

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.

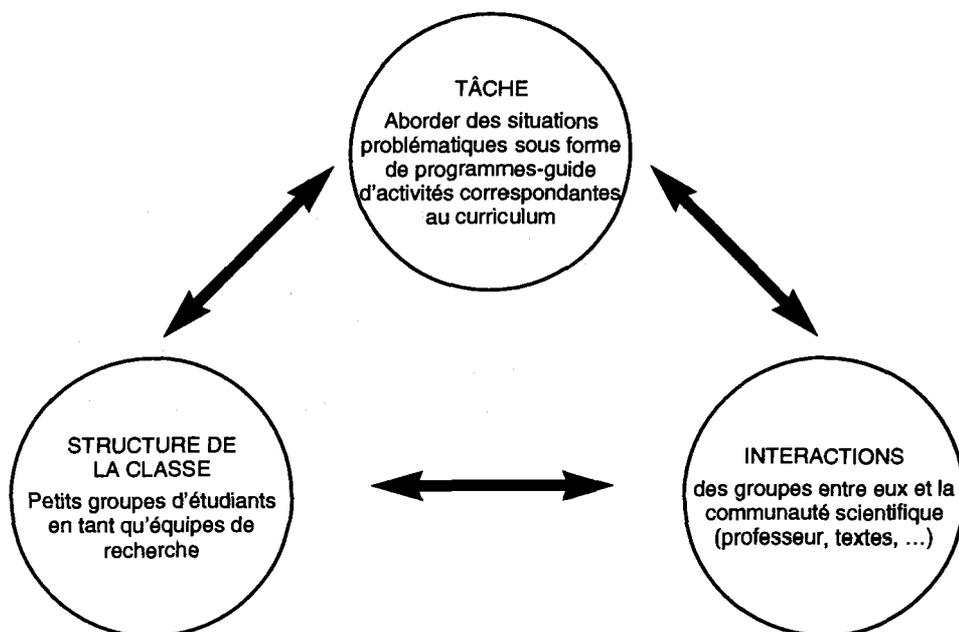


Schéma 1.- Éléments essentiels d'une classe (de Chimie) engagée dans l'apprentissage par la recherche.

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.

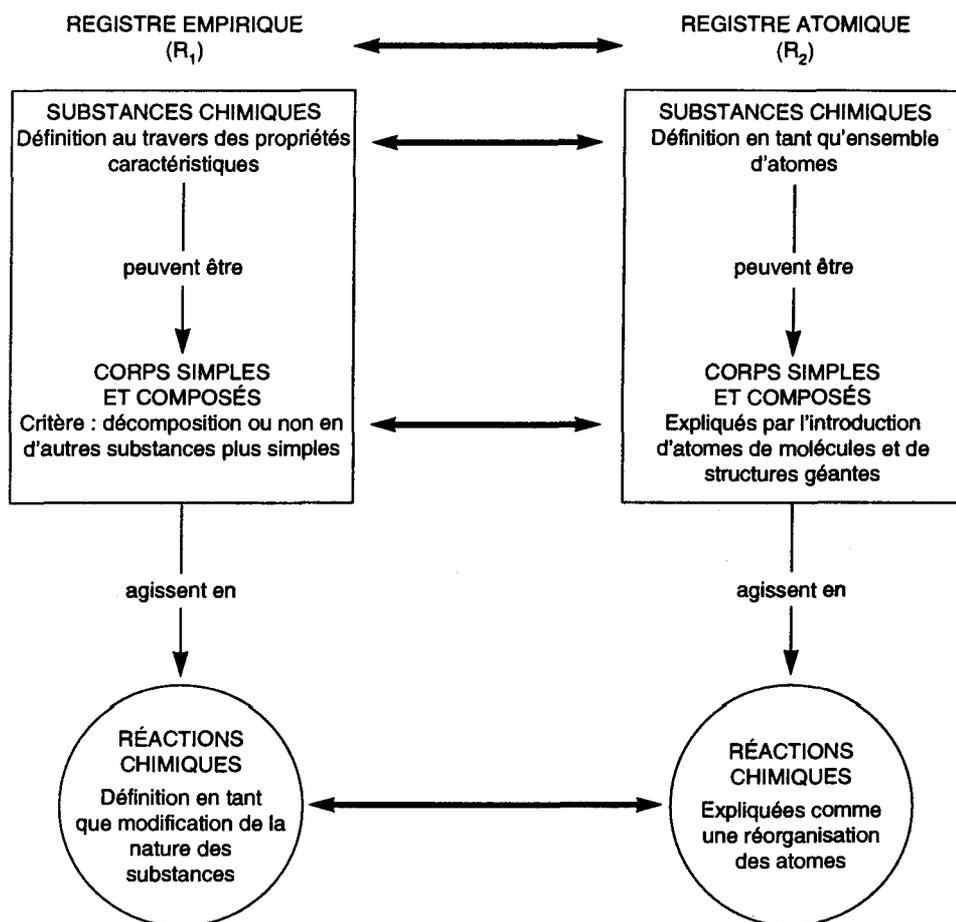


Schéma 2. Registre empirique (R₁) et registre atomique (R₂) du concept de réaction chimique

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.

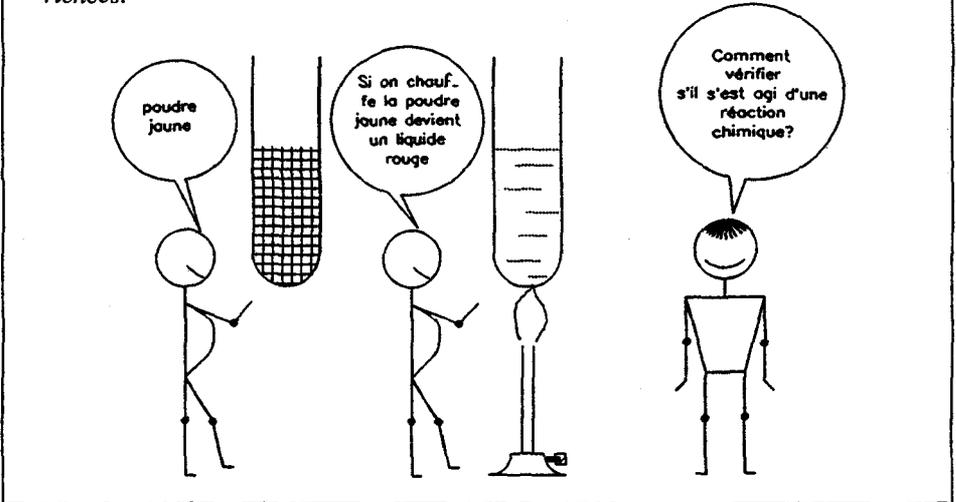
5.1. Item 1 : critères opérationnels utilisés dans la reconnaissance empirique d'une réaction

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.

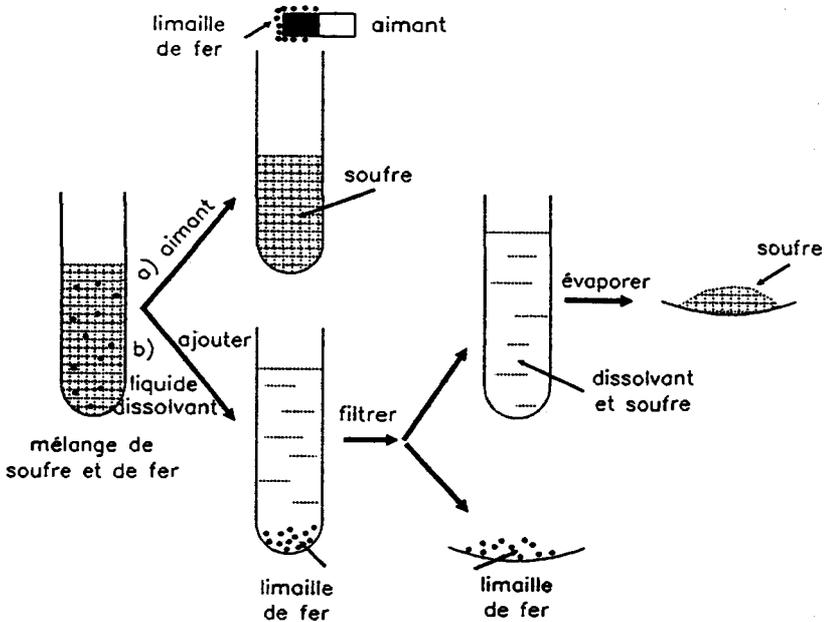
5.2. Item 3 : différenciation empirique entre le mélange de corps simples et la combinaison chimique de leurs éléments

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).

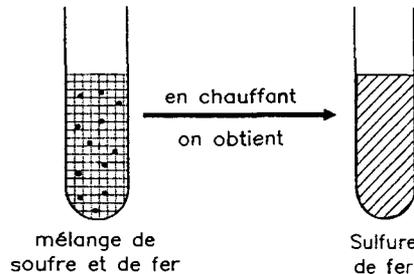
les élèves expérimentaux possèdent des connaissances quant aux processus

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.

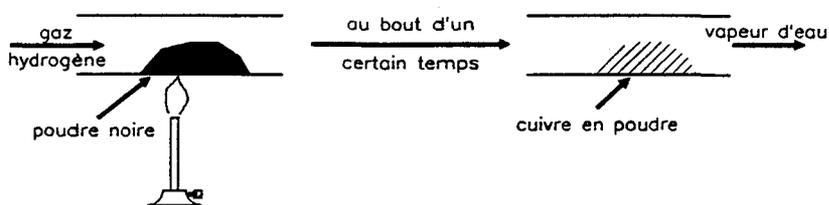
5.3. Item 5 : interprétation atomiste d'un processus chimique comme recombinaison des atomes présents dans les réactifs lorsqu'ils deviennent des produits

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.