of Chemical Education*. Vol. 69, Number 3. p. 191- 196.

(19) NOVICK S. & NUSSBAUM J. (1981) "Pupil's understanding of the particulate nature of matter. A cross-age study". *Science Education*, 62, p. 273-281.

BEN ZVI, EYLON, et SILBERSTEIN. (1982). "Student conceptions of gas and solid. Difficulties to function in a multi-atomic context". Paper presented in *NARST conference*.
ANDERSON B. "Pupil's Conceptions of Matter and its transformations (age 12 - 16)". *Studies in Science Education*, 18. (1990).

... persistants

Les objets de la chimie étant à la fois substantiels et fonctionnels nous comprenons mieux les insuffisances et les difficultés rencontrées par les chimistes et les élèves pour faire fonctionner le modèle particulaire de la matière.

Même si les situations (contexte historique, social, cognitif) ne sont pas les mêmes il apparaît nettement que certains **obstacles sont majeurs et persistants**. Il y a là pour le didacticien de la chimie un champ d'investigation prometteur car, comme le souligne J.L. Martinand (20), qu'il s'agisse des élèves ou des chimistes "*dans les deux cas leur franchissement est un changement de conception.*"

Maurice PASDELOUP
Chimie physique moléculaire,
Histoire et Philosophie des Sciences
LEMME
Université Paul Sabatier
Toulouse
André LAUGIER
Sciences physiques
IUFM d'Aquitaine
Bordeaux

BIBLIOGRAPHIE

AVOGADRO A., *Journal de physique*, 1811, p. 73, 58-76.

BERGMAN T., *Opuscules chimiques et physiques*, traduits par Guiton de Morveau, Dijon, 1780.

DUMAS J.-B., *Leçons sur la philosophie chimique*, 1836.

GAUDIN A.-M., *Annales de Chimie et de Physique*, 1833, p. 52, 132-133.

GOUPIL M., *Du flou au clair ? Histoire de l'affinité chimique de Cardan à Prigogine*, Editions du C.T.H.S., 1991.

GUEDON J.-C., "Le statut épistémologique de la réaction chimique de l'Encyclopédie à Gay-Lussac", *Actes du colloque Gay-Lussac*, École Polytechnique, 11-13 décembre 1978, p. 103-131.

LAVOISIER A.-M., *Traité élémentaire de chimie*, Cuchet, Paris, 1789.

LEICESTER H.-M., *The Historical Background of Chemistry*, Dover, New York, 1971.

MASSAIN R., *Chimie et chimistes*, Magnard, Paris, 1952.

NEWTON I., *Traité d'Optique*, Gauthier-Villars, Paris, 1955.

PRIGOGINE I. ET STENGERS I., *La Nouvelle Alliance*, NRF-Gallimard, Paris, 1979.

(20) MARTINAND J.-L. "Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ?" *Didaskalia*, n° 2. 1993.

LAVOISIER, PRIESTLEY, LE PHLOGISTIQUE ET L'OXYGÈNE

de l'étude de controverse à la réplication pédagogique

Jean-Paul Gaudillière

Utiliser l'histoire de la chimie pour enseigner la chimie est une perspective souvent évoquée, au nom des homologues supposées entre les processus d'apprentissage et les étapes d'élaboration des savoirs, mais rarement pratiquée. Une exception notable est la découverte de l'oxygène au XVIIIème siècle, que l'on a associée à l'enseignement des notions d'oxydation, de combustion et/ou d'élément. L'histoire utilisée est le plus souvent centrée sur l'expérience de calcination du mercure et de réduction de la chaux mercurique pratiquée par Lavoisier qui est considérée comme cruciale et ayant emporté la décision. Cette image de la découverte est historiquement contestable et sans grand bénéfice pédagogique. Des historiens et enseignants britanniques ont proposé une autre approche, centrée sur la réplication pédagogique des controverses. L'enjeu est d'aborder les conflits socio-cognitifs sous-jacents à l'apprentissage en utilisant les matériaux d'une histoire des sciences plus attentive aux situations d'incertitude et de choix, aux pratiques de laboratoire et aux contextes socio-culturels. On introduit ici les travaux historiques récemment consacrés aux activités de Lavoisier et Priestley ainsi qu'au débat sur le phlogistique et l'oxygène. On aborde ensuite les problèmes posés par leur exploitation dans un cours de chimie.

PRÉAMBULE

Un lycée polyvalent du nord de la France. Une classe de terminale F7 attend dans le couloir avant une séance de travaux pratiques de biochimie. À l'ordre du jour, la lecture de deux textes sur la fermentation alcoolique. Les commentaires vont bon train sur le vocabulaire incompréhensible : diastases, sucre inverti, teinte de passage, principe azoté... De fait les deux textes datent des années 1860, l'un est de Louis Pasteur, l'autre de Marcellin Berthelot. L'un plaide pour une interprétation chimique de la fermentation alcoolique, l'autre pour une explication microbienne de la production d'alcool. Temps de l'action : printemps 1988. Contexte : le Projet d'Action Éducative sur Pasteur associant les enseignants de philosophie, chimie et biologie.

Les élèves entrent en salle de travaux pratiques. Le professeur annonce qu'on va reproduire les expériences de Berthelot sur la saccharase de levure. Murmures sur le programme et le bac qui cèdent rapidement devant les explica-

dans le cadre
d'un P.A.E.
sur Pasteur

tions suggérant qu'on va par là retrouver beaucoup de choses sur les enzymes... charbonnier reste maître chez soi. La séance se déroule plutôt bien : peu de casse, tous les réactifs préparés à l'avance (par les techniciens) semblent au point, l'extraction de l'enzyme menée collectivement, c'est-à-dire par le professeur, avec une succession de broyage, centrifugation, précipitation, recentrifugation... donne même une préparation raisonnablement active.

réplication des
expériences de
Berthelot

On passe à la partie historique... et à la comparaison entre l'hydrolyse par la diastase et l'hydrolyse acide. Pour limiter les débats, le protocole de Berthelot a été réécrit pour "coller" avec les instruments utilisés ce jour : polarimètre, liqueur de Fehling. Témoins, variation des conditions de température, variation des quantités de saccharose, d'extrait enzymatique, d'acide succinique. Les propositions de modes opératoires émergent sans trop de difficultés de la lecture et des fragments retenus d'un récent cours d'enzymologie. Certes, il faut éliminer d'un revers de la main quelques propositions "saugrenues" (notamment l'idée de "tuer l'enzyme avec l'acide", on appréciera l'adéquation au contexte), mais tout démarre sans heurts. Deux heures plus tard toutes les incubations sont en route et les résultats s'accumulent jusqu'à la sonnerie libératrice.

il n'y a pas que
de bons témoins

Le lendemain à huit heures : reprise du travail. On effectue les dernières mesures au polarimètre et on dose les sucres réducteurs. La séquence prévoit de les discuter et de relire les textes de référence avant de lancer la seconde partie (un début de caractérisation chimique de l'enzyme). Chaque groupe vient écrire ses résultats au tableau. La situation devient confuse. Les solutions de sucre et d'acide succinique supposées montrer l'absence d'hydrolyse par les acides organiques à froid ont manifestement réagi. Réécriture des résultats, erreurs de manipulation... Avec un peu de doigté, on rétablit quelques cas mais il reste une série complète de témoins qui témoignent très mal... Pas moyen d'accuser les solutions de départ : aucune corrélation avec les diverses bouteilles... Pas moyen d'accuser le chauffage : les tubes sont restés dans un coin... On pourrait s'en sortir avec une erreur de numérotation... mais les élèves responsables ne veulent pas en entendre parler... Heureusement, le reste du groupe commence à faire pression dans le même sens, de plus le texte de M. Berthelot est là pour confirmer l'autorité du dire enseignant. Bref, la situation pédagogique est sauvée même si le modèle de constat des "faits d'expérience" se transforme en travail d'élimination des canards boiteux humains ou matériels.

La réplication une fois acceptée, on revient aux textes. La présentation de l'opposition entre catalyse biologique et effet de l'acide se déroule sans heurts : les rôles de la température, des concentrations... sont précisés conformément au modèle de cours. Le retour sur la discussion Pasteur/Berthelot est plein d'imprévus : Pasteur en prend pour son grade de ne pas avoir cru aux enzymes, je veux

la position de
Pasteur à bien
resituer dans son
époque

dire aux "diastases alcooliques"... Une intervention des autorités s'avère nécessaire pour rétablir un peu de distance et rappeler que les chimistes du milieu du XIX^{ème} siècle ne pouvaient pas rendre compte de la fermentation elle-même, sauf à postuler l'existence de diastases non isolées et qu'il a fallu attendre les recherches de Buchner pour obtenir une fermentation alcoolique à partir d'extraits de levure. Une fois le point ostensiblement accepté (voir la qualité du silence qui s'ensuit), un habile renvoi au prochain cours de philo où sera abordée plus globalement cette opposition entre vitalisme et chimisme permet de revenir à la deuxième série de manipulations.

Quinze jours plus tard. Tard dans la soirée, le professeur est à sa table de travail avec les copies du dernier contrôle de biochimie. La question "*Qu'est-ce qu'un enzyme ?*" est un franc succès : pour quelques "*une protéine catalysant une réaction chimique*" et quelques "*catalyseurs biologiques*" il trouve une foule de "*diastases*", de "*super-acides*", de "*microbactéries qui catalysent une réaction chimique*". La question "*Quelles sont les caractéristiques de la catalyse biologique ?*" est plus rassurante même si on y trouve de bien inquiétantes affirmations sur la vie des catalyseurs ("*les enzymes agissent à très petite dose et se divisent pendant la réaction*", ou "*les enzymes sont tués par la température*") et sur le chimisme du vivant (la catalyse biologique, "*c'est comme une réaction chimique mais en plus complet*").

1. POURQUOI PARLER D'HISTOIRE DE LA CHIMIE ?

La réaction chimique est une entité complexe, associant divers niveaux de pratiques expérimentales et de représentations. L'enseigner est loin d'être une opération triviale... surtout lorsqu'on en vient à associer chimie et organismes vivants, lorsque deux modes de représentation (et deux contextes disciplinaires) se heurtent dans l'esprit des élèves comme dans le nôtre. L'expérience ci-dessus partait de l'idée selon laquelle utiliser l'histoire de l'enzymologie illustrerait la difficile genèse des savoirs et apporterait des matériaux favorisant la compréhension des réactions chimiques du vivant et de leurs spécificités. Le premier objectif fut certainement atteint, le second probablement pas.

Etait-ce la faute des enseignants, de l'histoire choisie, ou plus généralement de l'incompatibilité entre les objets et méthodes de l'histoire des sciences et les contraintes de l'enseignement scientifique ? Il y a quelques années, ma réponse aurait consisté à plaider pour un dialogue destiné à produire une histoire des sciences en prise sur les enjeux didactiques. Aujourd'hui, fort de la participation à quelques expériences difficiles (dont la séquence ci-dessus), je répondrais volontiers par un constat d'incompatibilité car, à la

l'histoire des
historiens et celle
des chimistes

différence des enseignant(e)s, l'historien(ne) des sciences ne s'occupe pas (ou pas uniquement) des savoirs constitués : il s'occupe des savants, de leur vie sociale, culturelle, de leurs idées, de leurs laboratoires avec toutes les caractéristiques qui en font des lieux d'action. Lorsqu'il est question des concepts ou des expériences, il s'agit de productions situées dans le temps et l'espace ; il est question d'incertitude, de futur ouvert et de connaissances non stabilisées. Bref, la matière de l'historien, c'est **le temps et le changement, pas la vérité** à transmettre.

Il faudrait donc écarter toute interrogation du type : "À quoi l'histoire de la chimie peut-elle servir pour l'enseignement de la réaction chimique ?" comme une question mal posée et la remplacer par une question du type : "Qu'est-ce que l'histoire de la chimie nous apprend sur les conditions d'existence de quelque chose comme la réaction chimique ?". En conséquence, la place de l'histoire de la chimie serait avec les cours d'histoire ou de philosophie, pas dans les cours de chimie. L'introduction de l'histoire des sciences dans l'enseignement relèverait donc de deux types de démarche. D'abord, apporter des éléments de culture générale aux futurs praticiens de la science - de même que l'histoire politique donne une bonne discipline de réflexion aux futurs parlementaires ou diplomates. Il faudrait ainsi développer les séquences historiques dans les cours de philosophie pour mieux illustrer les procédures de découverte et les notions d'épistémologie. La seconde fonction devrait être de contribuer à la culture historique. Ainsi, connaître ce que la République a fait de ses savants et ce qu'ils ont fait de la République participerait de l'étude de la Révolution Française. De même, une présentation pédagogique de la deuxième révolution industrielle qui parle de l'électricité et de la production de masse devrait parler de l'électromagnétisme et des laboratoires de physique.

Régler la question de l'usage didactique de l'histoire des sciences par un simple déni est toutefois peu satisfaisant. Le propos sera ici de voir si on ne peut malgré tout pas mélanger les genres en acceptant de parler sérieusement d'histoire, c'est-à-dire des savants du passé et de leurs activités, sans pour autant abandonner les objectifs propres à un apprentissage de la chimie contemporaine. De savoir si on ne peut pas accepter les contraintes de la situation d'enseignement pour introduire les matériaux historiques comme des ressources permettant de construire des parcours pédagogiques ouverts, ne débouchant pas nécessairement sur une acquisition de connaissances mais sur la familiarisation avec des objets, des problèmes et des méthodes. Pour cela, on partira d'un exemple qui a été beaucoup plus travaillé aussi bien par les didacticiens et pédagogues que par les historien(ne)s (en particulier britanniques), à savoir la découverte de l'oxygène ou plutôt des débats qui, à la fin du XVIIIème siècle, mettent en scène l'oxygène et le phlogistique (1).

l'histoire de la chimie à n'aborder qu'en cours d'histoire ou de philosophie ?

... et pourquoi pas en cours de chimie ?

2. LE CONCEPT D'OXYGÈNE ET LA RÉACTION CHIMIQUE : ANATOMIE D'UN RÊVE PÉDAGOGICO-HISTORIQUE

En 1987, l'association britannique pour l'éducation scientifique avait organisé à Oxford une conférence sur l'enseignement de l'histoire des sciences dont le bilan aussi bien du côté des enseignant(e)s de science que des historien(ne)s était particulièrement pessimiste quant à la possibilité de passer de quelques expériences volontaristes isolées à des approches en "grandeur nature" (2). Deux ans plus tard, l'histoire des sciences entrait dans le programme national impulsé par le gouvernement de Margaret Thatcher (3). Non pas comme un outil pour l'enseignement des sciences mais comme moyen d'une approche critique de la science : pour mieux connaître la nature des idées scientifiques en abordant leurs conditions d'élaboration et les contextes d'application (4). On peut sans doute expliquer cette innovation par le fait qu'en Grande-Bretagne l'histoire des sciences est devenue une affaire d'historiens et de sociologues plus que de scientifiques ou de philosophes. Le plus important est toutefois qu'elle illustre un **pas de côté** par rapport à la vision utilitariste des relations entre histoire des sciences et pédagogie qui voulait que l'histoire serve en montrant comment, dans le passé, des difficultés similaires à celles des apprenants d'aujourd'hui ont pu être surmontées.

L'idée selon laquelle la "psychogénèse" des notions et concepts récapitule leur "genèse historique" a parfois pris des formes extrêmement schématiques (5). Son intérêt tient toutefois aux études de cas illustrant la complexité des résonances entre "obstacle épistémologique" (historique) et obstacle "socio-cognitif" (pédagogique) (6). Ces explorations des conceptions spontanées des apprenants, de leur agencement en réseau et en systèmes de connaissances ont permis de prendre la mesure des conflits qui résultent des résistances aux connaissances scolaires sans se contenter de constater qu'il y avait là quelque chose qui s'opposait à l'enseignement et dont il convenait seulement de **se débarrasser**. L'ambition est désormais d'identifier ces idées et modes de pensée pour construire une **démarche d'utilisation et de contournement**. En d'autres termes, il convient de remplacer une pédagogie spectaculaire, purement démonstrative, par une pédagogie de parcours et de découverte, de redonner une place à l'errance en utilisant les erreurs comme jalons d'un parcours cognitif. L'histoire peut alors intervenir de deux façons. D'une part, elle révèle toute la complexité des processus de cristallisation de connaissances et rend plus visibles les conflits liés à la définition d'un savoir. D'autre part, de façon plus ciblée, elle donne des matériaux pédagogiques basés sur les analogies qui peuvent exister entre les représentations spontanées d'il y a un ou plusieurs siècles et celles d'aujourd'hui, sans pour

l'histoire des sciences dans le programme scolaire en Grande-Bretagne

conflit historique et conflit pédagogique

autant tomber dans une typologie simpliste des stades ou des archétypes de l'esprit humain.

2.1. La combustion et l'oxygène des adolescents

On peut illustrer ces analogies avec la description spontanée d'une combustion par des adolescent(e)s britanniques (7). C'est une affaire de flammes et de fumée, de noircissement et de cendres. Les flammes "*mangent*" ou "*fondent*" le bois ou le charbon. Les affinités entre principes ne sont pas loin : si les soufflets servent à quelque chose, c'est parce que "*le feu aime l'air*". La culture des adolescent(e)s est toutefois loin d'être aussi animiste et élémentaire, ils savent que quelque chose dans le bois disparaît quand il brûle ("*la matière du bois est changée en fumée et ce qui reste c'est les cendres*") et les éléments chimiques sont là ("*le carbone sort du bois*" ; "*le feu a besoin d'oxygène*"). Mieux encore, la technologie contemporaine a souvent quelque importance dans les représentations, après tout, nombre d'adolescents savent qu'il existe des fusées ayant des moteurs "à oxygène" !

les conceptions
spontanées de la
combustion

Une enquête menée par J. Knox révèle avec plus de précision une des difficultés classiques de compréhension du rôle de l'air dans les combustions : le problème des transferts de masse au cours de la réaction avec l'oxygène et la formation d'un corps composé (8). Une des questions posées à des élèves de quinze ans ayant ou non suivi un cours de chimie consistait à estimer le poids d'un échantillon de limaille de fer soumis à oxydation. Un quart des élèves indiquent un poids supérieur après réaction. L'idée selon laquelle la limaille perd du poids est de loin la plus populaire. Elle est justifiée par le chauffage, la combustion des gaz, l'aspect de la poudre restante ou même parfois par le fait que l'oxygène "*déplace le fer*". Les adolescents mentionnent aussi souvent la combinaison avec l'oxygène de l'air que les changements d'états physiques ("*la poudre est plus solide que la limaille de fer*"). Dans leurs conclusions, les auteurs indiquent que la prévalence de cette perte de poids peut être mise en rapport avec un complexe de représentations "spontanées" : le fait qu'un gaz ne réagit pas, qu'il n'a pas nécessairement une masse, que le poids change avec l'aspect (poudre contre solide compact), que la masse d'un corps diminue avec le chauffage... Ces notions subissent des réaménagements après le cours de chimie mais elles ne disparaissent pas. Ainsi la calcination est rapprochée de l'oxydation spontanée à l'air (la rouille), de sorte que l'oxygène "*digère*" les métaux. De même, l'évaporation ou la dissolution dans l'eau viennent au secours de la notion de réaction avec l'air (l'oxygène de l'air se "*fond*" dans le métal).

Ces études suggèrent l'existence d'un réseau conceptuel dont la constitution dépend des itinéraires cognitifs des individus, dépend de la structure des groupes scolaires et des catégories sociales. Un tel réseau associe un petit nombre d'expériences valorisant les analogies entre calcina-

tion et combustion, entre combustion et respiration, entre réaction chimique et processus vivant. L'existence de réseaux conceptuels est sans doute moins le signe d'invariances cognitives (9), que l'indice d'une communauté de pratiques, et notamment de pratiques scolaires : par exemple l'association répétée des manipulations de bougies et de petits organismes pour "montrer" le rôle de l'air dans la respiration et la combustion. En ce sens, le réseau conceptuel n'est certainement pas une donnée mais une **construction**... Une fois admis que pour "trouver" le sens que la chimie contemporaine attribue à une expérience de combustion et d'oxydation, il faut faire intervenir toute une série de présupposés qui ne sont pas toujours là (ou pas toujours articulés), une comparaison historique peut prendre un intérêt pédagogique. À condition de s'intéresser non à d'hypothétiques démarches standards de constitution des savoirs, mais aux conflits dont procèdent les connaissances contemporaines sur lesquelles "tout le monde" est d'accord, sauf justement ceux qui doivent les apprendre (10). Comme l'a souligné S. Pumfrey, nombre de ces pré-requis correspondent à des enjeux de **controverses** des XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècles, et en particulier, dans le cas de la combustion et des oxydations, aux débats entre Lavoisier et Priestley, entre partisans du phlogistique et partisans de la chimie de l'oxygène (11). Avant de discuter cette correspondance, un rappel du récit classique est nécessaire.

les pré-requis du
sens de
l'expérience

2.2. Priestley, Lavoisier et la décision par le mercure

Ce qu'on pourrait appeler la querelle du phlogistique ou la controverse sur l'oxygène est moins un débat entre Priestley et Lavoisier qu'un processus qui dure une vingtaine d'années (1780-1800) et voit la constitution d'un nouveau corpus de représentation et de manipulation des corps chimiques et son acceptation par les communautés savantes (12). Pour approcher cette transformation, il faut partir de l'expansion de la "chimie pneumatique" à partir du milieu du XVIII^{ème} siècle. À la suite des travaux de Georg Stahl, de Stephen Hales ou de Joseph Black, les philosophes naturels multiplient les variantes de l'élément air et stabilisent les procédures permettant de les isoler : *air fixe* produit par effervescence de la craie en présence d'acide ; *air inflammable* par réaction de certains métaux sur l'acide vitriolique ; *air nitreux* par réaction du cuivre sur l'acide nitrique (13). C'est dans le contexte des multiples analyses sur la nature et les effets de substances qui deviendront des gaz, que Priestley s'intéresse à la calcination des métaux (14).

Pour Priestley comme pour Stahl, la calcination est identique à la combustion (15). Elle consiste en un transfert du principe du feu, le *phlogistique* qui passe du combustible ou du métal vers l'air. Une fois chargé en phlogistique, l'air courant devient de l'air fixable, soluble dans l'eau, troublant

la "chimie
pneumatique"

le phlogistique
explique la
combustion

l'eau de chaux. À l'image du charbon de bois ou de terre qui sont considérés comme des sources majeures de phlogistique et qui laissent des cendres après combustion en libérant de la fumée, les métaux sont des combinaisons qui perdent leur phlogistique lors du chauffage et deviennent des terres. L'opération inverse, la réduction des chaux, redonne du phlogistique en présence d'un corps ayant moins d'affinité que lui pour le principe du feu. Le phlogistique permet ainsi de comprendre les affinités entre airs, métaux et acides. Mais surtout, il est indispensable en pratique : les opérations des métallurgistes sont des références courantes des chimistes-savants et l'identité entre combustion et calcination est devenue un fait fondamental. À l'occasion, Priestley déplace le phlogistique de Stahl (16). Il en fait parfois un principe-substance, isolable et peut-être identique à l'air inflammable ou à une substance "calorique" invoquée pour rendre compte des transferts de chaleur. En dépit de ces variations théoriques, la principale ambition de Priestley reste expérimentale et pratique : accumuler des "faits" qui pourront être mis à la disposition de tous. Il est ainsi auteur de l'isolement et de la description d'une dizaine d'airs différents. En 1774-1775 par exemple, Priestley reprend certaines expériences de calcination d'une chaux mercurique désignée comme *mercurus calcinatus per se* (17). Par chauffage prolongé à l'aide d'une lentille de grande dimension, il en obtient un air qu'il considère comme nouveau et qu'il nomme *air déphlogistiqué* pour deux raisons : premièrement, cet air est produit par une réaction de fixation de phlogistique dans le mercure ; deuxièmement, il manifeste des comportements opposés à ceux de l'air issu des réactions de combustion : il ravive la flamme d'une chandelle et facilite la respiration de souris et de petits organismes.

la calcination
de la chaux
mercurique et
l'invention de
l'oxygène

Une réaction similaire est montée peu après par Lavoisier (18). Ce dernier commence par conclure que le chauffage du *mercurus calcinatus* ne produit que de l'air normal avant d'adopter l'idée de Priestley selon laquelle il s'agit d'un nouvel air "plus pur" que l'air. Lavoisier va plus loin. Plutôt que de s'intéresser comme Priestley aux autres sources d'air déphlogistiqué, il reprend l'étude de l'opération inverse, la calcination du mercure proprement dit, une réaction connue pour susciter un problème spécifique puisque la masse de chaux mercurique obtenue était, comme le pharmacien-chimiste Bayen venait de le confirmer, supérieure à celle du mercure initial, ce malgré la libération du phlogistique. Entre 1775 et 1776, Lavoisier combine à plusieurs reprises chauffage de la chaux et calcination du métal. Un des traits distinctifs de ces manipulations est, comme dans ses travaux antérieurs sur les eaux minérales ou la combustion du soufre et du phosphore, qu'il pèse systématiquement et effectue des bilans (19). Lavoisier combine les expériences pour constituer un "cycle" idéal de fixation et de libération de la "partie la plus pure" de l'air. Le gain de masse qui

accompagne la calcination est ainsi proclamé équivalent à la masse de l'air libéré lors de la réduction. Par là, il inverse la relation simple/complexe entre métaux et terres, suggère que le métal est simple, la chaux une combinaison de ce dernier avec une partie de l'air. Parallèlement, il indique que la dissolution du mercure dans l'acide nitrique produit de la chaux mercurique parce que l'acide est lui-même un composé contenant cette même "partie la plus pure" de l'air. Associées à une série d'autres déplacements, en particulier la poursuite des analogies entre combustion et respiration, entre calcination et acidification, ces recherches sur le mercure amènent Lavoisier à transformer cette "base" de l'air en "oxygène" élément fixé lors des calcinations, réagissant avec le soufre, le phosphore ou l'air nitreux pour produire les acides. À partir de 1777, il en fait une pièce décisive d'une théorie générale de la combustion qui associe trois composantes : l'oxygène fixé, la *mofette* qui compose l'air résiduel inerte, la matière du feu (plus tard, le *calorique*) qui est libérée et génère chaleur et lumière. L'oxygène est ainsi le produit de l'éclatement du phlogistique-matière du feu et d'un renversement de perspective qui remplace la libération d'un élément-principe par une réaction de fixation d'un gaz.

L'opposition entre Priestley et Lavoisier porte sur l'existence du phlogistique et la nature de cet air spécial. Au milieu des années 1780, la controverse se double d'un débat sur la composition de l'eau. Lavoisier prolonge les expériences du britannique Cavendish et organise en grand une de ses combinaisons de décomposition/recomposition pour montrer que l'eau n'est pas une substance simple mais un composé "poids pour poids" d'air inflammable et d'air déphlogistiqué. Cela lui permet d'expliquer pourquoi la réaction d'un acide et d'un métal peut libérer de l'air inflammable, phénomène jusque-là étranger à une théorie qui voyait dans les métaux des éléments simples et dans les acides des composés d'oxygène et de terres. Le caractère spectaculaire de la démonstration aide à rallier les chimistes-physiciens français (Claude Louis Berthollet, Louis Bernard Guyton de Morveau, Gaspard Monge, François Fourcroy) à la "nouvelle chimie". À l'opposé, la controverse entre chimistes français et pneumaticiens britanniques se poursuit jusqu'à la disparition des deux principaux protagonistes : Priestley meurt en exil aux États-Unis en 1804 alors que Lavoisier est guillotiné en 1794.

Face aux récits du bon et du mauvais larron, les historien(ne)s soulignent généralement que le débat ne portait pas tant sur les résultats des expériences que sur les épistémologies qui déterminaient la nature des preuves acceptables. Une dissymétrie fréquente dans les récits vulgarisés consiste par exemple à présenter les expériences de Lavoisier puis à indiquer que Priestley avait bien observé la décomposition de la chaux mercurique ou celle de l'eau mais qu'il n'a jamais réussi à interpréter ces faits. La situation est évidemment beaucoup plus complexe. Priestley a

la conviction par
la composition
de l'eau

l'opposition de
deux cultures
scientifiques

dans son arsenal une série d'interprétations faisant appel au phlogistique et un corpus expérimental qu'il peut opposer à celui de Lavoisier. Le conflit de résultats serait donc le produit de philosophies de la nature incompatibles. Là où Lavoisier privilégie l'existence d'une loi divine illustrée par le modèle géométrique, Priestley vise l'économie de la nature et sa "bonté". Le phlogistique participe ainsi d'un cycle de transformations de l'air et d'une histoire du monde. La "bonté de l'air", son caractère respirable, sont continuellement viciés par la respiration des hommes et des animaux. Les provisions de Dieu pour l'homme consistent à faire intervenir des événements et processus qui restituent les qualités de l'air. Priestley les a mises en évidence dans quelques expériences simples mais spectaculaires : la dissolution de l'air fixe dans l'eau par agitation mécanique qui mime le travail des océans ou la production d'air déphlogistiqué par les plantes.

2.3. Le constructivisme entre pédagogie et histoire

contextualiser la
notion
d'expérience
cruciale

Paradoxalement, c'est précisément parce que la querelle ne procède pas de la confrontation à quelques expériences cruciales mais d'un conflit entre différentes cultures et pratiques scientifiques que les parentés avec les représentations des adolescents ont pu être exploitées. Stephen Pumfrey et ses collègues ont en particulier utilisé la controverse Priestley/Lavoisier pour proposer une contextualisation de la notion d'expérience cruciale. Dans ce cadre, le jeu d'analogies qui intervient dans le débat sur la nature de la calcination est tenu pour similaire à celui que les élèves dérivent de leur expérience sensible : par exemple, les rapprochements entre réaction des métaux et respiration. D'où une apparence de répétition. Comme les tenants du phlogistique, les adolescents contemporains mobiliseraient des entités sans masse, le concept de perte de substance au cours du chauffage, l'idée d'un empoisonnement de l'air. L'intérêt pour le précédent historique tient à la prise en compte d'un conflit de représentation et d'intérêt. Si une expérience a un caractère "crucial", c'est moins parce qu'elle est une preuve décisive que parce qu'elle cristallise un conflit latent. En conséquence, plutôt que d'utiliser une imagerie d'Épinal attribuant à Lavoisier toute la modernité et la scientificité, à savoir l'utilisation du principe de conservation de la matière, l'art de la mesure précise, la maîtrise du calcul et une définition pragmatique de l'élément pour expliquer sa victoire sur un Priestley religieux, qualitatif et sans esprit de système, l'enseignant(e) devrait faire intervenir une histoire un peu plus équilibrée, utiliser la controverse en tant que telle dans le cadre d'une **réplication pédagogique**.

Là où la psychogénèse rejoignait l'histoire pour permettre la (re)connaissance des objectifs-obstacles, la continuité culturelle de longue durée fonde la réplication pédagogique.

les analogies
entre controverse
historique et
conflit socio-
cognitif

À l'arrière-plan, il n'y a pas un déterminisme de l'évolution cognitive, mais seulement une isomorphie basée sur le maniement d'outils et de dispositifs parents. Les analogies sont éloquentes non pas tant parce que les élèves retrouveraient le "mode de pensée" de Priestley et des partisans du phlogistique mais parce qu'elles font intervenir des stratégies et ressources analogues à celles de Priestley et de Lavoisier lorsque ces derniers agissent en "philosophes naturels" et mobilisent des expériences sensibles et des opérations utilitaires qui font encore partie de notre culture. Il est important de voir que cet "être encore là" n'est pas de l'ordre de la nature mais de l'expérience collective. La combinatoire qui fait jouer simultanément calcination, respiration et combustion est bâtie sur la centralité du rôle du feu et de la chaleur. Pour les savants-chimistes d'Ancien Régime, elle s'inscrit dans un réseau de pratiques fondatrices d'un "mode de vie" scientifique qui comprenait les éléments-principes, la mesure des volumes, la réduction métallurgique des minerais, la médecine des humeurs, aussi bien que les tests de l'oiseau ou du candélabre qui établissaient le lien entre les caractères "air non respirable" et "air impropre à la combustion". L'argument du constructivisme historique consiste alors à estimer que cette forme de vie n'existe évidemment plus (ne serait-ce qu'à cause des conséquences de la Révolution Chimique), mais qu'elle constitue un des mondes possibles, lequel a laissé des traces qui peuvent nourrir les controverses contemporaines. La métallurgie et les physiocrates sont certes, hors de portée de la plupart des adolescents mais la bougie sous une cloche ou la balance sont toujours là. Expérience quotidienne et expérience scolaire se relaient pour constituer des systèmes de représentations conflictuels.

la réplication de
l'expérience
historiquement

Tout le problème des analogies entre l'expérience des philosophes naturels et celle de nos élèves est toutefois qu'elles mentent par où elles sont suggestives. Elles mentent à l'historien(ne) parce qu'elles reposent sur des opérations de traduction, de sélection et de décontextualisation. Ainsi, la mise en place (historienne ou pédagogique) de l'expérience sur le mercure donne une importance majeure à la question du gain de masse lors de la calcination des métaux. De même, on fait sans hésitation, de l'*air fixe*, un dioxyde de carbone, ou pire, de l'*air déphlogistiqué*, de l'oxygène alors que ce dernier n'est pendant longtemps qu'une définition opérationnelle associant production par réduction des chaux métalliques, et qualités sensibles qui en font la "partie la plus pure" de l'air. Le jeu des analogies ment aussi parce qu'il entraîne le chimiste-enseignant dans une historicité dont il ne sait pas quoi faire sauf à en sortir. Que faire des remarques de Priestley selon lesquelles Lavoisier n'a fait qu'un tout petit nombre d'expériences ou pire selon lesquelles ses calculs destinés à corriger les incertitudes de la manipulation contredisent la méthode expérimentale ? Que faire des expériences de décomposition de l'eau à grande

échelle menées par Lavoisier devant les envoyés de l'Académie et du Roi de France ? Évaluer l'intérêt d'une exploitation de la controverse historique en situation scolaire revient donc à juger de la pertinence de l'utilisation de mêmes mots et énoncés pour désigner des situations que l'essentiel sépare : deux siècles, les matériaux utilisés, les acteurs et les finalités sociales. Il existe bien des points communs entre le jeu que nous jouons aujourd'hui avec "les airs" et celui que jouaient Lavoisier et Priestley mais ils ne suffisent pas à garantir *a priori* de la fécondité des transferts et de l'intérêt des analogies. De même qu'il est inutile de tenter de rejouer la prise de la Bastille pour comprendre la Révolution, il faudrait donc abandonner l'idée d'un lien entre notre construction de l'oxydation du mercure et Lavoisier.

Lavoisier et
Priestley dans
les manuels
britanniques

Pour échapper à l'impasse du débat théorique général, un examen des usages scolaires de la querelle du phlogistique est sans doute un détour fructueux. On en prendra deux exemples extrêmes : les manuels existant pour la préparation du GCSE (20) et la séquence proposée par Pumfrey et ses collaborateurs. Contrairement aux recommandations du nouveau *National Curriculum*, l'introduction de Priestley et Lavoisier dans les textes préparant au GCSE est très proche de nos timides utilisations de l'histoire de la chimie : conçues pour aider à assimiler le concept de réaction avec l'oxygène (21). Les matériaux historiques consistent généralement en textes (tableau des éléments du traité de 1789) et images (gravure de Lavoisier) sans lien avec les manipulations effectuées avec les élèves : le plus souvent des expériences sur le rôle de l'air (bougie et/ou souris sous une cloche) et la combustion (bois ou papier) ; parfois la réaction de calcination du cuivre est présentée avec une discussion de l'augmentation de masse et de la diminution de volume. Le schéma d'explication historique est remarquablement stable et conforme à l'idéal-type de découverte progressive et d'expérience cruciale (22). On commence par une description de la théorie du phlogistique mentionnant son lien à l'expérience naturelle de combustion (phlogistique et fumée ; chaux et cendres). On aborde ensuite la mise en évidence par Priestley d'un gaz nouveau à partir de la chaux mercurique et on passe aux expériences d'oxydation et de réduction du mercure par Lavoisier, présentées cette fois dans leur dimension quantitative (volumes de gaz consommés et restaurés) ce qui permet de présenter à la fois le gain de masse et la composition de l'air atmosphérique.

valeur
didactique de
cette présence ?

Qu'en est-il de la valeur didactique si ce n'est historique ? L'enjeu est de faciliter la compréhension d'un faisceau de notions qui comportent la réaction entre gaz et solide, la fixation d'oxygène dans les oxydations, la réversibilité oxydation/réduction, les rapports substance composée/élément et ainsi de préparer le terrain pour les développements sur la structure atomique, la table périodique, puis les couples redox, l'électrolyse et les réactions électrochimiques. En

l'absence d'analyse spécifique, il est difficile de spéculer sur les effets de la référence à Lavoisier et Priestley. On peut toutefois estimer que celle-ci n'a pas un statut différent d'un texte introductif ou d'un exercice d'application puisque la seule mention de quelques noms et dates ne peut donner corps au passé. On conclura donc au caractère **contingent** du choix entre divers modes d'illustration d'un cours, par exemple du choix entre des matériaux historiques et des illustrations tirées de la vie quotidienne contemporaine (comme les batteries et piles pour l'électrochimie).

La séquence intitulée "*The battle over burning*" proposée par S. Pumfrey et ses collègues est d'une tout autre nature (23). Il s'agit d'un ensemble intégré où la controverse Priestley/Lavoisier est le cœur d'un dispositif qui combine plusieurs ingrédients d'une pédagogie de "découverte" : depuis la recherche documentaire à la réalisation de manipulations semblables à celles de Priestley, en passant par la production d'interprétations et d'hypothèses concurrentes au sein du groupe classe. Pour autant la cohérence n'est pas d'ordre historique : l'enjeu est bien de faciliter l'assimilation de notre chimie en utilisant les analogies et représentations spontanées. En conséquence, même si les matériaux fournis par l'historien sont nombreux, la logique d'organisation procède d'une mise en scène (et en perspective) de l'expérience cruciale. On part donc de l'expérience sensible de la combustion pour attribuer une valeur à la théorie du *phlogiston*. On aborde ensuite les acquis de Priestley et de la chimie pneumatique à travers la manipulation des différentes sortes d'air en privilégiant les classifications descriptives (effets qualitatifs simples). Une fois le rééquilibrage en faveur de Priestley (et des représentations spontanées) effectué, la séquence vise à construire la situation de conflit en mettant en scène l'anomalie de masse des réactions de calcination. L'ouverture d'une controverse interne au groupe pose immédiatement la question des conditions de clôture : jusqu'où faut-il pousser la présentation et l'utilisation des arguments des "phlogistiques" ?

Ici, la priorité est à la production d'un conflit cognitif limité où l'ingénierie enseignante guide le groupe vers la reconnaissance de l'importance des changements de masse comme synonyme des déplacements de matière (y compris pour les substances gazeuses). D'où la prise de conscience de la faiblesse des explications attribuées aux phlogistiques : une matière sans masse ou, pire, avec une masse négative. Une fois canalisée dans cette voie, la séquence peut se poursuivre avec notre héritage : les autres expérimentations, en particulier la présentation d'une réplique audio-visuelle de l'expérience avec le mercure, viennent illustrer l'apport de Lavoisier pour aboutir à la nouvelle nomenclature en laissant de côté les réponses de Priestley qui deviennent beaucoup trop complexes. Dans son évaluation, S. Pumfrey soulignait que cette séquence laissait très peu de partisans du phlogistique tout en clarifiant une par-

la réplique
pour contourner
le conflit socio-
cognitif

évaluation de la
séquence
pédagogique

tie des confusions et ambiguïtés sur la nature et le rôle de l'oxygène. Il reste que pour l'historien, l'organisation pédagogique visant l'enseignement de la chimie entre en conflit avec deux points de méthode : le traitement équilibré des différents acteurs et la non-téléologie du récit. L'orientation de la séquence (il faut arriver à notre chimie en perdant un peu de temps mais pas trop) pousse la "reconstruction" dans le sens d'une pédagogie de l'expérience preuve et d'une mise en scène classique (Priestley disparaît lorsque Lavoisier se saisit de la chaux mercurique).

Cet argument d'efficacité du détour par la controverse Lavoisier-Priestley pose la question de savoir s'il faut plaider pour une véritable attention à la matière des historien(ne)s et en fonction de quels objectifs ? Une réponse positive peut être justifiée par deux motifs. D'une part, la recherche d'une pratique pluridisciplinaire restituant toute son importance à un contexte conçu non pas comme un "milieu" mais comme une part intrinsèque de ce qui fait une culture scientifique. D'autre part, la volonté de donner un sens à la pratique de la science, en particulier aux savoir-faire et manipulations matérielles. Pour évaluer l'intérêt d'une réplique pédagogique, il faut toutefois revenir sur ce que l'historiographie récente nous a appris de la controverse entre Lavoisier et Priestley.

3. DU PHLOGISTIQUE, DE L'OXYGÈNE ET DES SAVANTS D'ANCIEN RÉGIME

Un survol de l'abondante littérature consacrée à Lavoisier et à la Révolution Chimique suggère qu'il y a eu une forte continuité des problématiques jusqu'à la fin des années soixante-dix, suivie d'une évolution rapide des questions et des objets (24). Nombre des interrogations à l'origine des travaux consacrés à Lavoisier portaient sur les continuités et ruptures conceptuelles, sur le quand et comment était intervenu l'abandon du système de Stahl et du phlogistique, sur l'émergence d'une chimie fondée sur la gravimétrie et la recherche des lois de composition entre éléments, sur les formulations successives des théories de la combustion et des oxydations. L'image fournie par ces analyses était celle qui a été résumée plus haut avec une révolution disciplinaire en deux moments. D'abord, une phase de multiplication des "faits" sur la réactivité chimique et les gaz, dominée par les pneumaticiens britanniques, nourrie par l'introduction de nouvelles techniques dans le cadre d'une philosophie qualitative encore attachée à la description des qualités sensibles et des rapports entre principes. Ensuite, une phase de réorganisation initiée par Lavoisier et les chimistes français qui construisent un système cohérent de composition des éléments à partir d'une nouvelle attention à la mesure précise et à quelques expériences princeps, en parti-

des
pneumaticiens
britanniques...

aux chimistes
français

culier en matière de réactivité de l'oxygène. Du fait de l'émergence d'une histoire des sciences à vocation plus sociale et culturelle, le tableau s'est diversifié.

3.1. Cahiers de laboratoire et gestion de l'incertitude

Du côté des raffinements, on mentionnera quelques apports de l'examen des registres de laboratoire de Lavoisier qui, paradoxalement, a contribué à fixer l'image d'un Lavoisier beaucoup plus "politique" dans son mode d'administration de la preuve (25). On en prendra pour indice, les premières expériences sur l'*air déphlogistiqué* (26). La tradition veut que Lavoisier ait appris en octobre 1774 par une visite de Priestley à Paris que l'on pouvait produire de l'air par chauffage de la chaux mercurique et qu'il ait ensuite répété plusieurs fois l'opération jusqu'à conclure dans le courant de 1775 que cet air était "*la partie et la plus pure et la plus respirable de l'air commun*". La confrontation des comptes rendus publics et des registres montre d'abord l'étendue du travail d'écriture et de reconstitution des événements présidant à la publication. Ainsi la version "finale" de 1775, souvent lue comme un des premiers signes de la constitution d'une théorie de la combustion puisque Lavoisier y indiquait que l'augmentation de masse observée lors de la calcination des métaux était due à la fixation de la partie "pure" de l'air, correspond à l'agglomération d'interprétations successives et contradictoires qui ne se démarquent pas de la chimie du phlogistique. Lavoisier considérait ainsi que l'air obtenu à partir de la chaux mercurique pouvait être **en même temps de l'air commun et quelque chose de plus pur, que l'air fixe correspondait à un air enrichi en phlogistique**. Plus, Lavoisier n'abordait l'idée d'un nouvel air qu'à la suite de Priestley, au début de 1776, après une réévaluation de ses propres résultats.

Le plus intéressant de l'épisode n'est pas dans l'attribution à Priestley ou Lavoisier de la "découverte" de l'oxygène mais dans ce qu'il nous apprend sur les pratiques expérimentales et la gestion de l'incertitude. L'analyse de l'air obtenu à partir de la chaux mercurique s'appuie sur une série de procédures de mise en évidence des propriétés des différents airs : comportement vis-à-vis de l'eau de chaux, respirabilité par les animaux, possibilité d'y faire brûler une bougie. Une réaction est d'importance : le test à l'air nitreux mis au point en 1772 par Priestley pour mesurer la qualité et la respirabilité de l'air (27). La réaction consistait à mélanger un volume d'air nitreux (obtenu par réaction d'un métal sur l'acide nitrique) à deux volumes de l'air à tester au-dessus d'une cuve à eau. La production de vapeurs rouges était suivie d'une spectaculaire diminution de volume (un air "dévorant" l'autre). Le phénomène était considéré par Priestley comme dû à la décomposition de l'air nitreux en phlogiston et base (liquide) de l'acide nitrique, réaction accompagnée

par une solubilisation d'une partie de l'air commun phlogistique. Avec l'air atmosphérique, la diminution du volume initial était d'environ 1/5 du volume d'air nitreux ajouté, mais avec les airs viciés par les combustions ou la respiration, elle variait en raison inverse de la richesse en phlogistique et/ou de la richesse en *air fixe*. Ainsi, de petites différences de qualité de l'air pouvaient être quantifiées par les variations de volume. En 1775, Lavoisier s'inquiète de la nature de l'air issu de la chaux mercurique, il fait appel au test de Priestley qu'un collaborateur de ce dernier lui a appris à manier et il trouve une diminution identique à celle de l'air atmosphérique.

le choix de
l'expérimentation

Cette indication s'oppose aux observations qualitatives de Lavoisier (intensité des vapeurs, vigueur de la combustion d'une bougie) mais elle va dans le même sens que les calculs. L'évaluation de l'expérience est, pour Lavoisier, un problème de reconstruction rationnelle qui justifie la correction des aléas de l'expérimentation. Effectuant une série de pesées pour déterminer la quantité de chaux mercurique et celle du mercure obtenu en fin de réaction, Lavoisier calcule la perte de masse et la compare au volume d'air finalement recueilli pour obtenir une indication sur la densité de l'air produit. Pour cela, il faut faire des choix et estimer certains des paramètres et des circonstances qui font l'imprévisibilité et l'unicité de l'expérience : le volume d'air atmosphérique initialement présent dans le dispositif, la quantité de mercure perdue dans le col du matras et non pesée, la quantité de sable mêlée au mercure final du fait d'une fusion partielle du verre... La conclusion selon laquelle l'air dégagé a une densité analogue à celle de l'air atmosphérique, est donc un produit hautement élaboré qui doit sa légitimité au caractère plausible du récit sur les sources d'erreur et au caractère raisonnable, si ce n'est attendu, du résultat finalement adopté. La mesure est donc affaire de conviction et de hiérarchisation des dispositifs et des informations, fonction des engagements collectifs.

le consensus,
en pratique

Peu après ce travail de Lavoisier, Priestley change d'avis et indique d'autres résultats sur la "bonté" de cet air, en particulier le fait qu'au cours du test à l'air nitreux, la diminution de volume est bien supérieure à celle de l'air commun. Le nouvel air devient un *air déphlogistiqué* car il est meilleur que l'air courant vicié par le phlogistique, car sa production apporte du phlogistique à une chaux. Bref, Lavoisier qui le trouve analogue à l'air commun n'a pas su réaliser le test à l'air nitreux. Résultat local contre résultat local, témoignage contre témoignage, la controverse pourrait durer jusqu'à ce que les protagonistes se mettent d'accord sur toutes les circonstances et matériaux, jusqu'à ce qu'ils fassent tout en commun. Mais Lavoisier fait confiance à l'inventeur du test, refait les observations et réussit à obtenir la diminution de Priestley (28). L'opération est complétée quelques semaines plus tard par la juxtaposition de deux manipulations qui fournissent la trame de l'argument de décompo-

sition/recomposition : la diminution de 1/6 de volume de l'air atmosphérique lors de la calcination du mercure et la transformation de l'air ainsi diminué en air propice à la combustion par addition d'*air déphlogistiqué*. L'établissement du résultat expérimental est donc une question de consensus pratique autant que d'innovation conceptuelle.

L'intérêt pour les détails des cahiers de laboratoire montre aussi où le parcours historique se sépare de la reconstruction en termes d'expérience cruciale et de sa traduction pédagogique : les expériences de Priestley et Lavoisier ne sont pas comparables et les manipulations de la chaux mercurique ne produisent pas l'oxygène (29). Du fait de la flexibilité des analogies et schémas utilisés par Lavoisier, l'expérience avec la chaux mercurique pouvait donc aussi bien libérer de l'*air fixe* que de l'air commun (30). Le débat avec Priestley sur la chaux mercurique fait certes pencher la balance en faveur de la deuxième interprétation, mais comme l'a souligné F. Holmes, la reconfiguration de la théorie de la combustion intervient plus tard, lorsque Lavoisier reprend la question des rapports avec la respiration et en particulier le problème de la genèse de l'*air fixe* (31).

3.2. Lumières ou Bonté Divine, loi naturelle ou savoir-faire

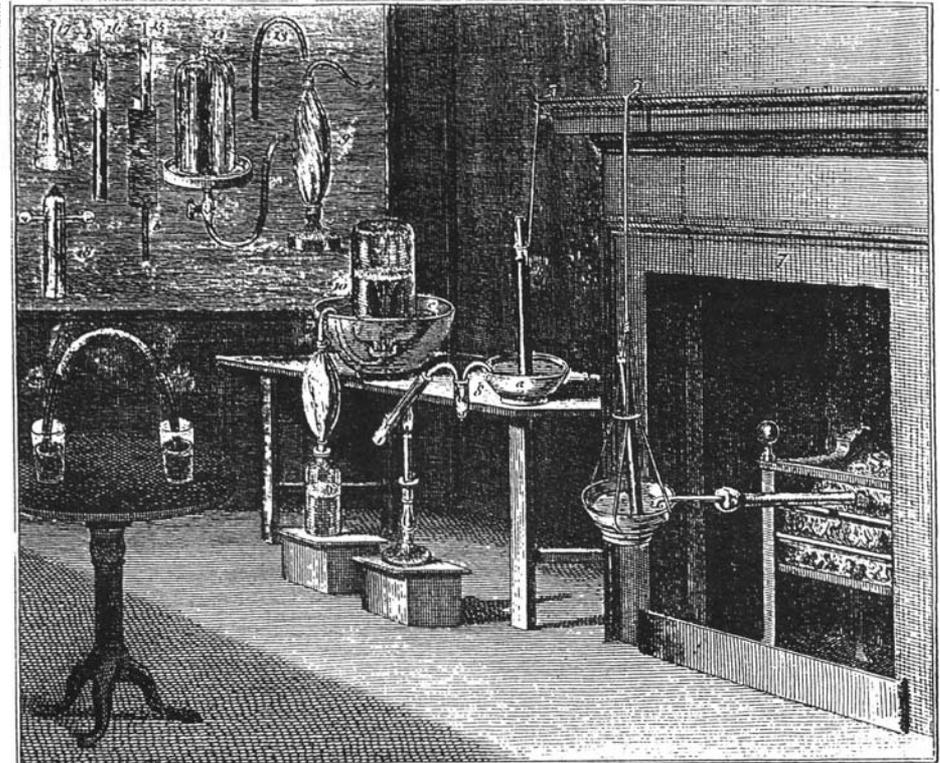
Avec l'intérêt renouvelé pour des objets comme les rapports entre science et culture des Lumières, comme la rhétorique de la preuve ou les savoir-faire techniques, émerge une symétrie de traitement des protagonistes qui rompt avec l'opposition entre un Priestley théologien et politique et un Lavoisier savant. Il semble qu'on soit en passe de retrouver les articulations entre les différentes sphères d'action des savants d'Ancien Régime, ce qui fait que les philosophes naturels ne sont pas des *chimistes* ou des *chercheurs* (32). Priestley retrouve ainsi son activité d'expérimentateur et d'inventeur et Lavoisier son rang de titulaire d'office, d'administrateur, de propriétaire terrien. On en prendra pour indices deux exemples qui permettent de comprendre la non séparation entre l'expérimentation et les formes de vie dans lesquelles Priestley et Lavoisier déploient leur activité : d'une part, la question de l'utilité et du rapport à l'Etat ; d'autre part, celle de la précision et de la quantification.

Le problème de l'utilité de la chimie pneumatique est un enjeu décisif de la seconde moitié du XVIII^e siècle dans la mesure où la physique qui s'occupe de la chaleur, de l'électricité, du magnétisme ou des substances chimiques tend alors à passer d'une exploration du "curieux" à celle de "l'utile" (33). Priestley poursuit un travail qui vise à la production de **faits** qui pourront être vus, évalués, reproduits et utilisés par "*tous les hommes de bonne foi*" (34). La légitimation par l'aspect spectaculaire ou surprenant des phénomènes, qui dominait la première moitié du siècle, ne disparaît pas, mais il s'y ajoute une dimension utilitaire qui

de nouveaux
objets d'histoire

l'utilité de la
chimie
pneumatique

suppose non seulement la reproductibilité des expériences par les conférenciers itinérants dans les lieux d'éducation du public, mais aussi une circulation et une évaluation par la multiplication des usages locaux, par la transformation des phénomènes en biens et marchandises (35). Ainsi la question des connaissances sur les différentes sortes d'airs est un problème pratique de définition de leurs propriétés, d'évaluation de leur "valeur". Les procédures expérimentales de Priestley sont par exemple étroitement liées à la mise au point de deux innovations médicales et commerciales. La première est la mise à la disposition du public d'une technique de gazéification de l'eau en y faisant barboter l'*air fixe* produit à partir d'un mélange de craie et d'acide (Figure 1) (36). Priestley en est d'autant plus satisfait que des médecins aussi réputés que Pringle (alors Président de la Royal Society) ou Mac Bride (le chirurgien de la marine royale) ont fait du traitement par l'eau carbonatée un instrument de lutte contre les gangrènes et purulences.



Joseph Priestley, *Experiments and observations on different kinds of air*, 1775
(note 5, vol. 1, opp. last page).

Figure 1
J. Priestley (1775). Instruments d'expériences sur les différentes sortes d'air.

Priestley mesure
la bonté de l'air

La seconde innovation est le test à l'air nitreux déjà évoqué où la diminution de volume produite par réaction de l'air nitreux avec le gaz à tester permet d'évaluer la pauvreté de ce dernier en phlogistique et donc son caractère propre à la respiration (37). Le test est bon car il est d'emploi simple, et aucun observateur n'en a contesté la faisabilité. Priestley lui doit sa médaille Copley accordée par la Royal Society et il est le point de départ de toute une lignée d'appareillages et d'investigations sur les bons et mauvais airs, leur géographie, leur influence sur la distribution des miasmes et pestilences (38). Cependant, le problème n'est pas qu'une question de clientèle médicale, la valeur de l'air est aussi une question de vertu morale : le bon air est signe de bonté et de bienveillance de la nature (39). L'utilité est à la fois un objectif de la pratique expérimentale (tournée vers la satisfaction des besoins humains, le phénomène intéressant et vrai doit être perceptible par tous, manipulable et transportable grâce à la description détaillée des circonstances) et une qualité théologique (la nature a été faite bonne et bienveillante par un Dieu qui veut le souverain Bien, elle est uniforme car résultat de l'action continue d'un Dieu qui est la source des pouvoirs) (40). De fait, Priestley tente de comprendre comment l'air atmosphérique, *vicié* par les fermentations et putréfactions peut redevenir bon (41). L'*air déphlogistiqué* est l'une des extrémités d'une chaîne continue allant du plus respirable au moins respirable (de l'*air déphlogistiqué* à l'*air inflammable*), du plus riche au moins riche en phlogistique. Comme les autres, il est susceptible d'indications thérapeutiques (42).

L'univers de Lavoisier est d'un autre ordre. Non que l'utilité en soit absente, mais elle a pris un autre sens pour les physiciens français des Lumières. Elle ne passe plus par le spectacle (public) d'une nature abordée comme un ensemble organique, laissant place aux provisions de Dieu pour l'homme. Elle suppose l'organisation d'un espace (clos) où l'on peut mettre en évidence la loi en maîtrisant les phénomènes et leurs variations : le laboratoire. Ce dernier est lié à la production des biens utiles, par le biais de la connaissance des règles universelles d'évolution de la matière. L'utilité n'est plus spontanée et donnée à voir, c'est le résultat d'une mise en ordre (43). Pour Lavoisier, la simplicité ou la transportabilité des manipulations ne sont pas des qualités en soi. Elles ne priment pas sur ces valeurs essentielles que sont la précision et la quantification. L'expérience n'est pas une description de faits ou de phénomènes ; elle suppose une machinerie complexe qui permette de neutraliser la diversité et la variabilité des conditions, de maîtriser les "circonstances" à travers la construction d'un espace "professionnel" où agissent les maîtres du calcul et de l'interprétation. Le savant sera donc un homme utile non parce qu'il accumule des "savoir-faire" mais parce qu'il dispose de "savoir" qu'il gère en auxiliaire de l'État qui seul dis-

pose de la puissance d'organisation (44). La production de l'utile passe donc par la commande et le rapport d'expertise.

La question de la production du salpêtre et de l'organisation de la Régie des Poudres dont Lavoisier devient administrateur en 1775 illustre cette configuration. Lavoisier est considéré comme le principal artisan de la transformation de la production de poudre en un point fort de l'administration royale et une des sources du renouveau de la puissance militaire française. En 1785, dix ans après sa création par Turgot, la nouvelle régie couvre les besoins du pays et exporte l'un des meilleurs produits d'Europe (45). Malgré les tentatives de Lavoisier pour implanter des "nitrières" artificielles qui permettraient de s'affranchir de la recherche laborieuse du salpêtre naturel, l'essentiel de la transformation repose sur la découverte de nouveaux sites de formation du salpêtre, sur l'amélioration des circuits de collecte et de gestion.

Lorsque Lavoisier prend ses fonctions, Turgot fait mettre la question de la production du "nitre" au concours par l'Académie Royale et la commission chargée d'évaluer les mémoires et de reproduire les expériences devient une sorte de collectif de recherche dirigé par Lavoisier, travaillant dans le nouveau laboratoire de l' Arsenal où ce dernier a déménagé (46). Le mémoire sur la composition de l'acide nitrique présenté devant l'Académie au printemps 1776 lie production du nitre et étude de la combustion. On sait alors que le salpêtre est un sel qu'on peut aussi obtenir par réaction d'*alkali de potasse* et d'*esprit de nitre* (47). Une production artificielle pourrait être imaginée à partir de la connaissance de la nature de l'acide. Du moins, c'est l'espoir que laisse entrevoir Lavoisier. Dans les instructions accompagnant la question de l'Académie sur la production de nitre, il a ainsi fait figurer le problème du rôle de l'air dans la genèse du salpêtre. Plus, son mémoire sur la composition de l'acide nitreux et l'*air déphlogistiqué* paraît, avant les résultats du concours, dans une nouvelle série publiée par la Régie des Poudres (48). Les rapports entre la découverte de l'oxygène et la poudre à canon ne sont pas qu'une affaire de stimuli ou même d'organisation du laboratoire à partir des moyens rassemblés à l' Arsenal. Le lien établi par Lavoisier entre le sort du royaume, la poudre et les études sur la calcination est convaincant parce qu'il s'appuie sur les expériences sur la combustion du nitre et sur le rôle des gaz dans la détonation de la poudre (49). Le mémoire sur la calcination de 1775 se termine ainsi par une interprétation de la détonation bâtie sur l'idée d'une libération brutale de l'air accumulé dans le nitre (50).

La polarité entre une utilité "pragmatiste" fondée sur la multiplication des essais et des erreurs pour constituer des **faits**, et une utilité "rationaliste" reposant sur la constitution d'un corpus théorique à valeur universelle visant à produire des **applications du savoir**, correspond à deux modes

d'administration de la preuve. Chez Priestley, la genèse du consensus passe par une rhétorique de l'égalité et de l'accès immédiat au phénomène. Pour lui, il doit y avoir démocratie dans le jugement de la nature comme il y a démocratie dans le jugement des Écritures : c'est une affaire individuelle où la vérité tient de la conviction personnelle soutenue par la puissance de la Révélation ou de l'Évidence. Lavoisier est l'illustration d'une figure de savant "professionnel" pour qui la Nature doit être construite et qui s'adresse à une communauté de praticiens dont la qualification ne peut plus se limiter à être "dignes de foi" mais doit inclure l'habitude de l'activité de laboratoire, la maîtrise du calcul et du jugement comptable (51).

La question des instruments et des pratiques de réplique prolonge ce contraste. Priestley condamne les manipulations de Lavoisier parce qu'elles reposent sur un appareillage complexe, coûteux et qui ne peut pas être reproduit facilement (52). De fait, malgré la similitude des instruments utilisés dans les expériences sur l'*air déphlogistiqué*, Priestley et Lavoisier présentent leur laboratoire de façon très différente (figures 1 et 2). L'un décrit un lieu de vie où les instruments sont inscrits dans un décor quotidien qui rappelle l'espace public de présentation des phénomènes merveilleux de la science. La série d'instruments n'est pas très différente de celle décrite par Hales vingt ans plus tôt, si ce n'est l'introduction de la cuve à mercure. Sans intervention mécanique, les instruments de Priestley suggèrent une pratique manuelle de transfert des airs qui est complétée par l'observation des effets visibles. Seul indice de la mesure, les graduations de repérage des volumes. À l'opposé, Lavoisier présente des appareils hors contexte, destinés à une expérience unique ou à un seul type de manipulation car ils comportent une série de dispositifs (mécaniques ou pneumatiques) visant à supprimer l'intervention humaine (la pompe à air pour remplacer la succion) ou à neutraliser les paramètres indésirables (le thermomètre et le baromètre pour évaluer les variations de pression et de température lors des expérimentations sur les volumes). Ainsi l'allure des vases qui servent aux expériences de synthèse de l'eau a peu à voir avec le bricolage de Priestley. Plus, Lavoisier fait construire une série d'instruments, qui, tels les balances de précision et les gazomètres des expériences sur la synthèse de l'eau (figure 3), contribueront à rendre ses expériences uniques, non reproductibles par des individus moins fortunés.

les instruments :
machines ou
outils d'artisans

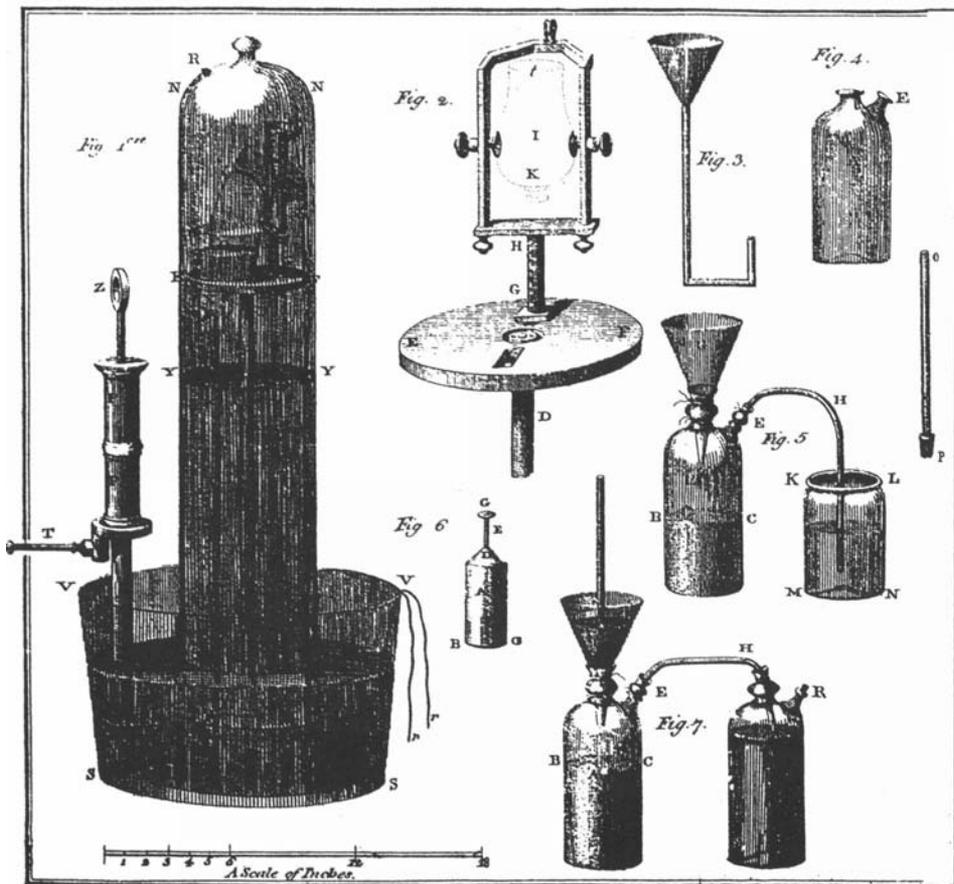


Figure 2
A. de Lavoisier (1774). Instruments d'expériences sur l'air fixe.

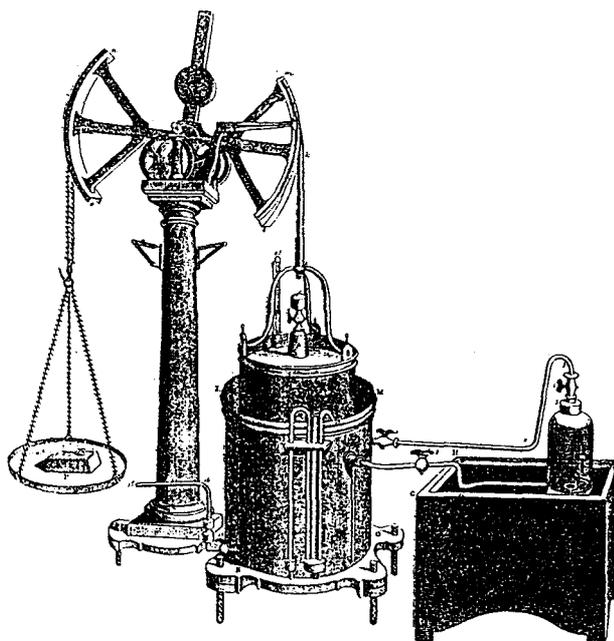


Figure 3

A. de Lavoisier (1789). Gazomètre à caisson des expériences sur la composition de l'eau.

savoir-faire et
rang social

Le statut social des deux hommes a évidemment sa part dans la constitution de ces styles d'opérations : Lavoisier est fermier général et dispose de l'Arsenal de la Régie des Poudres ; Priestley est tour à tour pasteur, précepteur et philosophe dépendant du patronage de groupes religieux radicaux. Mais la différence est aussi affaire de cultures locales. La réplication et la possibilité de circulation des pratiques est une affaire de première importance dans le contexte anglais alors qu'elle est marginale en France. Priestley s'étonne ainsi que Lavoisier puisse publier et surtout généraliser à partir des résultats d'un tout petit nombre d'expériences (et parfois même d'une seule) (53). L'accent mis sur la réplication le conduit à tenir l'expérience pour un **événement** qu'il faut transformer en **fait** en levant les obstacles à la circulation du faire au sein de la communauté des hommes de bien : les comptes rendus sont agencés selon une succession chronologique (ce que Priestley appelle l'ordre historique) ; ils comportent un luxe de détails pour décrire la totalité des circonstances qui pourraient se révéler importantes ailleurs. L'enjeu est la constitution d'un bien qui puisse servir et circuler (54). Dans le contexte français, Lavoisier choisit un autre mode d'explication, celui de l'ordre universel et de la loi attendue (55). Ce qui fait sens dans la comparaison et la répétition des expériences n'est pas la reproduction des mesures mais leur progression :

Lavoisier se rapproche des proportions simples et des rapports constants qu'il attend et qui reflètent par exemple la composition de l'acide nitrique ou celle de l'eau.

Des registres de constitution de la preuve propres à Priestley et Lavoisier alimentent l'opposition des pratiques. Le monopole de la mesure, de l'usage de la balance et de la loi de conservation des masses semble être une spécificité de Lavoisier. On peut ainsi décrire la querelle du phlogistique comme le conflit entre une physique du quantitatif et de la précision et une physique du qualitatif qui recoupe la montée en puissance de l'intérêt pour la mesure précise et pour la quantification qui vaut pour l'ensemble de la philosophie naturelle au XVIII^{ème} siècle (56). Pourtant, Priestley, lui aussi, compte. Il effectue des pesées même s'il ne dispose pas d'une balance équivalente à celle de Lavoisier et il tient compte de la loi de conservation des masses (57). De plus, la pratique de Lavoisier est plus complexe qu'il n'y paraît. La précision qu'il invoque régulièrement fait problème non seulement du fait de l'absence de définition générale des conditions d'une bonne mesure, mais aussi parce le **calcul** qui la fonde n'a rien d'évident. La question de la décomposition de l'eau suffit à illustrer l'enjeu.

En juin 1783, après avoir appris que le philosophe naturel anglais Henry Cavendish a obtenu de l'eau en faisant réagir de l'*air inflammable* et de l'air courant ou de l'*air inflammable* et de l'oxygène (avec dans ce cas production conjointe d'acide nitrique), Lavoisier entreprend une première manipulation qui conforte son opinion que l'eau formée résulte de l'association des deux gaz. En novembre 1783, il présente une forme développée de l'expérience devant l'Académie. L'argument de la conservation des masses fonde l'affirmation de la correspondance "poids pour poids" entre les gaz introduits et l'air obtenu, mais le dispositif est rudimentaire et contesté, en particulier pour la pureté des gaz et les mesures de volume (58). Lavoisier répond en déplaçant le terrain avec une série d'expériences sur la décomposition de l'eau. Pour cela, il étend le dispositif afin de le rendre moins fragile. D'une part, il s'attache la collaboration du mathématicien Meusnier. D'autre part, il obtient le soutien de l'Académie. La commission chargée d'enquêter sur les perspectives ouvertes en juin 1783 par la réussite des frères Montgolfier voit son ordre du jour complété par la question de la production, en grandes quantités, de l'*air inflammable* (afin d'en remplir des ballons ascensionnels).

Meusnier et Lavoisier choisissent de décomposer l'eau dans un canon de fusil rempli de limaille de fer et chauffé au rouge en condensant et collectant la vapeur n'ayant pas réagi, en pesant le canon de fusil avant et après réaction, en mesurant le volume de gaz hydrogène recueilli (figure 4). Une fois encore, la mise en équation impose une construction complexe : pour éviter l'oxydation par l'air extérieur, Lavoisier fait entourer le canon d'un bobinage de fil de fer aux mailles remplies de charbon et fait recouvrir le tout de

plusieurs couches d'argile. Il faut aussi faire les corrections pratiques. Le serpentin qui recueille l'eau qui n'a pas réagi s'imprègne de liquide qu'on ne peut pas peser après égouttage. Lavoisier le fait donc mouiller avant expérience et essaie de standardiser les égouttages avant et après expérience.

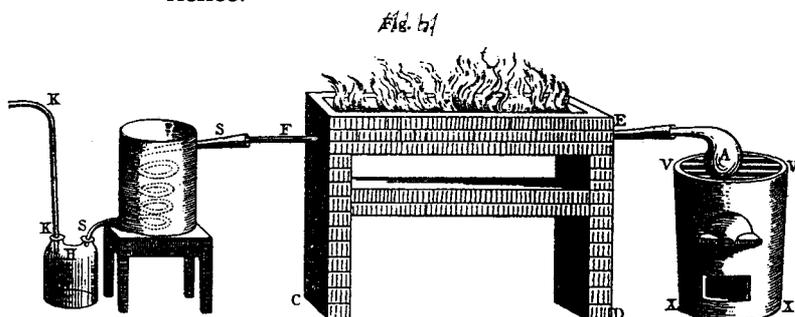


Figure 4

A. de Lavoisier (1789). Le dispositif utilisé pour décomposer l'eau.

Pour les expériences de recombinaison, l'évaluation des volumes de gaz exige la construction d'un dispositif encore plus complexe comprenant non seulement deux gazomètres (figure 3) mais aussi un système de canalisation et de stockage permettant d'évaluer les airs résiduels, et finalement un dispositif d'ignition à l'aide d'une machine électrostatique. La "démonstration par le calcul" consiste alors à admettre puis mettre en scène la conservation des masses pour produire une relation réactants/produits qui permette de calculer le rapport des masses d'hydrogène et d'oxygène dans la composition de l'eau (en l'occurrence 1 pour 5,6). Dans les deux cas, les corrections ne s'arrêtent pas à l'écriture des bilans mais à l'interprétation des déficits et excès finalement constatés. L'idéal de mesure précise pourrait tourner au cauchemar si Lavoisier ne savait pas ce qu'il veut mettre en avant : une association de une partie d'oxygène pour deux parties d'hydrogène (59).

Priestley est loin d'être convaincu de la possibilité et de l'intérêt de ces déterminations. Il attaque Lavoisier pour l'abondance et la complexité des corrections nécessaires à la moindre conclusion sur le rapport masse de gaz/masse d'eau formée : Lavoisier ne peut par exemple pas savoir quelle est la part de l'eau apportée avec ses deux gaz, un bilan quantitativement exact n'étant guère possible **en pratique**. Pour Priestley la mise en équation des proportions réactants/produits a une valeur non pas empirique mais interprétative et doctrinaire. De même, Lavoisier ne peut pas évaluer la contribution de "principes" comme le calorique ou le phlogistique que l'on ne retrouve pas dans les bilans. Enfin, le plus grave, c'est que Priestley ne peut pas reproduire les faits annoncés : l'eau qu'il obtient n'est pas pure,

savants
d'Ancien Régime,
Lumières et
révolution
industrielle

c'est (comme pour Cavendish) un mélange contenant de l'acide nitrique conformément à la nature supposée de l'*air déphlogistique* (60). La théâtralisation de la nouvelle chimie trouve son point d'orgue lorsque Lavoisier décide d'organiser en grand les expériences de décomposition/recomposition de l'eau en février 1785, en présence des commissionnaires de l'Académie Royale des Sciences qui viennent observer, assister les auteurs et surtout poser les scellés sur les appareils et signer les registres de Lavoisier afin de témoigner de la conformité des calculs à ce qu'ils ont vu.

Considérées dans leur globalité, les différences de pratique et de méthodologie qui opposent Priestley et Lavoisier témoignent de deux modes de vie scientifiques que les historien(ne)s ont mis en rapport avec la nature des communautés savantes et le rôle contrasté des philosophes naturels dans les sociétés d'Ancien Régime britannique et française (61). L'empirisme des Anglais illustré par la culture de la réplication, la circulation des savoir-faire, le pragmatisme instrumental et l'**opposition aux généralisations** va de pair avec une figure de savant sans liens directs avec le pouvoir politique, collaborant sur un pied d'égalité (formelle) avec les artisans, attentif à l'utilité marchande, membre d'une collectivité aux frontières mouvantes incluant amateurs et conférenciers itinérants. À l'inverse, la communauté française est beaucoup plus hiérarchisée avec au centre, l'Académie et ses savants "professionnels" qui définissent la **loi naturelle**, applicable en tous lieux et en tous temps, acquise par la construction fragile de l'uniformité expérimentale. Considérant le monde des artisans comme étranger, cette élite entretient avec lui deux sortes de commerce : d'une part, la commandite ; d'autre part, la rationalisation des techniques et leur enseignement. Placés dans une position de "service public" à cause de l'appui du Roi, les Académiciens sont méfiants vis-à-vis du "commerce" et soucieux de réformes qui réconcilieraient les besoins de l'État et l'intérêt du public (62). Ainsi, ce que laisse percevoir la querelle du phlogistique et de l'oxygène, c'est le contraste entre la société civile des débuts de la révolution industrielle anglaise et le mouvement encyclopédiste de la fin de la monarchie absolue en France.

4. POURQUOI REJOUER LA GUERRE DU PHLOGISTIQUE ET DE L'OXYGÈNE ?

Tout cela est bel et bon pour l'historien, mais que peut bien en faire un pauvre élève qui a bien du mal à donner un sens à la notion de gaz, ou à réussir l'écriture d'un bilan réactionnel ? Posée en ces termes, la question n'appelle qu'une réponse : il faut apporter l'histoire des sciences à doses homéopathiques. On a vu qu'interroger les cultures spontanées pouvait suggérer l'intérêt d'une pratique de "transfert"

où l'on rejouerait la "guerre du phlogistique et de l'oxygène" pour révéler et déplacer des représentations spontanées en **guidant**, sans trop d'ambiguïté vers la solution de l'énigme : le savoir chimique qu'il conviendra de retenir. L'inconvénient d'une telle organisation est qu'elle ne peut pas prendre au sérieux la pratique de découverte, en particulier la difficile gestion de l'incertitude expérimentale et la sous-détermination épistémologique de la controverse historique. Ces limites laissent entrevoir deux horizons possibles pour une extension des usages de l'histoire au-delà de séquences centrées sur les expériences cruciales (63). D'une part, le rôle des savoir-faire expérimentaux dans la mise en place, l'acceptation ou la circulation des schèmes cognitifs : par exemple, les liens entre la genèse des dispositifs de mesure des volumes et des masses des gaz, la substitution calorifique/phlogistique et les définitions respectives des "principes" et des "éléments". D'autre part, la pratique de la science comme une activité collective, d'ordre probabiliste, procédant d'une hiérarchisation d'objectifs, d'hypothèses et de valeurs illustrée par le débat sur la quantification et la précision.

La recherche d'un **dispositif** de pédagogie des sciences **centré sur la narration historique** nous semble pouvoir répondre à trois séries d'objectifs.

A. Des enjeux épistémologiques

- Donner une image moins figée et inaccessible de la science en montrant que la genèse des savoirs n'est pas un processus d'illumination géniale ou le résultat de la seule observation de la nature, mais passe par un travail de construction des objets et des choix.
- Renforcer les capacités critiques en montrant que la science n'est pas une accumulation linéaire de "vérités" de plus en plus "vraies", mais une activité sociale riche en controverses et négociations, dépourvue de solutions de continuité logiques.

B. Des enjeux de culture et de méthodologie historique

- Donner une image plus complète du mouvement des Lumières en y intégrant l'expansion de la philosophie naturelle.
- Préciser la diversité des sociétés d'Ancien Régime et de leur transformation par la Révolution et la révolution industrielle en comparant France et Grande-Bretagne pour ce qui est de la nature des institutions scientifiques, du rôle des savants et de leurs relations aux différentes couches de la société.
- Montrer comment un texte scientifique peut être traité comme un document historique en interrogeant ses conditions d'écriture, sa forme, ses destinataires.

les objectifs
d'une réplique
ouverte

C. Des enjeux de culture scientifique

- Donner aux élèves l'occasion de faire jouer un ensemble d'hypothèses, de manipulations et d'interprétations sur la combustion, la nature des gaz et les réactions d'oxydation.
- Renforcer le sens de la pratique de laboratoire en donnant la possibilité d'une expérimentation ouverte sur la manipulation et les propriétés des gaz.
- Faire approcher la cohérence (et les présupposés) de notre conception de l'oxygène comme élément gazeux, des oxydations comme des réactions équilibrées avec conservation de la masse, en mettant en scène le conflit entre les innovations de la "Révolution chimique" et les représentations antérieures porteuses d'analogies avec les notions couramment partagées par les élèves.

comment clore
la controverse ?

Pour cela, il faut toutefois accepter d'utiliser la controverse d'Ancien Régime pour multiplier les possibilités de manipulations et d'interprétation et recréer une situation d'incertitude qui, à l'inverse de l'illusion de la découverte, sera canalisée par la matière historique. Pour l'enseignant-historien, l'ambiguïté de l'approche tient au fait qu'en "reproduisant" les manipulations de Lavoisier ou Priestley on joue avec l'anachronisme en s'appuyant sur un réalisme minimal qui consiste à admettre que si l'oxygène de Lavoisier n'est pas le même que le nôtre, la bougie qui s'éteint sous une cloche de verre aujourd'hui ressemble suffisamment à la bougie qui s'éteint sous les cloches dans les textes de Priestley et Lavoisier pour que l'on puisse éclairer l'une par l'autre. Ce, tout en sachant qu'on ne reproduit pas leurs expériences ; qu'on ne peut pas percevoir, réfléchir et interpréter comme il y a plus de deux siècles. Pour l'enseignant-chimiste, la difficulté tient à la nécessité de négocier l'équilibre entre, d'une part, une présentation "symétrique" destinée à préserver la situation d'**incertitude** indispensable à la prise au sérieux du jugement scientifique et à l'apprentissage du choix circonstancié et, d'autre part, une introduction au point de vue contemporain pour comprendre que notre chimie de la combustion hérite plus de Lavoisier que de Priestley. La solution retenue ne peut être que pragmatique. Un travail sur les textes successifs de Lavoisier peut, par exemple, permettre de relativiser le caractère décisif de l'expérience isolée pour créer la dissymétrie et laisser jouer "le temps" en faveur de Lavoisier.

Comme toute pratique pluri-disciplinaire, cette juxtaposition est génératrice de mauvaise science (on perd du temps sur des expériences mal faites ou des idées fausses) et de mauvaise histoire (on élimine des pans entiers de la culture scientifique passée et on en tord la perception par la confrontation à nos matériaux et à nos pratiques). Son intérêt est qu'elle facilite la construction d'une situation socio-cognitive plus ouverte.

Comme Lavoisier ne l'a jamais dit : "Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme". En pédagogie comme en philo-

pragmatisme
pédagogique et
usages de
l'incertitude

sophie naturelle. En conséquence, on peut s'attendre à ce que l'utilisation d'une séquence qui privilégie pratique pluridisciplinaire, jugement critique et apprentissage des savoir-faire se paie d'un prix en termes d'accumulation de connaissances. L'enjeu n'est pas spécifique aux articulations entre histoire des sciences et pratique pédagogique, c'est celui de la négociation d'un équilibre entre "esprit de système" et "esprit de découverte". La controverse Priestley/Lavoisier et ses usages suggèrent toutefois que l'intérêt d'une transposition pédagogique des situations de controverse tient justement de la possibilité de renouveler notre image de la science et les termes du conflit à partir des matériaux fournis par la "fabrique" de la science.

Jean-Paul GAUDILLIÈRE
INSERM U 158
Hôpital Necker-Enfants Malades
Paris

NOTES

- (1) Dans la mesure où cette réflexion s'appuie sur des travaux étrangers à mon domaine d'élection, je tiens particulièrement à remercier les spécialistes de Lavoisier, du XVIII^{ème} siècle et de l'histoire des sciences physiques qui par leur travail, leurs conseils et critiques ont permis à ce texte de voir le jour : Bernadette Bensaude-Vincent, Christine Blondel, Christian Licoppe et Otto Sibum. Toute la responsabilité des opinions, erreurs et omissions est évidemment mienne.
- (2) SHORTLAND M., WARWICK A. (eds), (1989), *Teaching the History of Science*, Oxford.
- (3) Department of Education and Science and the Welsh Office (1989), *Science in the National Curriculum*, London, HMSO.
- (4) Le texte introductif de l'objectif 17 (The nature of science) du *National Curriculum* dit ainsi : "*Pupils should develop their knowledge and understanding of the ways in which scientific ideas change through time and how the nature of these ideas and the uses to which they are put are affected by the social, moral spiritual and cultural contexts in which they are developed.*"
- (5) RAICHVARG D. (1987), "La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ?" *Aster*, n° 5.
- (6) GIORDAN A., DE VECCHI G. (1988), *L'origine des savoirs. Des conceptions des apprenants aux savoirs scientifiques*, Delachaux-Niestlé.
DRIVER R., GUESNE E., TIBERGHEN A. (eds), (1985), *Children's Ideas in Science*, Open University Press, Stratford.
- (7) KNOX J. (1985), *A Study of Secondary Student's Ideas about the Process of Burning*, M. Ed. thesis, University of Leeds.
DRIVER R., "Beyond Appearances : The Conservation of Matter under Physical and Chemical Transformations", in DRIVER et al, op. cit. réf (6), p. 145-169.
- (8) Voir aussi : MÉHEUT M., SALTIEL E., TIBERGHEN A. (1985), "Student's conceptions about combustion (11-12 years old)", *European Journal of Science Education*, Vol 7, p. 83-93.
MÉHEUT M. (1989), "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes", *Bulletin de l'union des physiciens*, numéro 716, p. 997-1012.
- (9) Correspondant par exemple aux différentes composantes d'un profil épistémologique telles qu'un Bachelard pouvait les décrire.

- (10) Sur ce point, voir les contributions de GOODING D., SHAPIN S. in *Teaching the History of Science*, op. cit. réf. (2).
 Voir aussi : GAUDILLIÈRE J.-P. "L'histoire des sciences peut-elle servir la didactique ? Le constructivisme cognitif entre épistémologie et histoire sociale", in *La méthode et les méthodes*, Amiens, CRDP, sous presse.
- (11) PUMFREY S. "The Concept of Oxygen, Using History of Science in Science Teaching", in réf. (2), p. 142-155.
- (12) La littérature sur la Révolution Chimique est très importante. Pour une première analyse, on pourra se référer à BENSAUDE-VINCENT B. et STENGERS I. (1993), *Histoire de la chimie*, Paris, La Découverte. Pour une présentation des tendances récentes de l'historiographie, voir le numéro spécial de la revue *Osiris* paru en 1988. Sur Lavoisier comme "fondateur-précurseur" de la révolution chimique voir BENSAUDE-VINCENT B. (1993), *Lavoisier*, Flammarion, Paris, 1993.
- (13) On a choisi de respecter ici la nomenclature des gaz existant avant la "réforme" de Lavoisier (cf. infra). On prendra donc pour définition des différents airs leurs conditions de production et/ou leurs principales propriétés.
Air fixe : à la suite de Joseph Black, le terme est utilisé pour désigner l'air spécifique obtenu par traitement acide de la chaux magnésienne ou de la craie. Il est irrespirable et ne permet pas la combustion d'une flamme.
Air nitreux : il est obtenu par Priestley par dissolution d'un métal (autre que le plomb ou le zinc, généralement du cuivre) dans l'acide nitrique (esprit de nitre) ; il est caractérisé par une réaction avec l'air qui produit des fumées rouges temporaires et un acide ; il est irrespirable, mais permet la combustion d'une flamme.
Air inflammable : il est obtenu par Cavendish à partir de la dissolution d'un métal dans l'acide sulfurique (acide vitriolique) ; il est caractérisé par sa réaction violente avec l'air et son inflammabilité.
Mofette : le terme est utilisé pour désigner les airs non respirables, ne permettant pas la combustion.
 Les correspondances habituellement retenues sont les suivantes : air fixe et dioxyde de carbone, air nitreux et monoxyde d'azote, air inflammable et hydrogène, mofette et azote.
- (14) Par analogie avec la transformation de la craie en chaux, la calcination d'un métal désigne alors la formation d'une chaux métallique par chauffage au contact de l'air.
- (15) Pour Georg Stahl, qui en a fait un concept clé, le phlogistique est une matière subtile qui unifie les différentes manifestations associées aux réactions qui font intervenir l'air, les terres et le feu : dégagement de chaleur, de lumière, de vapeurs expansibles. Le phlogistique s'échappe lors de la combustion du charbon, de la calcination et de la corrosion des métaux. Il est parfois aussi plus directement "matière du feu" comme pour le chimiste français Rouelle. Voir : BENSAUDE-VINCENT B., STENGERS I., op. cit. réf. (12).
- (16) Pour cette partie : MC EVOY J. (1975), *Joseph Priestley : Philosopher, Scientist and Divine*, University of Pittsburgh, PhD thesis.
- (17) Il s'agit d'une chaux rouge obtenue en faisant bouillir du mercure pendant très longtemps ou encore en dissolvant le métal dans de l'acide nitrique puis en précipitant la solution.
- (18) DAUMAS M. (1955), *Lavoisier théoricien et expérimentateur*, Paris, Presses Universitaires de France.
- (19) Sur l'utilisation de la balance par Lavoisier, voir BENSAUDE-VINCENT B., op. cit. réf. (12).
- (20) GCSE : General Certificate of Secondary Education, passé vers quinze-seize ans.
- (21) *Chemistry for the GCSE*, Longham (1992). On a une structure analogue dans les manuels français qui introduisent Lavoisier. Voir par exemple : *Sciences Physiques Seconde*, Nathan.
- (22) Parmi les variantes : la mention des travaux de Scheele ou l'abondance des détails biographiques sur Priestley et Lavoisier.
- (23) Voir annexe réf. (11).

- (24) Parmi les classiques voir DAUMAS M., op. cit. réf. (18).
 GUERLAC H. (1961), *Lavoisier - The Crucial Year : The Background and Origins of His First Experiment in Combustion in 1772*, Cornell University Press.
 MAC KIE D. (1980), *Antoine Lavoisier*, New York, A Da Capo.
- (25) HOLMES F.L. (1985), *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Madison, Wisconsin University Press.
 PERRIN C.E. "Research Traditions, Lavoisier, and the Chemical Revolution". *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 53-81.
 GOUGH J.B. "Lavoisier and the Fulfillment of the Stahlian Revolution". *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 15-33.
- (26) HOLMES F.L., op. cit. réf. (25), Chapter 2, "Lavoisier in Midstream".
- (27) PRIESTLEY J. (1790), *Experiments and Observations on Different Kinds of Air*, Birmingham, Vol I p. 354-364.
- (28) La question n'est pas ici celle de la standardisation : il n'y a aucune indication que Lavoisier ait procédé d'une façon plus proche de celle de Priestley et il n'y a aucun moyen de savoir ce qui a changé par rapport aux premières observations.
- (29) GUERLAC H., op. cit. réf. (24).
 MORRIS R.J. "Lavoisier and the Caloric Theory", *British Journal for the History of Science*, 1972, Vol. 6, p. 1-38.
 SIEGFRIED R. "Lavoisier's View of the Gaseous State and Its Early Application to Pneumatic Chemistry", *Isis*, 1972, Vol. 63, p. 59-78.
 CROSLAND M. "Lavoisier's Theory of Acidity", *Isis*, 1973, Vol. 63, p. 349-355.
 MC EVOY J. (1987), "Causes and Laws, Powers and Principles : The Metaphysical Foundations of Priestley's Concept of Phlogiston", in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust, p. 55-71.
 Voir aussi : PRIESTLEY J. (1776), *Experiments and Observations on Different Kinds of Air and Branches of Natural Philosophy connected with the subject*, Birmingham, II. Traduction française, Paris 1777, p. 33-55.
 HOLMES F.L. "Lavoisier's Conceptual Passage", *Osiris*, 1988, Vol. 4, p. 82-94.
 Voir aussi les conclusions du mémoire de 1775 sur l'expansibilité : LAVOISIER A. "Mémoire sur la nature du principe qui se combine avec les métaux pendant leur calcination, et qui en augmente le poids", *Mém. Acad. Sci.* 1775 (publié 1778), p. 520-526.
- (30) HOLMES F.L. *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Chapter 1, "An Ambitious Agenda".
 KOHLER R. "Lavoisier's Rediscovery of the Air from Mercury Calx : A Reinterpretation", *Ambix*, Vol. 22, 1975, p. 52-57.
- (31) HOLMES F.L. *Lavoisier and the Chemistry of Life*, Chapter 4, "Respiration and a general theory of combustion".
- (32) Voir aussi les contributions des historiens du XVIIIème siècle sur la politique de Priestley :
 PARKER J. (1914), *Dissenting Academies*, Cambridge, Cambridge University Press ;
 GARRETT C. (1975), *Respectable Folly : Millenarians and the French Revolution in France and England*, Johns Hopkins University Press.
 Voir aussi ses liens avec les artisans et industriels : SCHOFIELD R.E.(1963), *The Lunar Society of Birmingham. A social History of Provincial Science and Industry in Eighteenth Century England*, Oxford, Clarendon Press.
 Sur l'agronomie et l'économie politique de Lavoisier : MAC KIE, op. cit. réf. (24) 1980.
 Sur son rôle à l'Académie Royale des Sciences : HAHN R.(1971), *The Anatomy of a Scientific Institution, The Paris Academy of Sciences*, p. 1666-1803, Berkeley, University of California Press.
- (33) GOLINSKI J. (1991) *Science as Public Culture. Chemistry and Enlightenment in Britain, 1760-1820*. Cambridge, Cambridge University Press.
 STEWART J. *The Rise of Public Science. Rhetoric, Technology and Natural Philosophy in Newtonian Britain, 1660-1750*, Cambridge University Press.
- (34) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 145-166.
- (35) GOLINSKI J. (1991), *Science as Public Culture*. Chapter Four : "Airs and their uses".
 SCHOFIELD R.E., op. cit. réf. (32).

- (36) GOLINSKI J, op. cit. réf. (33), p. 105-116.
 PRIESTLEY J. (1777), *Expériences et observations sur les différentes sortes d'air*, Paris, Vol. III, p. 90-94, p. 228-258.
- (37) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 220-229.
 PRIESTLEY J., op. cit., vol. I., p. 140-154.
- (38) SCHAFFER S. (1990), "Measuring Virtue : Eudiometry, Enlightenment and Pneumatic Medicine", in *The Medical Enlightenment of the XVIIIth Century*, Cunningham A., French R. (eds), Cambridge University Press.
 GOLINSKI J., op. cit., p. 117-128.
 Lavoisier lui même en fait un instrument de "santé publique" : HOLMES F. (1985), op. cit. réf. (25), p.94-95.
- (39) SCHAFFER S. (1987), "Priestley and the Politics of Spirit" in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust, p. 39-53.
- (40) MAC EVOY J. (1987), "Causes and Laws, Powers and Principles : The Metaphysical Foundations of Priestley's Concept of Phlogiston", in *Science, Medicine and Dissent. Joseph Priestley (1733-1804)*, London, Wellcome Trust.
- (41) MAC EVOY J. Thèse, op. cit. réf. (16), p. 203-209.
- (42) PRIESTLEY J. (1790) *Experiments and Observations on Differents Kinds of Air and Branches of Natural Philosophy connected with the subject*, Birmingham, Trad. française, vol. II, p. 120-125.
- (43) LICOPPE C. "La Naissance de la physique expérimentale à la fin du XVIIIème siècle". Manuscrit non publié.
- (44) GILLISPIE C., (1980), *Science and Policy in France at the End of the Old Regime*, Princeton University Press, chapter 1 et chapter 6.
- (45) GILLISPIE C., op. cit., p. 65.
- (46) GILLISPIE C., op. cit., p. 67.
- (47) Les *alkalis* sont les substances basiques obtenues à partir de la potasse ou de la soude.
- (48) LAVOISIER A. (1776), *Recueil de mémoires et d'observations sur la formation et sur la fabrication du salpêtre*, Paris.
- (49) MAUSSKOPF S.H. (1988), "Gunpowder and the Chemical Revolution", *Osiris*, Vol. 4, p. 93-118.
- (50) "...la détonation du nitre n'a pas lieu sans l'addition de charbon, ou de quelque corps qui contient du phlogiston, et il est très possible que dans ces circonstances l'air commun soit converti en air fixe ; de là, il s'ensuivrait que l'air associé dans le nitre, et qui produit la terrible explosion de la poudre, serait de l'air atmosphérique commun privé de son expansibilité." Pour la publication du manuscrit, en 1778, Lavoisier transformera l'interprétation en fonction de l'introduction de l'oxygène et de sa nouvelle approche des acides et de l'air fixe : l'air combiné dans le nitre devient la partie hautement respirable de l'air et la détonation sera une conversion de celui-ci en air fixe en présence de charbon.
- (51) Pour une illustration d'un (ancien) régime de constitution du savoir basé sur le témoignage collectif et la présence sensible (visible) du phénomène se distinguant de la version "radicale" de Priestley, on prendra les écrits de Boyle et son rôle dans la constitution de la Royal Society. Voir : SHAPIN S., SCHAFFER S. (1985), *Leviathan and the Air-Pump. Boyle, Hobbes and Experimental Life*. Princeton, Princeton University Press.
- (52) Voir par exemple, le commentaire de l'expérience de 1785 sur la composition de l'eau : "Cette expérience nécessite un appareillage si coûteux, et tant de précautions qu'on ne peut pas s'attendre à la voir souvent répétée ; et dans de telles circonstances on ne peut s'empêcher de suspecter l'exactitude du résultat de cette expérience et la certitude de la conséquence qu'on en tire". PRIESTLEY J. (1798), *Réflexions sur la doctrine du phlogistique et la décomposition de l'eau*, traduction française, Paris, p. 32.

- (53) "Il me paraît très extraordinaire qu'une théorie si nouvelle et si importante, qui renverse presque tout ce qui était le mieux établi en chimie, se trouve appuyée sur une base aussi peu solide puisque les expériences qui ont servi à la fonder, sont non seulement ambiguës et explicables par l'ancienne hypothèse, mais en très petit nombre". PRIESTLEY J. (1798), op. cit., p. 31.
- (54) Ainsi lors de la controverse sur la gazéification de l'eau qui oppose Priestley et Nooth, le premier est moins gêné par l'incapacité de Nooth à reproduire les manipulations que par le fait que cette impuissance signale l'exigence d'un savoir-faire exceptionnel qui mettrait en cause la diffusion du dispositif et son utilité. GOLINSKI J., op. cit. réf. (33) p. 114.
- (55) LICOPPE C. op. cit. réf. (43), p. 54-83.
- (56) LUNDGREN A. (1990), "The Changing Role of Numbers in 18th Century Chemistry", in Frangmyr T., Heilbron J.L., Rider R.E. (eds), *The Quantifying Spirit in the 18th Century*, University of California Press, p. 245-266.
- (57) MAC EVOY J. "Continuity and Discontinuity in the Chemical Revolution", *Osiris*, Vol. 4, 1988, p. 195-213.
- (58) PERRIN C. "Lavoisier, Monge and the Synthesis of Water", *British Journal for the History of Science*, Vol. 6, 1973, 424-428.
HOLMES F. op. cit. réf. (25), Chapter 7, "Water Divided".
LAVOISIER A. "Mémoire dans lequel on a pour objet de prouver que l'eau n'est point une substance simple, mais une combinaison binaire d'hydrogène et d'oxygène." Lu à la rentrée publique de la St Martin 1783. *Oeuvres II*, p. 341.
- (59) LAVOISIER A. op. cit. Introduction.
- (60) MAC EVOY J. op. cit. réf. (57), 1988, p. 206.
- (61) Au-delà de ce résumé succinct, voir : GOLINSKI J. op. cit. réf. (33) Chapter 3, Chapter 5 ; GILLISPIE op. cit. réf. (44), Chapter 2 ; HAHN R. (1990), *The Anatomy of a Scientific Institution, The Paris Academy of Sciences, 1666-1803*, Berkeley, University of California Press.
- (62) Par exemple dans les travaux de Lavoisier sur l'agriculture et l'économie politique. PERROT J.C. (1992), "Lavoisier" in *Une histoire intellectuelle de l'économie politique*, Paris, EHESS.
- (63) À ce propos voir la séquence sur la calcination du cuivre présentée par A. Giordan à partir d'un film réalisé dans une classe de chimie. GIORDAN A., DE VECCHI G., op. cit. réf. (6), p. 59-62.

TENTATIVE DE DÉFINITION D'UN SAVOIR PROFESSIONNEL SUR LE CHANGEMENT CHIMIQUE POUR LA FORMATION DES ENSEIGNANTS

Rosa Martín del Pozo

Un des problèmes fondamentaux de la formation initiale des professeurs a trait aux connaissances qu'il faut leur enseigner pour qu'à leur tour, ils apprennent à enseigner à leurs élèves. Ce problème est envisagé ici dans le contexte de la formation initiale de professeurs qui auront à enseigner les premières connaissances de chimie à des élèves de 12 à 14 ans. De quelles connaissances relatives aux changements chimiques ont-ils besoin ? Les réponses les plus fréquentes dans la pratique de la formation initiale souffrent d'un réductionnisme disciplinaire, qui ignore les particularités propres au savoir professionnel qu'est le savoir scolaire. La nécessité s'impose donc d'un savoir construit spécifiquement pour faciliter l'évolution des conceptions scientifiques et didactiques des futurs professeurs.

un cadre
théorique et
pratique : le
projet curriculaire
IRES

Dans le projet curriculaire "Recherche et rénovation scolaire" IRES (1), cadre dans lequel se situe notre travail, la formation initiale est conçue comme une **première phase du développement professionnel**, en relation avec la formation permanente (2). Ce développement professionnel est un processus de construction associé à la fois à l'expérience de l'enseignement et à la recherche didactique liée à la transformation qualitative des processus d'enseignement-apprentissage. L'objectif en est que les professeurs réélaborent leurs propres conceptions scientifiques et didactiques. Pour ce faire, il faut s'appuyer sur un savoir professionnel qui servira de référence, et non pas d'aboutissement, dans le processus de formation.

Dans ce qui suit, nous tenterons de caractériser ce savoir professionnel de référence, et surtout de lui donner un contenu à partir d'une analyse des sources contenant une information pertinente sur l'enseignement du changement chimique.

1. LA PROFESSIONNALISATION DU SAVOIR DANS LA FORMATION INITIALE DES PROFESSEURS

La formation des futurs professeurs dans les contenus scolaires qu'ils auront à enseigner est l'une des composantes essentielles de la formation au professorat. Pourtant, ce qui paraît évident pour la profession se conçoit et se pratique de

manière très diverse, selon ce que l'on entend par enseigner, apprendre et être professeur.

L'analyse des différents modèles de formation initiale (3) met en évidence l'existence de deux graves défauts relatifs au savoir que l'on se propose d'enseigner aux futurs professeurs :

réductionnisme
du savoir
enseigné aux
futurs professeurs

- la **non professionnalisation des contenus de disciplines** ou leur manque d'adaptation au contexte de la formation initiale. Ces contenus semblent avoir été choisis sans prise en compte du fait que l'on s'adresse à de futurs enseignants. Il s'agit alors, en ce qui nous concerne, d'une formation centrée sur la chimie comme discipline scientifique, suivant les programmes d'initiation universitaire. La référence à l'évolution et aux processus de construction des connaissances en chimie y est faible ou même inexistante. Les connaissances à enseigner aux futurs professeurs sont conçues, au fond, comme une répétition et/ou un développement des connaissances de chimie des niveaux antérieurs, puisque ceux-ci manifestent encore de graves lacunes dans la compréhension de concepts chimiques de base et qu'"on ne peut pas enseigner ce qu'on ne sait pas". Pour enseigner, on considère qu'il suffit de maîtriser et de transmettre ces connaissances ;

- la **dissociation entre les contenus disciplinaires et la méthodologie de l'enseignement**, dans les programmes de formation. On a affaire dans ce cas à une formation centrée sur une version instrumentale de la didactique - didactique de la chimie, en ce qui nous concerne. Dans cette conception, les connaissances à enseigner aux futurs professeurs consistent en un ensemble de techniques pédagogiques de programmation des activités portant sur les contenus scolaires. Ceux-ci sont considérés comme donnés dans les programmes prescriptifs, les manuels ou les autres documents didactiques. On estime que les connaissances que doivent apprendre les élèves les plus jeunes sont très simples, et que c'est avant tout la façon de les enseigner que les professeurs doivent apprendre. Pour enseigner, il suffira qu'ils maîtrisent les techniques que fournit la didactique.

une nécessité :
professionnaliser
le savoir

Il faut sortir de cette alternative si l'on veut former le futur professeur à être un facilitateur de l'apprentissage de ses élèves, engagé dans la recherche des processus d'enseignement/apprentissage en classe, et non un simple transmetteur de connaissances et un exécutant technique. Cela implique, à notre avis, la **professionnalisation des contenus de formation**, c'est-à-dire la définition de connaissances élaborées spécifiquement pour servir de référence dans le processus de formation professionnelle des futurs enseignants. Les domaines de connaissances seront choisis, non pas de façon quelconque, mais pour rendre les enseignants capables d'affronter les contenus du programme scolaire, et donc de les réélaborer. Ainsi que le signale Perron (4), la perspective d'enseigner donne un caractère différent aux contenus de la discipline, puisqu'il s'agit d'une

formation sur les disciplines, et non dans les disciplines. Pour Martinand (5), cette position signifie que *l'enseignement est la pratique de référence dans la formation initiale*, et qu'elle légitime un traitement spécifique des contenus de la chimie et donne sa cohérence aux problèmes, aux activités et aux ressources à utiliser dans le processus de formation initiale. De cette manière, on prend de la distance par rapport au *modèle de prolongation de la scolarité* des étudiants qui se destinent au professorat (6).

Il s'agit d'offrir au futur professeur la possibilité de réfléchir sur les savoirs qu'il aura à enseigner, et sur la manière dont les élèves pourront les apprendre. Les contenus de la formation initiale doivent alors prendre en compte les objectifs et les modalités de mise en oeuvre de l'enseignement en classe. Si ce n'est pas le cas, la formation renforce la chaîne qui, selon Gimeno (7), va de l'étudiant-récepteur au professeur-consommateur dénué d'esprit critique à l'égard des documents pédagogiques, et simple "transmetteur" pour ses futurs élèves.

Cette position exige de nous, comme formateurs des futurs professeurs, de mener à bien un travail en profondeur sur les connaissances relatives au savoir chimique, mais avec des entrées didactiques. En ce sens, pour Bromme (8), les connaissances disciplinaires (des sciences de l'éducation et des sciences de la Nature) exigent une *transformation heuristique* et une intégration pour devenir potentiellement utilisables pour le futur enseignant dans sa pratique. Cette exigence est en relation avec le processus de transformation de la connaissance socialement organisée en connaissance scolaire, connu sous le nom de *transposition didactique*, que différents auteurs (9) décrivent.

En accord avec le Groupe de recherche sur l'école (10), nous pouvons regrouper les sources pertinentes pour l'élaboration d'un savoir professionnel de référence selon le type de connaissances qu'elles apportent :

- sources d'informations correspondant au savoir socialement organisé dans les disciplines scientifiques. Nous faisons allusion aux connaissances scientifiques correspondant aux différentes sciences de l'éducation - y compris la didactique des sciences, et aux sciences de la Nature - la chimie pour ce qui nous concerne, son histoire, son épistémologie propre ;
- sources d'informations correspondant au savoir empirique, fruit de la tradition et des pratiques innovantes de l'enseignement ;
- sources d'informations correspondant aux connaissances sur les conceptions des étudiants-professeurs en ce qui concerne les contenus scientifiques, l'enseignement et l'apprentissage (dans les limites de cet article, il ne nous sera pas possible de développer cette dimension).

Le défi que nous nous sommes fixé est de sélectionner et d'organiser, à partir des informations que nous fournissons

une exigence :
réélaborer les
diverses
connaissances

les sources du
savoir
professionnel

ces sources, une connaissance professionnelle qui nous serve de référence pour nos interventions dans le processus de formation et qui permette aux étudiants-professeurs de reconstruire leur propre savoir à des niveaux de plus grande complexité.

2. LE CHAMP CONCEPTUEL ASSOCIÉ AU CHANGEMENT CHIMIQUE

Pour tenter de définir les connaissances professionnelles souhaitables, nous ferons d'abord un détour par une large analyse disciplinaire, centrée sur la structure et l'évolution du champ conceptuel associé au changement chimique. C'est ce que divers auteurs (11) nomment *l'analyse du contenu à enseigner*. En d'autres termes, nous allons traiter de la connaissance du contenu, comme composante du savoir professionnel. Pour cela, nous utiliserons les informations issues de l'histoire et de l'épistémologie de la chimie, ainsi que des études didactiques qui analysent ce champ conceptuel.

Les **périodes historiques** que nous distinguons dans cette étude sont celles qui apparaissent dans les textes spécialisés de l'histoire de la chimie (12) et qui, d'autre part, coïncident avec celles qui sont caractérisées dans différentes études didactiques :

- les premières conceptions autour de la matière et des transformations observables dans la nature qui supposent de surmonter la pensée mythique au profit de la pensée philosophique. Dans cette période sont en débat les conceptions pluralistes et mécanistes de la matière et des changements, qui auront une grande influence dans le développement des connaissances en chimie ;
- l'alchimie, qui a représenté un développement des connaissances à caractère pratique ;
- la période de quantification de la chimie, au cours de laquelle sont apparues les premières interprétations chimiques de données empiriques ;
- l'élaboration et le développement de la théorie atomico-moléculaire au dix-neuvième siècle, qui a représenté la première théorie scientifique en chimie, à partir de laquelle les lois quantitatives ont pris un sens nouveau ;
- la "quantification" et la "mathématisation" des connaissances en chimie qui se sont réalisées au vingtième siècle.

L'analyse historique est conduite d'un point de vue didactique, puisque nous nous proposons d'intégrer la perspective de la pratique sociale de référence - l'enseignement - dans la formation. Pour cela, il importe de faire surgir les problèmes, les cadres conceptuels, les *concepts-clés* ou *structurants* (13) et les *référents empiriques* (14) sur lesquels

périodes
historiques dans
le
développement
du savoir
chimique

se sont construites les notions, toujours plus complexes, relatives au changement chimique.

2.1. Des obstacles épistémologiques historiques aux concepts structurants

Une approche historique du concept de changement chimique nous permet de voir l'existence d'un processus non linéaire dans lequel, par exemple, coexistent des interprétations opposées des mêmes faits (théories du phlogistique et de l'oxydation). C'est un processus qui n'est pas cumulatif à partir de l'observation, dans lequel, par exemple, des faits déjà connus (l'obtention de corps simples à partir de corps composés) peuvent donner lieu à de nouvelles interprétations (les corps composés sont formés d'atomes différents et les corps simples, sont formés d'atomes identiques). C'est, de plus, un processus discontinu, dans lequel on rencontre des interprétations qui rendent difficiles le progrès de la connaissance des phénomènes chimiques, qui, pour être surmontées, ont exigé des ruptures successives, plus ou moins profondes, de chacun des cadres explicatifs. Toutes ces remarques sont en accord avec les analyses de l'épistémologie des sciences actuelle, et elles ont été exposées par de nombreux auteurs (15) dans le champ propre de la didactique des sciences.

L'identification des obstacles qui, tout au long de l'histoire d'un concept, ont été surmontés, constitue une référence obligée, un point de départ pour pouvoir caractériser et expliquer certaines des difficultés dans le processus d'apprentissage des savoirs scolaires. Il est clair qu'il ne s'agit pas d'identifier les obstacles dans la construction du savoir scientifique avec ceux de la construction du savoir scolaire par les élèves. En revanche, il paraît évident que, sous des formes différentes, certains obstacles qui apparaissent dans le développement historique sont également détectés dans le processus d'apprentissage. Ce sont ceux-là qui, pour nous, présentent le plus d'intérêt.

Les études de didactique qui conduisent une analyse historique des concepts liés au changement chimique (16) font référence à deux **obstacles** fondamentaux qui ont coexisté durant des siècles dans l'enseignement de la chimie : **le substantialisme et le mécanisme**. La substantialisation des propriétés entraîne l'idée que le changement chimique est la transformation des propriétés des substances, sans que cela implique un changement d'identité, les principes porteurs des nouvelles propriétés étant déjà présents dans les substances initiales. Le mécanisme explique les propriétés des substances en les transférant au niveau atomique, de telle sorte que le changement chimique apparaît comme la conséquence du changement de forme, de taille ou de mouvement des atomes, c'est-à-dire comme une sorte de mutation des atomes.

la construction
du concept de
savoir chimique :
un processus non
linéaire, non
accumulatif ni
continu

les obstacles
substantialistes et
mécanistes dans
la
compréhension
du changement
chimique

la quantification
et l'atomisme
chimique pour
surmonter les
obstacles

Dans l'histoire de la chimie, deux voies ont permis de surmonter ces obstacles :

- l'abandon des approximations qualitatives dans l'étude des changements chimiques, en faveur d'une perspective quantitative. Ceci a permis de différencier les changements physiques et chimiques en fonction d'une loi quantitative : la loi des proportions définies ;
- l'établissement de relations entre les niveaux macroscopique et microscopique dans le cadre de l'atomisme chimique, c'est-à-dire dans le cadre de la pluralité : à chaque élément correspond un type d'atome, qui se différencie par sa masse et sa capacité combinatoire. Ainsi, les changements chimiques sont des processus de réorganisation des atomes des éléments, dans lesquels se conserve leur identité.

En tenant compte de cela, Llorens (17) établit un ensemble de **concepts structurants** au niveau des descriptions macroscopique et microscopique des phénomènes chimiques.

les concepts
structurants pour
faciliter
l'apprentissage

- En premier lieu, les concepts opératoires de **substance** et d'**élément** permettent une conceptualisation qualitative des changements chimiques comme transformation des substances, définies par leur composition, et comme conservation des éléments, tandis que dans les changements physiques (mélanges), les substances se conservent. Ces concepts permettent également une vision quantitative, selon laquelle, dans les changements chimiques, la proportion pondérale des substances initiales est une constante, alors qu'elle est variable dans les mélanges.
- En second lieu, le concept d'**atome**, dans la théorie atomico-moléculaire, permet d'associer un élément avec un type d'atome, et de décrire les changements chimiques comme une transformation de l'organisation des atomes de laquelle il résulte que de nouvelles substances sont produites.
- En troisième lieu, les concepts d'**ion** et de **liaison chimique** permettent une première explication en termes de structure de la matière (modèles atomiques les plus élémentaires), et non seulement en termes de composition : les changements chimiques supposent une interaction entre les atomes, au cours de laquelle se rompent et se forment de nouvelles liaisons, ce qui requiert une circulation d'énergie.

Cependant, il faut souligner le fait que tous ces concepts ont une validité déterminée. Par exemple, il y a des substances qui n'obéissent pas à la loi des proportions définies, et l'on n'explique ni l'existence d'isomères, ni celle d'isotopes.

D'autre part, si l'on s'en tient aux étapes initiales du développement historique du concept de changement chimique, on peut identifier une série d'obstacles qui ont un caractère plus général, mais qu'il est cependant utile de signaler,

de nouveau les
obstacles

parce qu'ils correspondent à une manière particulière d'envisager le réel très répandue chez les élèves les plus jeunes. Ces obstacles recouvrent bien ceux qu'a définis Cañal (18) dans son travail sur le champ conceptuel de la nutrition des plantes vertes (anthropocentrisme, survivance de la pensée magique etc.).

Enfin, à propos du problème de la diversité des substances, Bachelard (19) fait une remarque intéressante, et qui résume bien ce qui a été dit plus haut, à propos de ce qu'il considère comme l'obstacle essentiel dans le processus de construction des connaissances en chimie : la tendance à expliquer les phénomènes chimiques par les caractéristiques ou les propriétés physiques des substances. Il souligne le lien entre les obstacles épistémologiques et l'influence de ce qui est perçu. Pourtant, les propriétés chimiques des substances font intervenir, par définition, d'autres substances, c'est-à-dire qu'elles relèvent du domaine des interactions chimiques qui s'établissent au niveau subatomique de l'organisation de la matière. De notre point de vue, c'est là l'essence-même des phénomènes chimiques : ils sont aussi spectaculaires dans tant de leurs manifestations que leur explication est inaccessible à la perception aux niveaux plus intimes de l'organisation de la matière.

2.2. Des niveaux de formulation aux trames conceptuelles

Une des principales conclusions qui, du point de vue didactique, résulte de l'analyse historique du concept de changement chimique, est l'existence de **différentes formulations de ce concept**. Stavridou (20), par exemple, en a inventorié huit dans l'étude qu'elle a réalisée.

cadres
conceptuels
dans lesquels se
situe le
changement
chimique

Toutes ces formulations peuvent être hiérarchisées et organisées en fonction de leur capacité à décrire, expliquer et prévoir les phénomènes chimiques. Elles peuvent chacune être situées dans un cadre conceptuel qui leur donne sens et qui fonctionne en relation avec d'autres concepts (cf. tableau 1). Les cadres conceptuels qui, au cours de l'histoire de la chimie, ont rempli cette fonction, sont les suivants.

- Un premier cadre conceptuel opératoire rend possible la définition du changement chimique, de manière quantitative et qualitative, par opposition au changement physique. Les concepts-clés en sont ceux de substance pure et d'élément chimique. Il est associé à une perspective macroscopique de la matière et des changements.
- Le second est basé sur la théorie atomico-moléculaire développée au dix-neuvième siècle. Les concepts-clés en sont celui d'atome, en relation avec celui d'élément chimique, et celui d'ion, qui permet une première approximation de la liaison chimique. Il est associé à une idée de la discontinuité de la matière et de l'énergie.

CADRE CONCEPTUEL	CONCEPTS STRUCTURANTS	FORMULATION DU CHANGEMENT CHIMIQUE
Vision macroscopique de la matière et des changements (concepts opératoires et lois pondérales)	SUBSTANCE ÉLÉMENT	Un changement chimique est un processus de transformation de certaines substances différentes, au cours duquel les éléments se conservent. On ne peut revenir à l'état initial par des processus physiques.
Théorie atomico-moléculaire (discontinuité hypothétique de la matière)	ATOME ← ION	Un changement chimique est un processus de réorganisation des atomes des substances de départ, par lequel se forment de nouvelles substances. Le nombre et l'identité des atomes est conservé.
Théorie quantique (discontinuité de la matière et de l'énergie)	LIAISON CHIMIQUE ← STRUCTURE ÉLECTRONIQUE DE L'ATOME	Un changement chimique est un processus au cours duquel les liaisons établies par les électrons externes des atomes se brisent pour en former de nouvelles, constituant des substances différentes de celles de départ.

Tableau 1 - Niveaux de formulation du changement chimique

- Le troisième cadre conceptuel est basé sur la théorie quantique du vingtième siècle. Le concept-clé dans ce cadre est de nouveau l'atome, du point de vue de sa structure électronique. Il est associé à la discontinuité de la matière et de l'énergie.

Pour Astolfi et al. (21), l'analyse historique d'un concept vise en dernière instance à rendre explicite de manière systématique la composition et la structure d'un champ conceptuel. Comme le signalent ces auteurs, cette analyse implique des développements textuels denses, et parfois difficiles à suivre. Il est, pour cette raison, très utile de représenter graphiquement l'ensemble de relations identifiées, même si l'on court le risque de ne pas inclure toutes les relations possibles. Ils proposent en ce sens d'élaborer des **trames conceptuelles** qui offrent une vision d'ensemble sur l'évolution d'un concept donné, et mettent en évidence les relations avec les autres concepts.

L'élaboration de trames conceptuelles est associée à l'existence d'énoncés différents et évolutifs pour une même notion (22). Ces énoncés peuvent provenir du champ disci-

trames
conceptuelles
pour représenter
l'information
contenue dans le
champ
conceptuel

plinaire ou être produits par les élèves dans une situation disciplinaire déterminée. Nous faisons ici allusion aux premiers types d'énoncés. Il faut cependant insister sur le fait que la finalité de l'élaboration de ces trames conceptuelles est de clarifier la discipline à enseigner, en combinant logique historique et logique de l'enseignement, *pour faciliter l'apprentissage*. Cela signifie que la logique qui provient de la discipline scientifique doit être mise en relation avec les éléments qui proviennent des conceptions des élèves.

En définitive, comme le disent Astolfi et Develay (23) les trames conceptuelles ne sont déterminantes ni pour savoir *quoi*, ni pour savoir *comment* enseigner, mais sont plutôt une référence pour l'un et l'autre ainsi que pour analyser les conceptions des élèves. Plus concrètement, nous suivrons les normes et la forme de présentation adoptées dans la trame, ou, plutôt, l'ensemble de trames sur le concept de respiration élaborées par Ginsburger-Vogel (24). Ainsi, pour l'élaboration de trames conceptuelles successives associées aux cadres conceptuels déjà signalés, nous prendrons en compte les éléments suivants :

- les niveaux successifs de formulation du concept de changement chimique,
- une série d'énoncés intermédiaires implicites ou explicites pour chaque formulation,
- un ensemble de notions constitutives qui dérive de chaque énoncé intermédiaire et qui rend compte de l'amplitude et de la *diversité conceptuelle*.

Les tableaux 2, 3 et 4 résument ces éléments pour chacune des trames élaborées.

Pour conclure à propos de cette approche du savoir professionnel à partir de l'étude du champ conceptuel associé au changement chimique, il faut en poser les limites. Nous pouvons considérer les trames conceptuelles comme un produit du processus de transformation du savoir chimique scientifique. Cependant ce produit de transposition didactique est partiel à plusieurs égards.

- La pratique sociale de référence qui a été privilégiée est la recherche scientifique. A la suite de Martinand (25), on conviendra qu'il est nécessaire de compléter cette étude avec les informations qui viennent d'autres pratiques sociales (par exemple les activités industrielles ou celles qui sont en relation avec la problématique du milieu social).
- Bien que l'on se réfère à un objet d'étude apparemment bien délimité, comme l'est le changement chimique, on peut l'inclure à l'intérieur de champs conceptuels plus vastes qui dépassent le cadre disciplinaire de la chimie. En ce sens, pour Giordan et de Vecchi (26), on pourrait définir une *aura conceptuelle* liée à chaque objet d'étude. Ainsi, par exemple, le changement chimique ferait partie de l'aura conceptuelle liée à l'appareil digestif. De la même manière, les états de la matière, par exemple, feraient partie de l'aura conceptuelle liée au changement chimique.

trames associées
aux différents
cadres
conceptuels

limites de
l'analyse du
champ
conceptuel

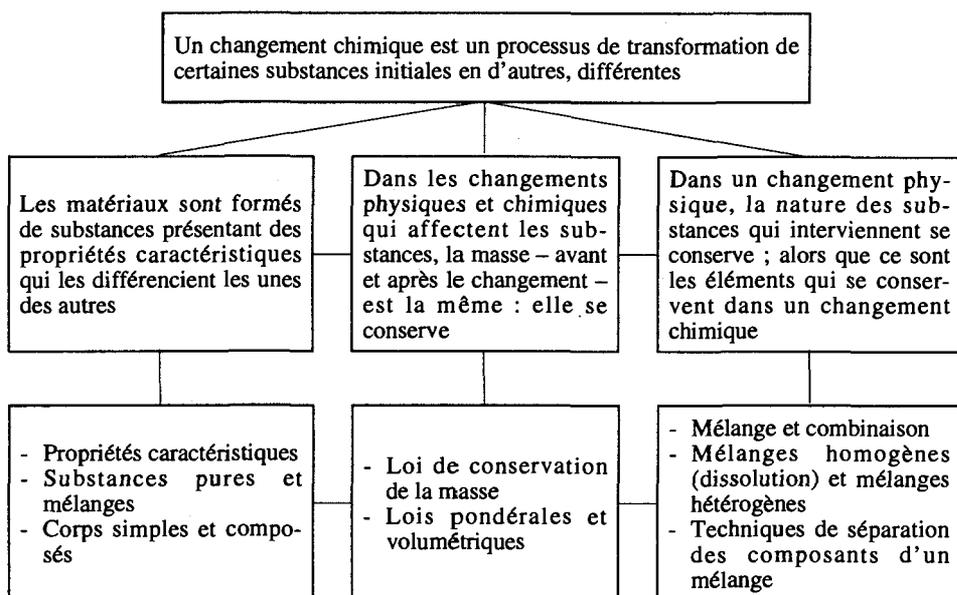


Tableau 2 - Trame conceptuelle au niveau macroscopique

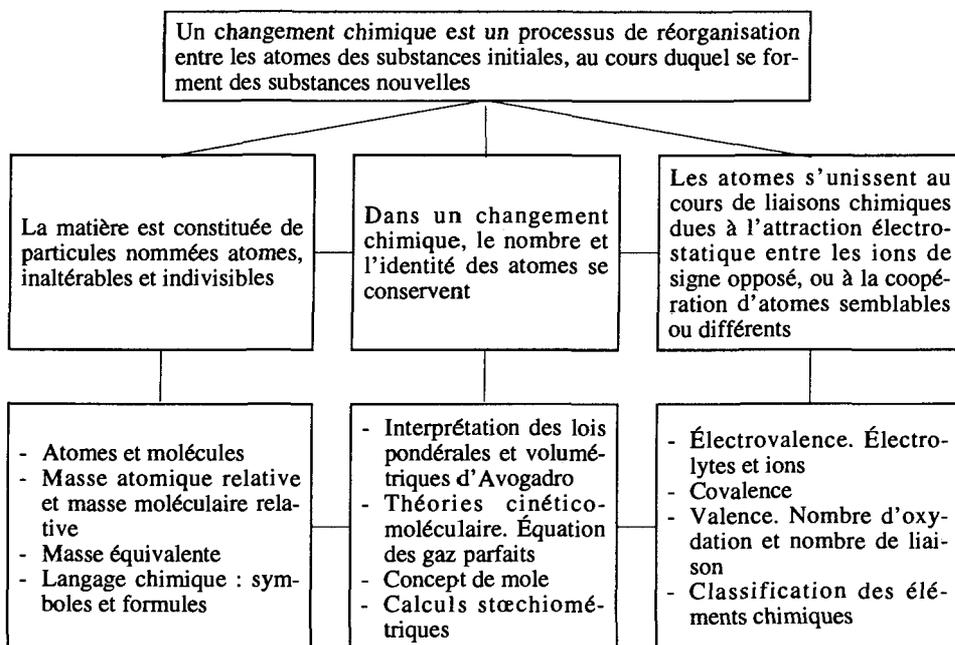


Tableau 3 - Trame conceptuelle basée sur la théorie atomico-moléculaire

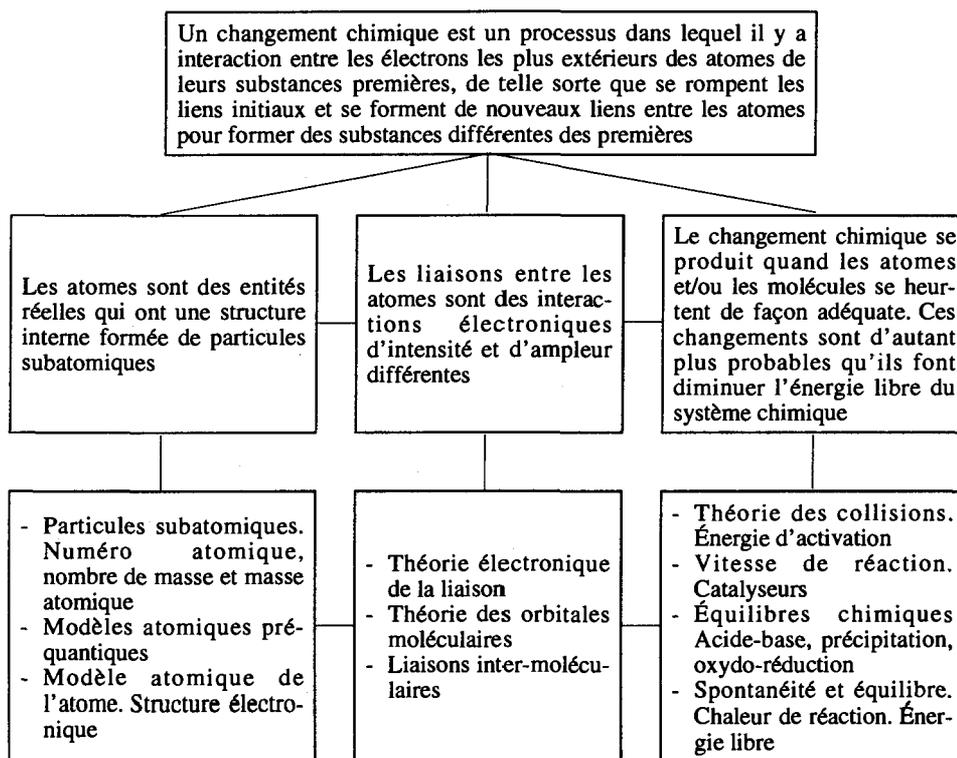


Tableau 4 - Trame conceptuelle basée sur la théorie quantique

Il faut en outre insister sur le fait que le processus de transposition didactique se nourrit à des sources très diverses. En d'autres termes, cette première reformulation du changement chimique, qui répond à la logique des concepts, doit être confrontée à la logique des élèves. Par conséquent, ce n'est qu'une partie du processus général de transformation des connaissances disponibles dans le savoir professionnel sur le changement chimique.

Enfin, comme le souligne Develay (27), dans la formation initiale, faire élaborer des trames conceptuelles par les futurs enseignants est d'un grand intérêt potentiel. Sur le plan du savoir conceptuel, cette activité permet de clarifier et d'articuler divers savoirs, habituellement isolés dans l'enseignement reçu au préalable. Sur le plan de la connaissance didactique, elle permet de mettre en question, entre autres, l'existence de formulations uniques pour un concept déterminé. De plus, ces trames sont des cadres de référence pour pouvoir analyser les conceptions des élèves et les itinéraires possibles de construction d'un savoir scolaire souhaitable. Sur le plan strictement professionnel, elle permet de

pourquoi avons-nous besoin de cette analyse dans la formation initiale ?

mettre en évidence le travail de transformation que doivent réaliser les professeurs pour élaborer des propositions de travail scolaire fondées.

3. LES CONCEPTIONS DES ÉLÈVES SUR LE CHANGEMENT CHIMIQUE

savoir ce que
savent les élèves

Une autre information à prendre en compte pour élaborer le savoir professionnel de référence provient de l'étude des conceptions alternatives des élèves (28). Celles-ci font l'objet de l'une des orientations de recherche les plus développées en didactique des sciences. A cause de leur variété et de leur importance pour la formation initiale des professeurs, les informations sur les conceptions des élèves méritent d'être examinées spécifiquement. Il faut se souvenir que ce sont des connaissances issues également d'une discipline scientifique, même si son niveau de développement et sa problématique sont très différentes de ceux de la chimie. Nous sommes ainsi amenés, pour travailler sur les conceptions des élèves, à utiliser en les transformant des connaissances scientifiques provenant, en l'occurrence, de la didactique des sciences, pour les transformer en savoir professionnel utile.

connaître le
traitement
didactique des
conceptions des
élèves

La perspective de la pratique sociale de référence, l'enseignement, nous conduit de nouveau à nous poser la question de ce que l'on doit faire de ces conceptions pour contribuer à leur évolution, en prenant en compte la caractéristique qu'elles ont de résister à l'enseignement. Les obstacles repérés sont d'un grand intérêt pour choisir des objectifs d'apprentissage qui coïncident avec des obstacles surmontables si l'on met l'accent sur les conditions qui permettent de les surmonter (29).

3.1. Niveaux de formulation des conceptions des élèves

En relation avec les conceptions des élèves sur le changement chimique, trois problèmes sont particulièrement pertinents pour l'initiation à la chimie pendant la scolarité obligatoire :

- les concepts de base sur la composition et la structure de la matière (substance, élément, composé, atome et molécule),
- les critères de différenciation des changements physiques et chimiques,
- l'interprétation des changements chimiques.

A travers la diversité des situations et des tâches dans lesquelles sont étudiées les conceptions des élèves, entre 12 et 16 ans surtout, il est possible de dessiner à grands traits leurs caractéristiques principales :

caractéristiques
des conceptions
des élèves

- un modèle statique et continu de la matière fondé sur ses qualités macroscopiques. Ils n'ont pas l'habitude d'utiliser spontanément - la nature corpusculaire de la matière n'est généralement pas utilisée spontanément ;
- l'attribution de propriétés macroscopiques au monde microscopique ;
- des idées prototypiques du changement chimiques, liées au spectaculaire, à l'artificiel, etc. ;
- une vision mécaniste ou substantialiste, mais pas interactive, des changements chimiques, qui donne plus d'importance à ce qui change qu'à ce qui se conserve ;
- l'utilisation d'une langue descriptive ambiguë et imprécise.

Une analyse du contenu des conceptions sur la matière et sur les changements chimiques nous permet de caractériser, d'après leur degré de complexité, d'abstraction et de décentration croissant, trois grands niveaux de formulation.

A **un premier niveau**, se situeraient toutes les formulations dans lesquelles la description l'emporte sur l'explication, sans qu'il ait de relation entre le macroscopique et le microscopique.

* La matière se conçoit comme un tout continu et uniforme, dont les critères de classification sont d'ordre perceptif et culturel.

* Les phénomènes se sont pas identifiés comme des changements matériels, physiques ou chimiques, mais comme des événements qui ne sont reconnus comme des changements que s'ils sont très évidents et spectaculaires. Les phénomènes sont différenciés en fonction de critères liés à la vie quotidienne (utilité, actions qui se réalisent, etc.).

* Un changement chimique est "quelque chose" de spectaculaire, d'évident ou de quotidien (changement de couleur, apparition d'un gaz, d'une flamme...) qui se produit quand on met en contact des matériaux ou qu'on apporte de l'énergie. Le changement chimique ne se conçoit pas comme un processus, mais plutôt comme une événement, qui se décrit mais ne s'explique pas en termes de transformations et/ou de conservations produites dans ce processus.

A **un second niveau**, on reconnaît une certaine diversité et une certaine continuité de la matière, et l'on donne les premières explications des changements, en termes de modifications, de déplacements, ou même de transmutations. Des formulations diverses peuvent coexister.

* La matière est formée de substances qui se différencient par le fait d'être pures (une substance) ou mélangées (plusieurs substances). il n'est pas fait de distinction entre les concepts d'élément, de composé ou de substance.

Les substances sont formées d'atomes ou de molécules (particules).

* La matière est formée de substances qui se différencient en corps simples (éléments) ou corps composés (formés par plus d'un élément, sans qu'il y ait de distinction entre les mélanges et les composés).

les niveaux de
formulation : une
hypothèse sur les
conceptions des
élèves

Les corps simples sont formés par des atomes et les corps composés sont formés par des molécules.

* Le critère de distinction entre les changements physiques et les changements chimiques s'établit sur la base de l'apparition/disparition des substances, ou bien par le caractère réversible ou irréversible du changement.

* Un changement chimique est un processus au cours duquel les substances initiales disparaissent et d'autres, différentes, apparaissent. Le changement chimique s'explique en termes de transformation et non de conservation.

* Un changement chimique est un processus au cours duquel une substance change certaines de ses propriétés, tout en conservant son identité.

A un **troisième niveau**, des relations sont établies entre le microscopique et le macroscopique et les changements commencent à être décrits en terme d'interactions.

* La matière est formée de substances qui peuvent des corps simple ou des corps composés. Les corps composés sont formés d'éléments différents unis chimiquement. Les mélanges sont formés de diverses substances non unies chimiquement.

Les molécules sont formées par l'union d'atomes égaux et différents.

Les substances sont formées d'atomes ou de molécules identiques entre elles. Les corps simples sont formés d'atomes identiques ou de molécules constituées d'atomes identiques. Les corps composés sont formés d'atomes différents unis et formant des molécules ou des paires d'ions identiques entre elles.

* Le critère de différenciation entre les changements physiques et les changements chimiques est la conservation ou la non-conservation de l'identité de la (ou des) substances(s) initiale(s), définies(s) par leur caractéristiques propres.

* Au niveau macroscopique, le changement chimique s'explique en termes de transformation de l'identité des substance et de conservation des éléments qui les forment.

Au niveau microscopique, il implique un processus au cours duquel les atomes qui forment la ou les substances se réorganisent, pour se briser et former de nouvelles liaisons, et donner naissance à de nouvelles substances. Le changement chimique s'explique en termes de conservation du nombre et de l'identité des atomes.

3.2. De l'interprétation des conceptions des élèves aux objectifs-obstacles

Pour pouvoir se détacher de l'analyse du champ conceptuel associé au changement chimique, l'interprétation des phénomènes liés au changement chimique exige la maîtrise d'aspects structuraux, interactifs, dynamiques et quantitatifs. De plus, comme le signale Méheut (30), il faut tenir compte de la complexité et de la diversité des phénomènes chimiques : le caractère fascinant de la flamme, la présence

de gaz incolores et inodores, le masquage produit par les changements d'état ou les processus de dissolution, les rendent difficilement conceptualisables.

Les facteurs qui peuvent expliquer les difficultés que les élèves manifestent dans leur conception de la matière et des changements physiques et chimiques, relèvent d'**aspects cognitifs, culturels, curriculaires, et proprement conceptuels**.

L'influence de la **perception** se manifeste particulièrement dans la substantialisation des propriétés et dans le transfert au microscopique de ce qui est directement observable. Cette primauté du perçu est toujours présente dans les conceptions des élèves sur la matière et le changement (31). Le type de raisonnement que les élèves utilisent pour expliquer le changement chimique est basé sur **un schéma causal simple**, dans lequel la relation de cause à effet est linéaire et à sens unique. Cela rend difficile la compréhension du changement chimique comme interaction entre substances ou systèmes atomiques en centrant l'attention sur ce qui change et non sur ce qui se conserve. On observe aussi des schémas simples de quantification, surtout des schémas proportionnels, pour traiter des relations molaires, pondérales et volumétriques dans les réactions chimiques (32).

L'influence du **langage quotidien et du contexte culturel**, alors que ces concepts exigent de la précision sémantique, se manifeste par l'usage d'une langue éminemment descriptive et partielle pour décrire les changements observés (33)..

L'influence **curriculaire** se traduit par l'absence d'un traitement opératoire des concepts de substance, d'élément, de corps composé et de mélange qui permettrait de les différencier à un premier niveau (34) ; par l'introduction dénuée de critique et précipitée de la théorie atomico-moléculaire, qui ne répond pas habituellement au problème de la diversité des substances, ni à celui de la conservation et de la transformation dans les changements (35) ; par la rareté de l'usage du niveau multi-atomique dans les représentations des manuels, et une modélisation peu opératoire (36).

La difficulté propre à ce champ conceptuel est liée à son caractère abstrait et à la relation étroite qui existe entre les concepts à différents niveaux : phénoménologique, atomico-moléculaire et multi-atomique. Cela exige la compréhension du modèle corpusculaire de la matière, du critère de conservation dans les changements et des grandeurs qui décrivent un système et ses transformations (37).

En prenant en compte tous ces facteurs, il est maintenant possible de proposer une trame conceptuelle associée aux obstacles les plus pertinents (tableau 5).

quelques raisons
explicatives des
difficultés des
élèves

trames
conceptuelles
pour maîtriser les
obstacles

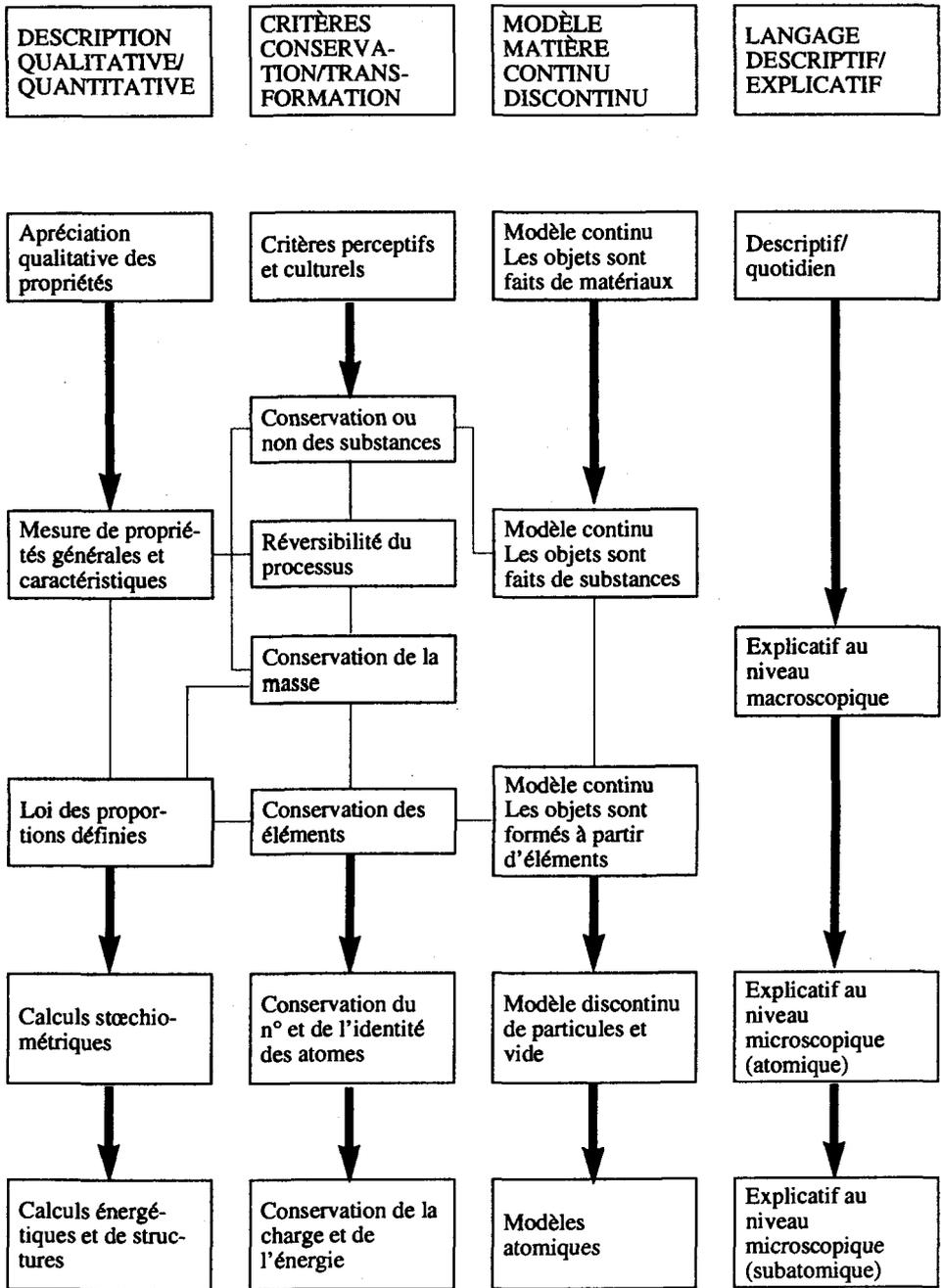


Tableau 5 - Trame conceptuelle associée au franchissement des obstacles que représentent les conceptions des élèves sur le changement chimique

Peterfalvi (38) propose une approche plus concrète au moment de formuler les objectifs-obstacles. Un objectif obstacle ayant été choisi, relatif par exemple à l'idée que les réactions chimiques sont des mélanges, un réseau conceptuel spécifique est élaboré, dans lequel sont précisées les idées associées à l'obstacle (qui expliquent sa résistance), ce que l'obstacle empêche de comprendre, ainsi que la nouvelle formulation proposée et les conditions qui permettent de surmonter l'obstacle.

Enfin, dans **la formation initiale** des professeurs, nous avons pu constater que la connaissance des conceptions des élèves peut grandement faciliter la restructuration des idées des étudiants-professeurs eux-mêmes, tant pour le contenu chimique que pour le contenu didactique. Compte tenu du fait qu'a priori les étudiants-professeurs ne semblent pas voir la nécessité de connaître les représentations des élèves pour mener à bien un enseignement facilitateur de l'apprentissage, ces informations sont un des éléments clés du savoir professionnel qui doit servir de référence dans le processus de formation.

importance
de ces
connaissances
dans la formation
initiale des
professeurs

4 - LE SAVOIR SCOLAIRE SUR LE CHANGEMENT CHIMIQUE

L'enseignement comme pratique sociale institutionnalisée a produit un ensemble de connaissances relatives à ce qu'est le changement chimique et à la manière de l'enseigner. Ces connaissances sont dispersées dans diverses sources, parmi lesquelles on peut signaler : les programmes et instructions prescriptifs, les manuels et les documents didactiques. On peut les considérer comme le résultat de la transposition didactique qui s'est réalisée à différents niveaux de concrétisation du curriculum. En d'autres termes, il s'agit d'analyser le savoir scolaire déjà élaboré.

4.1. Le curriculum officiel ou le savoir scolaire imposé

premier échelon
dans la chaîne
de la
transposition
didactique

Dans la chaîne de la transposition didactique, les instructions officielles constituent un premier lieu de décisions sur le savoir relatif au changement chimique qu'il faut enseigner et apprendre dans le contexte scolaire. Ces décisions sont prises, en dernière instance, par un groupe d'experts, et conditionnent plus ou moins les décisions qui sont prises à d'autres niveaux de mise en oeuvre du curriculum.

Nous nous centrerons sur les caractéristiques du savoir conceptuel prescrit, en même temps que sur les orientations prises pour construire ce savoir. Les principales conclusions de l'analyse du contenu formel des curriculums officiels espagnols de l'éducation obligatoire depuis les années 70 sont les suivantes.

l'évolution dans
le savoir scolaire
prescriptif

- L'évolution, à partir d'une logique exclusivement disciplinaire, a tendu vers des positions qui font intervenir un plus grand nombre de perspectives pour sélectionner les contenus, parmi lesquelles celles des aspects socio-culturels et des difficultés relevées dans l'apprentissage des élèves.

- Une stricte limitation de l'étendue des contenus conceptuels accompagne la diversification de ces concepts, selon leur nature conceptuelle, procédurale ou concrète.

- D'une présentation des contenus prescriptifs en forme de liste déjà organisées en séquences, on est passé à des blocs de contenus que les professeurs doivent eux-mêmes découper en séquences. Cependant, dans ces blocs, les formulations concises permettent peu d'établir des relations significatives entre les concepts.

- Le concept de changement chimique est introduit à l'école primaire (6-12 ans), à l'intérieur d'un bloc de contenus consacré aux matériaux et à leurs propriétés qui ne fait pas référence aux concepts de substance ou d'élément (39). Le niveau supérieur de complexité pour le traitement des changements chimiques dans l'éducation obligatoire (jusqu'à 16 ans) se situe dans le cadre de la théorie atomico-moléculaire et de la nature électrique de la matière, qui permet l'introduction du concept d'ion.

- La combustion reste le référent empirique initial pour les changements chimiques, bien que ce choix soit mis en question dans nombre d'études didactiques sur les conceptions des élèves.

- D'une perspective clairement empiriste et accumulative du savoir, les textes évoluent vers une perspective constructiviste, en mettant en relief l'importance des cadres conceptuels et leur caractère provisoire.

Dans la formation initiale, le curriculum prescrit ne constitue pas une source habituelle d'information à laquelle les étudiants-professeurs recourent spontanément pour préparer les contenus scolaires. C'est pourtant un élément propre à atténuer la tendance initiale des futurs professeurs à introduire tous les concepts chimiques dont ils se souviennent quand ils choisissent ce qu'ils veulent enseigner au niveau le plus élémentaire.

4.2. Les manuels ou le savoir scolaire privilégié

Une autre référence obligée dans les études sur la transposition didactique des savoirs associés à un champ conceptuel est celle des manuels scolaires. Il n'apparaît pas que l'on prenne en compte, dans leur contenu, les difficultés des élèves. Cette source d'information est caractérisée par un plus grand degré de concrétisation que le savoir prescriptif. Selon Grosbois, Ricco et Sirota (40), ce niveau de concrétisation ne provient directement ni des curriculums prescriptifs, ni des données qu'offre la recherche didactique ou la pratique de l'enseignement. Il s'agit plutôt d'un ensemble de

un autre échelon
dans la chaîne
de la
transposition
didactique

décisions que prennent les auteurs eux-mêmes au sujet du savoir scolaire.

Les conclusions principales de l'analyse des manuels pour des élèves de 12 à 14 ans les plus diffusés en Espagne sont les suivantes.

- La logique disciplinaire est la perspective privilégiée dans le choix du savoir scolaire. Il semble que l'on ne prenne en compte dans leur contenu ni les conceptions ni les difficultés des élèves.
- Les référents empiriques ne sont reliés ni à des hypothèses ni à des problèmes, mais ont plutôt pour fonction d'illustrer le discours.
- La pratique sociale privilégiée dans les manuels est la recherche scientifique, au détriment des autres pratiques sociales, telles la production industrielle ou artisanale ou les activités domestiques.
- Le résultat de la transposition du champ disciplinaire au champ scolaire se caractérise par une accumulation de différents cadres conceptuels, une décontextualisation des savoirs conceptuels et des référents empiriques, et une vision empiriste et accumulative du savoir. Comme le signalent Grosbois, Ricco et Sirota dans un autre contexte, la didactisation de l'objet d'étude se fait dans le cadre de l'encyclopédisme et du dogmatisme.

En définitive, tout paraît indiquer que ces manuels scolaires privilégient une vision du savoir scolaire concernant le changement chimique comme simplification du savoir disciplinaire, qui rend implicitement possible une vision traditionnelle du processus d'enseignement, basée sur l'explication du professeur et l'utilisation des référents empiriques en guise d'explication ou d'illustration de telle ou telle explication, mais qui ignore les idées des élèves.

Du point de vue de la formation initiale, le savoir contenu dans les manuels présente un triple intérêt, puisque :

- c'est une source importante d'information dans laquelle les étudiants-professeurs ont appris leurs connaissances en chimie,
- c'est une source à laquelle les étudiants-professeurs ont recours lorsqu'ils sont en situation d'avoir à sélectionner et à organiser le savoir à enseigner,
- c'est une source d'information du savoir scolaire déjà élaboré que les futurs professeurs vont rencontrer, très probablement, dès leur premier contact avec la pratique scolaire.

Les manuels sont donc un bon support pour que les élèves-professeurs, lors du processus de reconstruction de leurs conceptions scientifiques et didactiques, appliquent des idées nouvelles, plus adéquates pour sélectionner et organiser le savoir scolaire.

une vision
simplificatrice du
savoir scolaire sur
le changement
chimique

les manuels :
aide
d'importance
dans la formation
initiale

contributions
diverses dans la
connaissance
scolaire sur le
changement
chimique

4.3. Les documents pédagogiques ou le savoir scolaire proposé ou pratiqué à la suite de recherche ou d'innovation didactique

Nous traiterons maintenant d'un ensemble de connaissances qui ne sont pas incluses dans les deux sources antérieures, et dont la caractéristique commune est d'avoir été produites par des professeurs en situation d'innovation ou de recherche. L'incidence actuelle de ces matériaux, dans le milieu scolaire, est encore minime, qu'il s'agisse de donner des exemples de savoir scolaire déjà élaboré ou d'études qui fondent la sélection, la succession et l'organisation du savoir scolaire sur le changement chimique.

Malgré la dispersion et le caractère partiel de ces informations, on peut y voir trois types de contributions au savoir sur le changement chimique :

- celles qui impliquent une **réélaboration du contenu conceptuel** associé au changement chimique (41). La caractéristique commune de ces études est de réaliser une transposition didactique fondée sur l'évolution conceptuelle des élèves, l'analyse des textes scolaires et les exigences du curriculum officiel ;

- celles qui ont trait à la **mise en séquences et l'organisation du savoir scolaire** sur le changement chimique. Comme exemple de ces contributions, on peut signaler : la proposition de progression des connaissances en chimie du niveau élémentaire au niveau universitaire en forme de *curriculum spiralaire* (42) ; l'utilisation de *cartes conceptuelles* mettant en évidence des relations entre concepts pour planifier une unité sur les changements chimiques et physiques en rapport avec les référents empiriques (43) ; l'utilisation de *diagrammes en V* pour l'interprétation des combustions (44) ; et les trames conceptuelles associées à différents niveaux de formulation du concept de changement chimique et aux concepts structurants d'élément, de substance, d'atome et d'ion (45). Dans cet ensemble de contributions, on doit aussi signaler *l'hypothèse générale d'orientation de progression du savoir scolaire* (46) qui sert de guide pour l'établissement des différents niveaux de formulation des contenus scolaires. Toutes ces contributions ont pour caractéristique commune d'utiliser des sources diverses pour choisir le contenu scolaire, et de marquer une rupture avec l'ordre linéaire comme forme d'organisation des contenus ;

- celles qui proposent concrètement un **intervention didactique** dans ce champ conceptuel. Parmi ces contributions, on peut voir deux grandes tendances relatives à l'enseignement du changement chimique (47), selon la manière de concevoir le savoir et celle de le construire dans le contexte scolaire :

* Le savoir scolaire sur le changement chimique se formule à un niveau unique et est accompagné d'une programmation détaillée d'activités basées sur la structure conceptuelle et les processus de la science. Il se construit par l'assimila-

tion de l'information provenant des activités pratiques et de la généralisation qui suit, faite par le professeur et les élèves eux-mêmes. Il y a, dans ce cas, une utilisation inductive des référents empiriques. Les idées des élèves sont prises en compte comme des pré requis utiles pour l'apprentissage ou comme une manifestation de leur intérêt. La séquence didactique s'organise en fonction des activités pratiques.

* Le savoir scolaire sur le changement chimique est formulé à différents niveaux. Il se construit par interaction entre les idées des élèves et l'information issue de diverses sources. La séquence didactique s'organise autour de la recherche de problèmes intéressants, dans le contexte scolaire.

Les **conclusions** principales qu'on peut tirer de cet ensemble de contributions sont les suivantes :

- L'élaboration d'un savoir scolaire suppose un processus de restructuration et l'intégration de différentes perspectives : celle de la science, celle des élèves et celle de l'enseignement à proprement parler.
- La correspondance entre les niveaux de description macroscopique (basé sur les concepts de substance et d'élément) et microscopique (basé sur le concept d'atome) des changements chimiques, doit se traduire en activités qui combinent une perspective phénoménologique et une perspective de modélisation. Les référents empiriques doivent être sélectionnés pour faciliter la compréhension, de telle sorte que les propriétés caractéristiques des "réactifs" et des produits soient bien distinctes.
- Dans tous les cas le savoir scolaire qu'on se propose de construire sur le changement chimique exige d'établir un contraste empirique dans diverses situations, chacune d'elles étant considérée comme une hypothèse de travail par le professeur.

Dans la **formation initiale des professeurs**, cet ensemble d'informations forme contraste avec les conceptions des élèves-professeurs sur le savoir scolaire. En effet ces informations sont le fruit de réflexions innovantes qui diffèrent des vues simplificatrices et dogmatiques des élèves-professeurs. Leur existence est quasiment méconnue des futurs professeurs. Enfin, certaines de ces contributions représentent le niveau de complexité le plus grand dans le traitement des contenus scolaires, c'est-à-dire dans le processus de transposition didactique.

un élément de
contraste avec
les conceptions
des futurs
professeurs

POUR CONCLURE

Nos analyses, menées à partir de sources qui fournissent une information pertinente pour le savoir professionnel de référence, tentent d'intégrer la perspective disciplinaire (chimique et didactique) avec celle de la pratique sociale de référence. Ces analyses constituent un premier moment du processus de réélaboration des connaissances disponibles

un ensemble de questions pour mettre à l'épreuve le savoir professionnel de référence

pour les transformer en **connaissances professionnelles enseignables et assimilables** pendant la phase de formation initiale. Dans cette perspective, en suivant ce que préconise le projet IRES sur le curriculum de formation des professeurs, nous avons défini un **domaine de recherche professionnelle** potentiel sur la définition de ce qu'est le changement chimique et la manière de l'enseigner. Il se présente sous la forme d'une trame de problèmes liés entre eux, dont on fait l'hypothèse qu'ils sont pertinents pour mobiliser les conceptions des élèves-professeurs, les contraster avec d'autres informations et favoriser la construction d'un savoir professionnel significatif.

Enfin, si notre attention s'est centrée sur "quel savoir" dans la formation initiale, on ne peut oublier que les **stratégies méthodologiques** et les **stratégies d'évaluation** doivent être cohérentes avec le contenu du savoir professionnel de référence puisqu'à leur tour, elles impliquent les stratégies didactiques souhaitables pour que les élèves-professeurs les utilisent, tant dans leur projet d'enseignement que dans le déroulement de leur pratique. Le moyen est le message, mais le message est également un moyen dans la formation initiale des professeurs.

Rosa MARTÍN del POZO
Département de didactique
des sciences expérimentales
de l'Université Complutense, Madrid
Équipe du projet curriculaire IRES

NOTES

- (1) Groupe de recherche sur l'école (1991). *Projet curriculaire "Recherche et rénovation" IRES*. Séville : Diada, 4 volumes, version provisoire.
- (2) Traduction française réalisée par Danièle Manesse.
- (3) Pour plus d'information sur les modèles de formation initiale, on peut consulter les travaux de Gilles Ferry (1983), G. Adamczewski (1988), J. Gimeno (1988) et Pérez-Gómez (1982).
- (4) PERRON M. (1991) "Vers un continuum de formation des enseignants : éléments d'analyse". *Recherche et formation*, 10, 137-151.
- (5) MARTINAND J.-L. (1984) "Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scientifiques scolaires". *Actes du Premier Atelier International de la Londe Les Maures*. Paris : Editions CNRS.
- (6) ZAY D. (1986) "Quel rôle peut jouer la recherche dans la formation des instituteurs ?" *Revue Française de Pédagogie*, 74, 99-115.
- (7) GIMENO J. (1988) *El curriculum : una reflexión sobre la práctica*. Madrid : Morata.
- (8) BROMME R. (1988) "Conocimientos profesionales de los profesores". *Enseñanza de las ciencias*, 6 (1), 19-29.
- (9) Parmi eux, signalons les apports de J.-L. Martinand (1986), J.-P. Astolfi et M. Develay (1989), P. Cañal (1990) et J.A. Lloréns (1989) au concept de transposition didactique proposé par Y Chevallard (1982).
- (10) Voir note (1). Volume 3 de l'ouvrage cité.

- (11) GIORDAN A. (dir) (1983) *L'élève et/ou les connaissances scientifiques*. Berne : Peter Lang.
- (12) Principalement dans les travaux de R. Massain (1955), J.R. Partington (1970), B. Vidal (1985), R. Mierzecki (1985), ainsi que dans les études d'histoire de la science de A. Mieli (1951), A.C. Crombie (1974), Taton (1971), S.F. Mason (1984-1986) et M. Serres (1989).
- (13) GAGLIARDI R. (1986) "Los conceptos estructurantes en el aprendizaje por investigación". *Enseñanza de las ciencias*, 6 (3), 30-35.
- (14) MARTINAND J.-L. (1988). "Niveaux de formulation et champs empiriques de référence", in : *Actes des Xèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique de Chamonix*. Paris : Université de Paris 7.
- (15) On relève notamment les apports de D.Gil (1983), D. Hodson (1986), J.A. Lloréns (1987), J.P. Astolfi et M. Develay (1989) et R. Porlán (1989, 1993).
- (16) Parmi lesquelles celles de L. Sanmartí (1989) sur la différenciation entre les concepts de mélange et de composé, et de J.A. Lloréns (1991) sur les concepts de substance et de changement chimique.
- (17) LLORÉNS, J.A. (1991). *Comenzando a aprender Química. Ideas para el diseño curricular*. Madrid : Visor.
- (18) CAÑAL P.(1990) *La enseñanza en el campo conceptual de la nutrición de las plantas verdes : un estudio didáctico en la Educación Básica*. Thèse de doctorat inédite. Université de Séville.
- (19) BACHELARD G. (1973) *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*. Paris : Vrin.
- (20) STAVRIDOU H. (1987) "Le concept de réaction chimique", in : *Actes des IXèmes Journées de Chamonix sur l'éducation scientifique*. Paris : Université Paris 7.
- (21) ASTOLFI J.-P. et al. (1985) *Procédures d'apprentissage en sciences expérimentales*. Paris : INRP.
- (22) ASTOLFI J.-P. (1990) "Les concepts de la didactique des sciences, des outils pour lire et construire les situations d'apprentissage". *Recherche et formation*, 8, 19-31.
- (23) ASTOLFI J.-P., DEVELAY M. (1989) *La didactique des sciences*. Paris : PUF, coll. Que sais-je ?
- (24) GINSBURGER-VOGEL Y. (1988) "Trame d'analyse : concept de respiration", in : *DODI-DAC*. Paris : INRP, document interne.
- (25) MARTINAND J.-L. (1989) "Pratiques de référence, transposition didactique et savoirs professionnels en sciences et techniques". *Les Sciences de l'Éducation*, 2, 23-29.
- (26) GIORDAN A., de VECCHI G. (1987) *Les origines du savoir*. Paris : Delachaux et Niestlé.
- (27) DEVELAY M. (1983) *Contribution à la définition d'un modèle de formation initiale des institutEurs en activités d'éveil biologique*. Thèse de doctorat de troisième cycle. Université Paris 7.
- (28) Les travaux suivants sont d'un intérêt particulier :
 LLORÉNS L. A. (1987) *Proquesta y aplicación de una metodología para analizar la adquisición de los conceptos químicos necesarios en la introducción de la teoría atómico-molecular : percepción de los hechos experimentales, sus representaciones y el uso del lenguaje en alumnos de Formación Profesional y Bachillerato*. Thèse doctorale inédite, Université de Valence.
 ANDERSSON B. (1990) "Pupils Conceptions of Matter and its Transformation", *Studies in Sciences Education*, 18, 53-85.
 POZO J. I. et al. (1991) *Procesos cognitivos en la comprensión de las ciencias : ideas de los adolescentes sobre la Química*. Madrid : Centre de publications du MEC.
- (29) MARTINAND J.-L. (1986) *Connaitre et transformer la matière*. Berne : Peter Lang.
- (30) MEHEUT M. (1989), "Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes". *Bulletin de l'Union des Physiciens*, 716, 997-1011.
- (31) DRIVER R., GUESNE E., TIBERGHIE A. (1985) *Children's Ideas in Science*. London : Open University Press.
- (32) POZO J. I. et al (1991) op cité note 28.

- (33) LLORÉNS J. A. (1989) "El proceso de cambio conceptual en la iniciación a la Química. La introducción de los conceptos de sustancia pura y cambio químico". *Revista de educación*, 289, 307-332.
- (34) CAAMAÑO A. et al. (1983) "Consideraciones sobre algunos errores conceptuales en el aprendizaje de la Química en el bachillerato". *Enseñanza de la Ciencias*, 3(2), 198-200.
- (35) FREY K. et al. (1989). Utilisation des méthodes et connaissances psychologiques pour le développement de curriculum, in : *Psychologie génétique et didactique des sciences*. Berne : Peter Lang.
- (36) BAIN D., BERTRAND F. (1984) "Structure de la matière : des représentations des élèves aux représentations des manuels", in : *Actes des VIèmes Journées Internationales sur l'éducation scientifiques*. Paris : Université Paris 7.
- (37) BEN-ZVI R., EYLON B., SILBERSTEIN J. (1982). *A study of conceptions of structure and process*. Rehovot, Israël : the Weizzaman Institute of Science.
- (38) PETERFALVI B. (dir) (1992). *Objectifs-obstacles et situations d'apprentissage autour du concept de transformation de la matière, document 1*. Paris : INRP.
- (39) Le décret qui fixe les enseignements minimum pour l'école primaire définit comme contenu conceptuel : "Les changements observables dans la matière : changements physiques, changements chimiques (combustion). Le comportement des matériaux au passage de la lumière, de l'électricité, à la chaleur et à l'humidité" (RD 1006/ 14 juin 1991).
- (40) GROBOIS M., RICCO G., SIROTA R. (1988) Les manuels, un mode de textualisation du savoir savant. *Aster*, 13, 59-91.
- (41) On peut mentionner les travaux de J.L. Martinand (1986) sur le concept d'élément chimique, de J.A. Lloréns (1989) sur les concepts de substance et de changement chimique, de N. Sanmarti sur les concepts de composé et de mélange, de H. Pfund (1981) sur le concept de système atomique et de M. Méheut et al. (1988) sur la modélisation de la matière.
- (42) SCHMIDKUNZ H., BÜTTNER D. (1986) "Teaching chemistry according to a spiral curriculum", *European Journal of Science Education*, 8 (1), 9-16.
- (43) ROTH W. M. (1990) "Map your way to a better lab", *The Science Teacher*, 31-34.
- (44) SOLSONA N., IZQUIERDO M., (1992) *Aplicación de los conceptos de Química a la interpretación de las combustiones. La V de GOWIN como instrumento de diagnóstico*. Document polycopié.
- (45) Op. cité note 33.
- (46) Cette hypothèse est développée dans le volume IV du projet curriculaire cité en note 2. En résumé, on pose trois moments de complexité, de décentration et de scientificité croissants caractérisés, respectivement, par une vision syncrétique, analytique et systémique de la réalité.
- (47) On peut mentionner, pour le premier groupe, les projets curiculaires de chimie développés dans les années 60 et 70 (*Chelical Bond Aproach Project, Nuffield Project, Chemical Education Material Study*) et, pour le second, le programme *Chemistry in a thousand Questions* de VOS et VERDONK (1985-1987), les propositions de BRINK et HOLDING (1986) dans le cadre du *Children 's Learning in Science Project* et les travaux de J.A. Lloréns déjà mentionnés.