

Exploration des acceptions du terme « qualité » pour les élèves de 4^e en technologie et de leurs points de vue

Exploration of the meanings of the term « Quality » for pupils (age13-14) in technology education and of their points of view

Joël LEBEAUME

UMR STEF
ENS CACHAN - INRP
École normale supérieure de Cachan
61, avenue du Président-Wilson
94235 Cachan cedex, France.
lebeaume@stef.ens-cachan.fr

Résumé

Au collège, en technologie, le terme « qualité » a une acception spécialisée liée au point de vue de l'entreprise. Cette acception ne correspond pas aux usages courants du terme dans les pratiques familiales. L'analyse des énoncés d'élèves, recueillis par questionnaire, indique qu'ils se réfèrent généralement à leurs pratiques de consommateurs-utilisateurs. De ce point de vue, le terme « qualité » évoque les propriétés que sont la durabilité, le prix, la marque, l'utilité, la praticité, l'esthétique et la conformité des produits. Les produits de référence sont ceux de grande consommation de leurs expériences familiales. Ces résultats informent les enseignants des risques de discordance sémantique dans l'enseignement-apprentissage. L'article discute des orientations pour l'enseignement et pour le développement du curriculum.

Mots clés : technologie, élèves, acceptions, langage, qualité.

Abstract

Technology education within junior high school uses the term « quality » which has an expert meaning and an usual meaning. These meanings depend on the point of view: the first one is the firms' point of view and the second is the customers' point of view. A research by questionnaire and the analysis of pupils' speech show that pupils generally refer to their customers practices. Their meanings of the term « quality » evocates resistance, price, trademark, usefulness, confort, design or savety of the products which are their usual products. These results inform teachers in order to avoid language confusions in teaching learning. The paper discusses at least some perspectives for teaching and curriculum implementation.

Key words : *technology education, pupils, meanings, language, quality.*

1. INTRODUCTION

L'exploration présentée s'intéresse au terme « qualité » et à ses acceptions pour les élèves lorsqu'ils sont sollicités à propos de la *qualité* des produits conçus, fabriqués et commercialisés. Comme ce terme réfère à la fois aux pratiques des entreprises industrielles et commerciales et aux pratiques de consommation-utilisation, l'exploration étudie en même temps le(s) point(s) de vue que les élèves adoptent lors de ces situations de communication en technologie. Enfin, sont repérés le champ sémantique de ce terme dans ses usages par les élèves ainsi que les produits auxquels ils se réfèrent,

Dans l'enseignement de la technologie, *qualité* est un terme important pour trois raisons majeures. La première est qu'il est implicitement associé à *valeur*, notion mentionnée dans les programmes de 3^e en tant que compétence exigible et explicitement présente dans les réalisations des classes de 4^e(¹). Il a également un usage majeur dans les productions contemporaines marquées par la « *démarche qualité* » (Noyé, 1989 ; Delafollie, 1991 ; Teixido, 1995). Il a ainsi de fréquents emplois dans les contenus de la formation des enseignants de technologie (Rak *et al.*, 1992). Mais, il est simultanément porteur de deux acceptions selon les deux points de vue qu'il recouvre, dans le registre spécialisé et dans le registre familier.

Les distinctions et les spécificités des connaissances familières et des connaissances scientifiques dans leur fonction et leur énoncé ont été mises en évidence dans les recherches en didactique des sciences (pour une synthèse des travaux voir Tiberghien, 2003a et 2003b). Parmi les difficultés d'apprentissage que ces recherches révèlent, sont soulignées les difficultés langagières liées aux discordances sémantiques. Ainsi, pour les élèves, le mot *haricot vert* ne désigne pas le fruit du botaniste (Boyer, 1997), le mot *entreprise* n'a pas le sens d'agent économique du gestionnaire (Audigier,

1987), le terme *choc* ne correspond pas à l'interaction mécanique du physicien (Lemeignan & Weil-Barais, 1993), etc. Ces discordances entre le sens commun et le sens disciplinaire sont ainsi susceptibles d'entraîner des « dialogues de sourds » dans les situations d'enseignement-apprentissage. Cordier (1994) signale ce piège de la langue et les risques de malentendus et de méprises qui limitent la portée de l'intervention enseignante en raison des référents distincts pour l'enseignant et ses élèves.

Ainsi, cette étude privilégie-t-elle l'analyse terminologique dont Bruguière *et al.* (2002) mentionnent la faible exploitation en didactique en raison de son insuffisance pour l'analyse des processus intellectuels mais dont ces auteurs argumentent l'intérêt pour comprendre le « langage des élèves ». Dans le cas particulier présenté ici, il s'agit de rendre compte du (ou des) sens particulier(s) pour les élèves, de *qualité*, c'est-à-dire de ses acceptations. Dans cet esprit, les résultats sont susceptibles d'informer les enseignants pour la conception des situations et des modalités d'enseignement-apprentissage, voire pour de nouvelles propositions curriculaires. La visée majeure de cette étude est donc prospective, au sens où elle propose de fournir des indications contribuant à discuter les contenus prescrits ou enseignés.

L'exploration n'envisage pas l'étude du processus d'élaboration notionnelle, d'extension sémantique et de points de vue ou celle des obstacles épistémologiques pour l'apprentissage. Elle se distingue ainsi de la recherche publiée donnant « *un premier aperçu de l'extension du concept d'objet technique chez les collégiens* » (Andreucci & Ginestié, 2002) qui, plus qu'une contribution à l'analyse du processus d'élaboration conceptuelle, informe en particulier des référents et des significations de ce multi-terme « objet technique », pour les collégiens au cours de leur scolarité.

La première partie précise la problématique de cette exploration et les deux points de vue correspondant aux deux acceptations du terme *qualité*. Elle précède la présentation de la méthodologie mise en œuvre pour le recueil et l'analyse des significations selon les élèves. Les réponses des élèves sont ensuite interprétées. Enfin sont présentées quelques perspectives pour l'enseignement de la technologie.

2. PROBLÉMATIQUE

Le terme *qualité* n'est pas univoque. Selon les contextes de son usage ses acceptations sont distinctes.

2.1. Deux points de vue et deux sens de qualité

Pour l'enseignement de la technologie, en raison des références des activités scolaires aux pratiques sociotechniques contemporaines, « qualité »

est définie selon les normes terminologiques de l'analyse de la valeur. C'est « l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins exprimés ou implicites » (norme ISO 8402, 1994 et norme NFX 50-150, 1996, p. 1).

Le sens du terme privilégie donc le point de vue de l'entreprise qui, selon les principes de la « démarche qualité », anticipe la meilleure satisfaction du client-usager. Du point de vue de l'entreprise, la qualité optimise ainsi la relation du client-usager au produit par la satisfaction offerte (relation A, figure 1).

La satisfaction attendue par le client-usager - ou le consommateur-utilisateur - correspond à son besoin. Pour ce consommateur-utilisateur, un produit est considéré comme un « panier d'attributs » qui regroupe des aspects fonctionnels, perceptuels, affectifs, esthétiques, etc. (Lancaster, 1971 ; Hanak *et al.*, 1996). Mais son appréciation et sa satisfaction portent à la fois sur les deux formes du produit : d'une part sa composante matérielle et les services associés (service après-vente, accessoires, etc.), d'autre part sa composante d'image de produit-média (Lendrevie & Lindon, 1990). Ainsi, dans l'acquisition et l'usage, le consommateur-utilisateur établit-il une relation à la fois avec le produit et avec l'entreprise présente par la signature de sa marque (relation B, figure 1).

Ces deux relations entre l'entreprise, le produit et le client-usager sont schématisées sur la figure 1. Selon le point de vue de l'entreprise ou celui du client-usager, le produit est associé à l'une ou l'autre des deux parties du couple commercial de l'offre et de la demande.

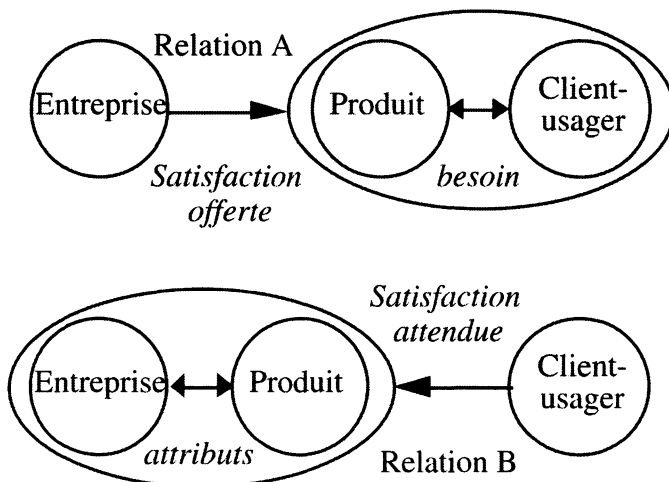


Figure 1 • Points de vue sur le produit

Ces deux points de vue ne se superposent pas. En effet, la relation A consiste à anticiper la relation B pour la satisfaire. La relation B, en revanche, n'exige pas de saisir la relation A. En d'autres termes, lors de la genèse du produit, l'entreprise se met à la place du client-usager alors que le consommateur-utilisateur n'a jamais besoin de changer de point de vue.

La conception-production des produits et leur acquisition-utilisation recouvrent les deux relations précédentes. Elles correspondent à deux ensembles de pratiques sociales qui ont chacun leur terminologie, l'un normalisé, l'autre usuel. Le dictionnaire de technologie industrielle (Favier *et al.*, 1996) reprend ainsi la définition normalisée précédemment citée. Les dictionnaires de la langue courante (Robert, 2000 ; Hachette, 2002 ; Larousse, 2002) associent à *qualité* l'état caractéristique d'une chose ou le critère qui permet de classer un produit parmi des produits de même gamme en citant les expressions de « *marchandise de bonne ou de mauvaise qualité, de qualité supérieure ou de première qualité* ». Dans les ouvrages grand public, ce n'est que dans les encyclopédies que sont précisés les deux sens qui renvoient aux deux points de vue : par exemple *qualité* est « *ce qui rend une marchandise ou un service plus ou moins appréciable pour le consommateur ou l'utilisateur* » (Microsoft Encarta, 2004).

Ces deux domaines de pratiques fixent ainsi l'usage et le sens particularisés du terme *qualité*. Ce sont les acceptations spécifiques du langage spécialisé et du langage usuel.

2.2. Les jeunes et la *qualité*

Les adolescents ne sont pas des novices en matière de consommation et d'utilisation. Ils possèdent des connaissances empiriques, acquises au gré de leurs expériences sociales, personnelles et familiales. Ces connaissances leur permettent d'affecter des attributs aux produits, de les distinguer, de les apprécier, de les choisir parmi l'offre du marché concurrentiel.

Des études mercatiques repèrent cet apprentissage progressif des adolescents-consommateurs. Dans une perspective de différenciation des segments du marché selon l'âge des enfants et des jeunes, Roedder (2001) distingue selon des stades, le processus de prise en compte progressive de composants de plus en plus nombreux de la réalité commerciale, de leurs inter-relations et de leur complexité : stades perceptuel (3-7 ans), analytique (7-11 ans) et réfléchi (11-16 ans). Selon cet auteur, à ces stades correspondent la connaissance différenciée de la publicité, des produits et des marques ainsi que les progrès des capacités et des savoir-faire des jeunes en matière d'achat, en particulier leur évaluation des produits avec des attributs progressivement plus nombreux.

Les connaissances empiriques des adolescents sont mises en mots dans le vocabulaire correspondant à leurs pratiques de consommation-utili-

sation. Dans ce registre du vocabulaire usuel, *qualité* ne peut avoir le sens correspondant à la terminologie spécialisée en raison de la centration sur la relation B et de l'absence de la nécessité de prise en compte de la relation A.

2.3. Acceptions de qualité et enseignement de la technologie

Dans l'enseignement de la technologie, la distinction de points de vue n'est pas seulement liée à l'opposition entre conception-production et consommation-utilisation, mais entre pratiques industrielles ou tertiaires et pratiques privées ou domestiques. En effet, au collège, les réalisations sur projet des élèves ainsi que les pratiques sociotechniques auxquelles elles réfèrent (Martinand, 1995 ; Lebeaume & Martinand, 1998) privilégient le point de vue de l'entreprise et la relation A (figure 1). Elles se distinguent à la fois des pratiques familières de consommation-utilisation des jeunes (relation B) et de leurs éventuelles expériences personnelles de conception-production domestiques et privées (par exemple : préparations culinaires, réalisations d'objets utiles). Cette relation C (figure 2) confond le producteur et l'utilisateur puisque la réalisation est « pour soi » et dégagée de relation commerciale entre le producteur et l'utilisateur.

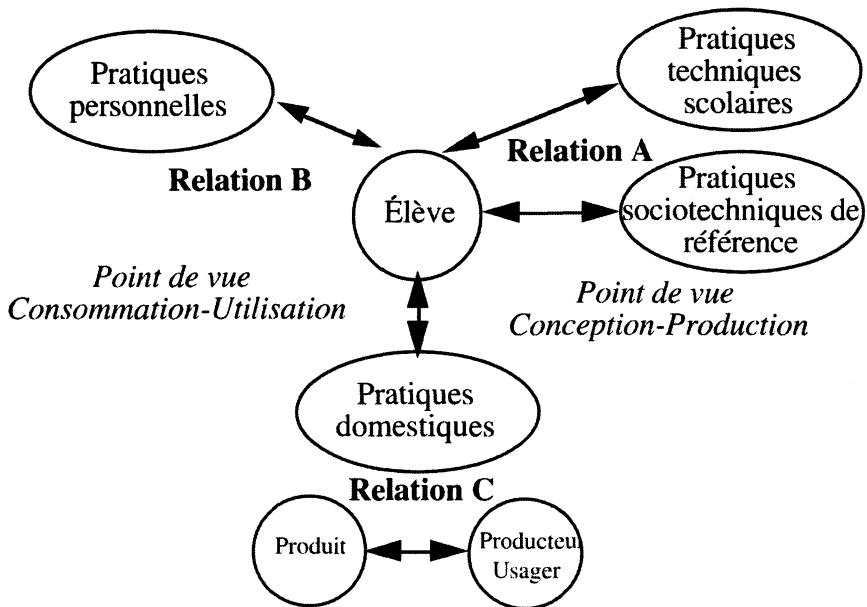


Figure 2 • Trois relations aux produits et aux pratiques de consommation-utilisation et de conception-production

Au collège et au cours de l'enseignement de la technologie, ces trois relations aux produits sont susceptibles de ne pas être distinguées par les élèves (et par les enseignants). Le terme *qualité* peut alors être source d'incompréhension en raison de ses deux acceptations correspondant à ses usages dans les deux registres des pratiques industrielles et des pratiques familiales.

L'identification du ou des points de vue des élèves et des sens qu'ils attribuent à *qualité* dans les situations scolaires de l'enseignement de la technologie propose ainsi de contribuer à la meilleure connaissance du « langage » des élèves. Comme l'indique le titre de l'article, l'exploration porte sur des élèves de début de 4^e. Nous considérons en effet que cet âge scolaire correspond à celui des élèves à mi-parcours de l'enseignement de la technologie. Ils ont déjà participé aux activités scolaires de conception-production en filigrane desquelles la qualité est implicitement ou explicitement évoquée par les enseignants. Au cours des deux années précédentes, la *qualité* a également été évoquée par les commentaires des présentations des activités industrielles et commerciales réelles, généralement effectuées en classe grâce à des vidéogrammes spécialisés pour la technologie et diffusés par les éditeurs (par exemple, dans la collection « Des objets et des hommes », La Cinquième & CNDP, 1998).

3. MÉTHODOLOGIE

L'ambition de rendre compte des acceptations du terme *qualité* pour les élèves d'une classe d'âge, pose deux difficultés méthodologiques majeures. La première concerne la technique de recueil des informations dont l'analyse qualitative et quantitative permette d'effectuer des regroupements et de repérer à la fois les régularités et les variations des points de vue des élèves, du champ sémantique et des produits-référents. Le second est celui de la constitution de l'échantillon des élèves interrogés.

Pour la première difficulté, la perspective d'analyse quantitative nous a conduits à choisir un recueil de réponses écrites. Faute de travaux antérieurs sur ce terme ou cette notion et donc d'un lexique identifié, il nous était impossible de faire sélectionner plusieurs termes parmi une liste fournie (par exemple à propos d'*entreprise*, Audigier, 1987). Il nous était également impossible de demander aux élèves de donner des termes pour qu'ils les associent à *qualité* (par exemple, à propos de *vivant*, Rolland & Marzin, 1996). En effet, afin d'identifier l'acceptation mobilisée par les élèves au cours de l'enseignement de technologie, la consigne devait permettre de maintenir le point de vue spécialisé. L'énoncé a été élaboré après une dizaine d'entretiens avec des élèves. Ces entretiens ont également révélé que les élèves avaient tendance à répondre en précisant des noms de produits, des

marques, etc., qui avaient pour eux valeur d'exemples ou de contre-exemples. La consigne retenue a été :

« Les entreprises proposent à leurs clients des produits de qualité.
Avec tes mots, précise ce que sont, selon toi, des produits de qualité :

Donne quatre exemples de produits qui, pour toi, sont des produits de qualité.
Précise pourquoi pour chacun d'entre eux.

Donne quatre exemples de produits qui, pour toi, ne sont pas des produits de qualité.
Précise pourquoi pour chacun d'entre eux. »

Encadré 1 • Texte de la consigne retenue

La seconde difficulté concerne l'échantillon des élèves interrogés. En effet, la familiarité des élèves avec la *qualité* est susceptible de varier selon l'enseignement de la technologie tel qu'ils l'ont rencontré au cours de leur scolarité antérieure. Les usages de ce terme dépendent en particulier des pratiques des enseignants, de leur accompagnement verbal des activités, de leur explicitation du vocabulaire, des comparaisons qu'ils effectuent entre les réalisations scolaires et les projets techniques réels. Afin de s'assurer d'une conformité minimale de l'enseignement de la technologie à l'esprit des prescriptions officielles et donc de l'existence du point de vue de l'entreprise dans les activités vécues par les élèves, nous avons considéré que les établissements d'exercice des conseillers pédagogiques permettaient d'écarter les éventuelles classes dans lesquelles le point de vue de l'entreprise serait totalement absent.

Le recensement des réponses des élèves a ainsi été réalisé par des professeurs-stagiaires volontaires, dans leurs classes et en respectant les consignes de passation fournies : information des élèves sur l'utilité de l'enquête afin de mieux connaître comment ils apprennent ; signalement que les réponses ne sont ni bonnes ni erronées et qu'elles ne seront pas notées ; lecture des consignes sans aucune autre précision ; durée d'environ une quinzaine de minutes. Le questionnaire comportait trois parties. Chaque question occupait avec l'espace de réponse le tiers d'une feuille de format A4. Étaient demandés en bas de page, le prénom de l'élève, son âge et son sexe. Ce recueil a été effectué dans l'académie d'Orléans-Tours au cours du premier trimestre de l'année 2000-2001. Il concerne 332 élèves de 16 classes de 10 établissements.

En raison des constats lors des premières analyses qui montraient d'une part que les élèves assimilaient l'expression *produit de qualité* à bon produit et que le point de vue de l'entreprise était faiblement marqué, une seconde enquête par questionnaire menée auprès d'un effectif équivalent et sur la même région a été conduite au début de l'année scolaire 2001-2002. Les questions étaient présentées d'une façon analogue avec deux modifica-

tions majeures. Dans la question, « pour les entreprises » était souligné et « bon produit » était substitué à « produit de qualité ». Comme l'expression « bon produit » ne renvoie pas explicitement à « qualité », l'analyse comparée des réponses est susceptible de préciser, par leurs différences, le champ sémantique étudié. En outre, n'étaient sollicités que trois exemples en raison des réponses précédentes des élèves. Ce second recueil a concerné 309 élèves de 15 classes de 13 collèges.

« Les entreprises conçoivent, réalisent et commercialisent des « bons produits ». Quelles sont pour les entreprises, les caractéristiques de ces « bons produits » ?

Cite trois exemples de « bons produits ».
Pour chacun, précise pourquoi.

Cite trois exemples de choses qui ne sont pas de « bons produits ».
Pour chacun, précise pourquoi. »

Encadré 2 • Texte du second questionnaire

Le matériel textuel analysé a ainsi été constitué de deux lots de questionnaires. Ont été exclues les feuilles dont les réponses des élèves étaient déplacées (préservatifs, seringues, canabis, etc.) et témoignaient d'un faible engagement des élèves pour cette tâche proposée par leur professeur. Ce sont alors 326 (2000-2001) et 285 (2001-2002) questionnaires qui ont été analysés.

Cette analyse a d'abord été effectuée par une mise à plat des réponses des élèves du questionnaire 1. Ont été repérés et codés dans un tableau numérique :

- le point de vue de l'entreprise pris par les élèves, lorsque les réponses explicitaient les relations de l'entreprise avec leurs clients ainsi que le rapport de satisfaction (expressions citées : pour les clients ou les consommateurs) ou bien les enjeux pour l'entreprise (« *se vend bien* », « *ça leur rapporte de l'argent* », coût de production réduit) ;

- les attributs de la qualité ; des regroupements ont été effectués selon les critères suivants :

- durée de vie : durabilité⁽²⁾, résistance,
- utilité : produit utile,
- usage : pratique, confortable, facilité d'utilisation,
- absence de danger : normes de sécurité, santé,
- attrait : beau, attirant, aspect,
- marque : marque connue,
- rapport qualité/prix,
 - bon rapport qualité/prix,
 - produit cher ou non,
- autre : par exemple produit garanti,

- les produits cités (Lidl, Crunch, stylo, etc.) déclarés comme étant de bonne qualité ou de mauvaise qualité.

Afin de mettre en évidence les acceptions du terme *qualité*, cette même grille a été utilisée pour l'analyse des réponses au questionnaire 2 en s'intéressant aux critères d'appréciation des *bons* produits. Pour les deux questionnaires, l'analyse quantitative a été effectuée sur les pourcentages des réponses.

La difficulté majeure de l'analyse des réponses des élèves fut liée à l'interprétation du sens des énoncés parfois très réduits. Le croisement de ces expressions avec les exemples et leurs commentaires a permis alors de préciser les propriétés jugées importantes. Dans le premier exemple ci-dessous, les réponses permettent de considérer que le point de vue pris par l'élève n'est pas explicitement celui de l'entreprise et que les attributs qu'il valorise sont le faible prix, la résistance et la durabilité. Dans le second exemple, les attributs sont le prix élevé, la marque, la durée de vie.

Exemple 1 : « *Produit de qualité ça veut dire un produit pas cher et de qualité .* »

Parmi les exemples : « *Tee-shirt : car quand je tombe, il n'est pas déchiré.* »
« *Télé : elle dure longtemps.* »

Exemple 2 : « *Des produits biens et chers.* »

Parmi les exemples : « *Des marques, ce qui dure longtemps.* »

4. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Les questionnaires renseignés indiquent d'abord que le thème abordé n'est pas étranger aux élèves. Dans l'ensemble des questionnaires, moins de 10 % des élèves ne répondent qu'à une seule des deux questions. Pour leur très grande majorité, les élèves interrogés en technologie à propos des *produits de qualité* ou des *bons produits* expriment des réponses. Ces réponses sont cependant inégales selon les classes interrogées, ce qui semble indiquer d'une part des différences d'implication dans la tâche proposée et d'autre part des différences associées à l'enseignement de la technologie, dans l'accompagnement verbal des activités, dans les références sollicitées et dans les structurations effectuées. Par exemple, dans le contexte de ce questionnement en cours de technologie, certains élèves mentionnent par exemple *cahier des charges*, semblant restituer ainsi les notions apprises.

« *Pour les entreprises, « ces bons produits » sont conformes à leur cahier des charges (...)* »

Pour les deux questionnaires, les résultats et leur interprétation sont rassemblés et sont présentés en indiquant d'abord le point de vue privilégié par les élèves, les attributs associés et les produits de référence des élèves. Les expressions des élèves, extraites de leurs réponses, sont citées en italique.

4.1. Point de vue privilégié

Dans leurs réponses, seulement une minorité des élèves valorise le point de vue de l'entreprise ou des pratiques industrielles ou tertiaires.

Sur les 326 répondants au premier questionnaire, un seul élève évoque (sans utiliser le terme) la compétitivité de l'entreprise en situant le produit parmi la concurrence de l'offre, et un seul également note les enjeux économiques de ce point de vue de l'entreprise. Moins d'un élève sur douze mentionne le point de vue de l'entreprise et la *qualité* exprimée en termes de rapport de satisfaction.

« C'est un produit qui offre au client ce qu'il souhaite. »

« Ce sont des produits qui doivent être comme les clients les désirent. »

« Ce produit doit répondre exactement à l'attente du client. »

« Des produits de qualité, pour moi, ce sont en premier des produits qui plaisent aux consommateurs ; il faut prendre en considération les goûts et les préférences, il faut être très précis. Lorsqu'on veut attirer la clientèle, il faut que ce soit des produits attirants, assurants. Pour avoir de la qualité, il faut souvent déboursier de l'argent. »

« Des produits de qualité sont des produits en lesquels les gens ont confiance, pensent qu'ils doivent acheter celui-là et pas un autre. Mais les gens font aussi confiance aux entreprises qui commercialisent ces produits de qualité. »

Les réponses des 285 élèves au second questionnaire concernant les *bons produits* diffèrent sensiblement des réponses précédentes. Le point de vue de l'entreprise semble plus marqué, peut-être en raison de l'expression soulignée dans la question. En ce sens, la satisfaction des clients et des usagers est explicitement citée par environ un élève sur dix (11 %).

« Des bons produits sont des produits qui apportent des avantages à l'utilisateur. »

De ce point de vue de l'entreprise, plus d'un élève sur cinq considère qu'un bon produit est un produit qui *se vend bien* (27 %), contribuant ainsi à la rentabilité de l'entreprise (4 %) notamment par un coût de production réduit (3 %). Pour ces élèves, un bon produit pour une entreprise est un produit qui satisfait au mieux le consommateur selon ses exigences, donc c'est un produit qui se vend bien.

« Pour les entreprises, « ces bons produits » sont conformes à leur cahier des charges et ces « bons produits » se commercialisent bien et leur rapportent de l'argent. »

« Apporter une valeur aux patrons et un salaire aux employés. »

« Pour les entreprises, un bon produit est un produit rentable, qui rapporte de l'argent, qui est facile à fabriquer et très pratique d'utilisation. Un bon produit est un objet qui facilite la vie des personnes (ex. handicapés). »

Ces réponses semblent indiquer qu'environ un élève sur dix, lorsqu'il est interrogé en technologie, mobilise le point de vue de l'entreprise. Les modalités de l'enquête ne permettent pas de déterminer si ces réponses correspondent à des élaborations notionnelles ou à une restitution de formulations entendues ou apprises révélant la mémoire lexicale des élèves.

4.2. Attributs des produits de *qualité* et des *bons produits*

Dans leurs réponses, les élèves mentionnent les attributs qu'ils associent à la *qualité* des produits ou aux *bons produits*.

Au premier questionnaire, par ordre d'importance, les attributs sont la durabilité, la marque, le confort d'utilisation, l'esthétique, le prix, la sécurité et l'utilité (tableau 1). Ces attributs mêlent caractéristiques d'état connues dès l'achat (prix, marque) et caractéristiques d'usage révélées par l'emploi au fil du temps. Pour les élèves, un *produit de qualité* est d'abord un produit qui résiste au temps, qui fonctionne bien, qui n'est pas en panne et qui ne casse pas (80 %). En d'autres termes, selon les produits, la *résistance*, la *solidité* et la *fiabilité* assurent ainsi la *durabilité*. Relative parfois à des produits de mode et plus rarement à des produits de luxe, cette *qualité* est fortement attribuée à la *marque* (38 %) avec quelquefois la préférence d'une signature considérée comme française. Témoin de l'engagement de l'entreprise et critère de confiance, trace de l'expérience des élèves et signe identitaire, pour les élèves, la *marque* définit la *qualité* car le produit est fidèle aux promesses de l'emballage ou de la publicité ou encore garanti par le fabricant. La *qualité* est ensuite qualifiée par la facilité d'usage, le confort d'utilisation d'un produit pratique qui remplit pleinement les fonctions attendues (33 %), en somme un produit « *serviable* » selon l'expression de deux élèves. C'est un produit auquel l'appréciation « bon ou bien » est accordée sans réserve. Dans le même esprit, le produit plaît car il est beau, joli, séduisant, attirant, esthétique et on l'estime (16 %).

« Ce sont des produits qui durent longtemps, qui sont bien résistants, qui marchent bien. »

« Pour moi des produits de qualité sont des produits tirés d'une grande marque ; des vêtements, des chaussures, des parfums, de l'électroménager pour le prestige de la marque. »

« Les produits de qualité sont des produits qui durent longtemps, qui sont de marque et qui sont solides. Mais aussi des produits attirants et jolis. »

« Les produits de qualité sont des produits résistants et donc ils ont une durée de vie plus longue. »

Pour les élèves, la qualité a aussi un prix. C'est le plus souvent un produit *cher* dont le prix assure la qualité (19 %) car associée à une marque, ou bien un produit à un *prix raisonnable* et de valeur plus relative (15 %).

« Produits de qualité, ça veut dire un produit pas très cher et de qualité. »

« L'objet est vendu normalement plus cher pour la qualité. »

« Je pense que les produits de qualité sont des produits bien emballés, bien traités et ce n'est pas parce qu'ils sont chers qu'ils sont de qualité. »

« Des produits de qualité, ce sont des produits qui sont chers, incassables et qui durent au moins 10 ans et qui ont une grande marque. »

« Tous les produits bon marché (qui ne sont pas très chers) sont souvent de mauvaise qualité car ils ne sont pas fiables. »

« Pour moi des produits de qualité, ce sont des bons produits qui ont une marque connue. En général, ils ont beaucoup d'argent et peuvent faire des publicités à la télévision. (...) De plus, ces produits sont plus chers que les autres sans marque. »

« Ce sont des produits qui valent le prix qu'on les paie. »

« Des produits de qualité sont des produits qui coûtent cher. »

« Les produits de qualité sont des produits chers et résistants. On en achète pour faire style. C'est de la marque donc ils attirent les consommateurs (j'en fais partie). »

« Pour moi, un produit de qualité c'est un produit qui est supérieur en performance vis à vis de la moyenne des autres produits. Pour le client, ce produit est souvent plus expensif (cher) qu'un produit de mauvaise qualité. »

D'une façon moindre, un *produit* de qualité est un produit sûr (12 %), sans risque pour la santé lorsqu'il est aliment ou produit de beauté, protégé lorsqu'il est équipement électrique et beaucoup plus rarement non polluant ou recyclable. Il est alors aux normes et porte les labels de *conformité*. Pour les élèves, ce sont des produits qui ne s'abîment pas vite, qui ont une garantie et qui sont assurés en matière de sécurité.

« Des produits de qualité sont des produits qui sont contrôlés par un institut. »

Plus faiblement citée par les élèves, l'*utilité* du produit est incontestable comme l'est celle des stylo, ordinateur, eau ou lave-linge (11 %). Mais tous les exemples donnés sont des objets utiles et comme le précisent quelques élèves, ce n'est ni un « *gadget inutile* », ni « *de la camelote ou de la pacotille* », ni un « *article d'occasion* » ou une « *antiquité* », ni le « *bas de gamme* ».

Dans le second questionnaire (tableau 1), les *bons produits*, parfois qualifiés de produits de « *bonne qualité* » (12 %), sont prioritairement indispensables ou « *utiles* » (38 %), agréables, satisfaisants, confortables ou « *pratiques* » (30 %), solides, résistants, fiables ou « *durables* » (27 %), sains, sans risque ou « *conformes* » (20 %), jolis, beaux, attirants ou « *esthétiques* » (20 %) et d'un bon rapport qualité/prix ou d'un « *prix raisonnable* » (20 %).

« Les caractéristiques d'un bon produit : qu'il plaise à tout le monde ; qu'il soit bien et pas trop cher ; qu'il soit utile. »

« Pour moi, un bon produit est un produit qui vaut le coût de l'acheter. »

« Les caractéristiques sont : le rapport qualité/prix, la marque, le prix, la qualité (résistance, solide, durable), l'utilité, l'esthétique. »

Ainsi, les réponses des élèves dans les deux séries de questionnaires peuvent-elles être réparties dans le panier d'attributs que sont la durabilité, l'utilité, l'esthétique, la praticité, la sécurité, le prix, la marque, mais avec des poids respectifs légèrement différents (tableau 1).

<i>Point de vue de l'entreprise</i>	Produit de qualité en %	Bon produit en %
- un produit pour un client, un usager	8	11
- un produit qui se vend bien	3	27
<i>Attributs du produit</i>		
- un produit durable	80	27
- un produit utile	11	38
- un produit beau	16	16
- un produit pratique	33	30
- un produit sans danger	12	20
- un produit à un prix raisonnable	15	20
- un produit cher	19	10
- un produit de marque	38	20
<i>Nombre moyen d'attributs</i>	<i>2,3</i>	<i>1,8</i>
<i>Nombre de réponses</i>	<i>326</i>	<i>285</i>

Tableau 1 • Contenu des réponses aux deux questionnaires

Après regroupement, la moyenne du nombre des attributs cités est d'environ deux. Cependant, certains élèves se satisfont de percepts immédiats alors que d'autres examinent d'une façon plus réfléchie les liens entre les attributs. Ainsi se distinguent la première et les deux autres expressions d'adolescents qui suivent.

« Ce sont des grandes marques. Elles coûtent cher donc elles sont solides. »

« On ne peut pas vraiment savoir ce que sont des produits de qualité, ce n'est pas forcément des marques célèbres mais plutôt un produit qui est résistant, qui dure longtemps. »

« Pour moi, un produit de qualité est un produit qui a un bon rapport qualité-prix, mais surtout qui est résistant, mais ça n'a rien à voir avec les marques sauf exception. »

Ces contrastes entre les citations de quelques élèves révèlent aussi la diversité de la distance prise à l'encontre de leurs pratiques familières. Sans doute en relation avec leurs expériences d'adolescents-consommateurs, directes ou indirectes (famille, média), les élèves critiquent plus ou moins ces offres de l'industrie et du commerce, saisies comme des produits-médias, des produits matériels ou les résultats d'un processus. Si la très grande majorité d'entre eux signale son appréciation de certaines étiquettes, quelques-uns affectent la « disqualité » des produits d'un point de vue citoyen, par exemple lorsque leur fabrication est illégalement confiée aux enfants des pays du Tiers-Monde (deux citations) ou que leur usage est susceptible de modifier irréversiblement l'environnement (quatre citations). Entre ces deux types de réponses, la distance très variable aux actions d'achat ou d'usage se distingue par le nombre d'attributs mentionnés (de 0 à 5). Mais les modalités de l'enquête ne permettent pas de savoir si ces critères les plus rarement signalés correspondent à des attributs supplémentaires ou s'ils sont les signes d'une plus grande compréhension de la complexité du système technico-économique.

4.3. Des attributs selon la consigne

La valorisation des attributs par les élèves varie selon les termes de la question posée : un *produit de qualité* fait retenir la durabilité, le prix élevé et la marque, alors qu'un *bon produit* fait davantage évoquer son utilité (tableau 1). Cette différence des réponses met en évidence l'acceptation privilégiée par les élèves du terme *qualité*.

Mais ces variations dans les réponses sont en partie liées aux produits auxquels se réfèrent les élèves dans chacun des questionnaires. La consigne *produit de qualité* tend à faire citer les objets dont leur résistance au choc, à la déchirure ou au temps semble faire écho à l'expression familière « *ça, c'est de la qualité !* » ou bien les produits dont la publicité met l'accent sur l'image de marque. Dans leur choix des *produits de qualité*, les adolescents évoquent d'une façon privilégiée des objets techniquement sophistiqués tels les ordinateurs ou les téléviseurs. Pour les *bons produits*, cette priorité n'apparaît pas. Cette consigne *bon produit* tend à induire le choix des élèves pour les produits alimentaires qui sont davantage cités avec leurs caractéristiques organoleptiques ou sanitaires. Comme ces bons et mauvais produits sont désignés par un terme générique d'aliments (pâtes, viande par exemple), la marque est alors un attribut plus faiblement cité par ces élèves.

Dans les deux questionnaires, et donc indépendamment de la consigne, les *produits de non-qualité* ou les *mauvais produits* sont quantitativement moins cités. Environ un élève sur deux ne renseigne pas ou ne renseigne que partiellement cet item. La drogue, la cigarette et l'alcool sont alors massivement notés en signalant leur dangerosité. Suivent les produits alimentaires à la saveur peu appréciée ou jugées trop gras ou trop sucrés, les articles made in Taïwan ou China, les articles signés de grandes enseignes de la distribution.

« Moi, je trouve que les produits de la marque (distributeur) ne sont pas super, car ils copient les autres tout en étant moins bien. »

4.4. Les produits désignés : les références familières des élèves

Les réponses des élèves varient ainsi selon le poids qu'ils accordent à chacune des rubriques d'attributs car elles sont influencées par leurs pratiques et expériences personnelles et sont liées aux produits auxquels ils se réfèrent. Les exemples cités portent presque exclusivement sur les produits courants de grande consommation « que tout le monde achète ».

« C'est un produit qui se vend bien, bonne publicité, produit efficace, un produit de marque. »

« Ce sont des produits qui sont vendus dans les grandes surfaces. »

Les élèves ne mentionnent que très rarement des produits à usage collectif (deux citations : avions et ponts) ou des services (trois citations : émissions de télévision, école). Au travers des citations des produits, ils évoquent alors les produits familiers, de leur environnement familial et scolaire. L'analyse quantitative des produits cités indique que près de 40 % de ces produits sont des vêtements et très majoritairement des chaussures de sport, identifiés par les marques. Selon la consigne, sont ensuite mentionnés les ordinateurs, téléviseurs et appareils hi-fi (environ 15 % pour « produits de qualité » et 10 % pour « bons produits »), les aliments (10 % et 15 % selon la consigne), les articles de sport et de loisirs notamment les consoles de jeux et les bicyclettes (8 %), les accessoires tels que montres, téléphones portables ou bijoux (5 %), les voitures (6 %), les appareils électroménagers (4 %), les fournitures scolaires, en particulier les stylos (6 %), les produits d'hygiène ou de beauté dont les shampoings et les parfums (5 %), les meubles (3 %). Les réponses des garçons et des filles sont légèrement différentes, les uns privilégiant par exemple les lecteurs de CD ou les voitures, les autres les montres ou les produits de beauté.

« Un produit qui dure, beau donc attirant mais souvent cher et qui sert, qui exige une grande technologie. »

4.5. Le champ sémantique de qualité pour les collégiens

Les réponses des élèves valorisent leurs pratiques et leurs expériences familières de jeunes utilisateurs-consommateurs. En milieu du parcours scolaire de technologie, celle-ci semble être ainsi première. L'évocation du marché s'accompagne d'une identification plus facile des élèves aux consommateurs qui ne s'imaginent pas, à quelques exceptions près, dans la position réciproque. Le champ sémantique du terme *qualité* est alors exprimé par des mots qui évoquent les propriétés des produits : durabilité, fiabilité, résistance, solidité, prix, marque, signe, utilité, indispensabilité, praticité, facilité, confort, convenance, attrait, beauté, esthétique, sans danger, sans risque, conformité, légalité.

Le champ sémantique du terme *qualité* recouvre ses acceptions qui sont associées aux produits auxquels les élèves se réfèrent. Ce sont les produits de grande consommation, de leurs pratiques individuelles ou familiales, d'achat ou d'usage.

5. PERSPECTIVES

L'exploration par questionnaire des sens du terme *qualité* pour près de 600 collégiens interrogés en deux groupes, informe sur les acceptions et les référents de ce terme employé dans une consigne écrite au cours

d'une séance de technologie. Cette investigation exploratoire permet de proposer des orientations pour de nouvelles recherches.

La meilleure connaissance du « langage des élèves » paraît nécessaire à la fois dans ses aspects sémantiques et lexicaux. Dans l'enquête menée, le mot *produit* par exemple, semble être assimilé à *article* par les élèves qui utilisent préférentiellement les expressions courantes de produits alimentaires, produits de beauté voire produits chimiques. Dans une autre enquête (Lebeaume, 2003), le terme *matériau* renvoie de la même façon aux matériaux de construction. Mais, dans ces deux cas, l'identification des confusions de vocabulaire n'est pas suffisante, excepté pour informer les enseignants dans leur guidage des apprentissages ou pour construire des outils d'enquête sans contresens. L'enjeu en effet de telles recherches est de préciser les conditions des élaborations notionnelles et les appuis éventuellement disponibles dans les acceptations mobilisables.

Dans cet esprit, d'autres enquêtes devraient prolonger cette exploration de *qualité* en se centrant sur des séries de produits (biens d'équipement, biens et services) afin d'identifier les variations éventuelles des significations selon les produits-référents implicites des élèves. Les acceptations de *qualité* sont-elles distinctes lorsque les élèves sont sollicités à propos de produits qui leur sont familiers ou bien étrangers ? Le point de vue qu'ils privilégient est-il également différent ? En d'autres termes, la familiarité avec des produits est-elle un appui ou à l'inverse un frein à l'expression du point de vue de l'entreprise, et le cas échéant quels sont les attributs qui limitent cette extension et ce renversement de point de vue ? Du point de vue méthodologique, il conviendrait d'effectuer ces études par entretiens afin de percevoir directement l'impact du langage et du vocabulaire, de favoriser les explicitations par les élèves et de mieux cerner les appuis ou les résistances que représentent les pratiques familières des élèves. Ces entretiens permettraient aussi d'apprécier plus précisément les jugements exprimés par les élèves dans les questionnaires : supériorité des produits affectée parfois aux réalisations artisanales, parfois aux magasins spécialisés, infériorité de certains produits étrangers, de certaines enseignes, de quelques offres spéciales. Ces exemples témoignent des jugements ou opinions des élèves-adolescents, peut-être liés aux représentations sociales, aux discours, aux rites et aux coutumes familières :

« Pour moi, des produits de qualité sont des produits soignés, faits à la main, avec la matière première rare, et qui la plupart du temps sont chers. »

« Une rolls-royce car elle est faite par des artisans très qualifiés et qui utilisent des matériaux très résistants. »

« Pour moi, les voitures allemandes sont de très bonne qualité ; les ingénieurs allemands sont très qualifiés. »

Pour l'enseignement, l'exploration présentée révèle la prégnance des pratiques familières et l'existence de connaissances empiriques des actions

ordinaires qui sont à prendre en charge dans l'apprentissage-enseignement. Cette prégnance est particulièrement manifeste dans les réponses majoritaires des élèves(1) qui se distinguent des expressions plus rarement formulées(2) :

(1) « *Des produits de qualité sont des produits qui correspondent à mes besoins.* »

(2) « *Les produits de qualité doivent répondre aux besoins des clients.* »

Comment en effet assurer cet apprentissage notionnel qui permet de passer du point de vue consommateur-utilisateur au point de vue concepteur-producteur, c'est-à-dire des pratiques personnelles ou domestiques aux pratiques spécialisées industrielles et tertiaires ? Plusieurs travaux concernant les savoirs économiques ont déjà montré l'incidence des pratiques familiales d'économie sur les conceptions des élèves (Vergès, 1989 ; Beitone & Legardez, 1995 ; Chatel, 1996). De même, Audigier (1987) note à la fois l'empreinte forte des expériences personnelles des élèves et le dualisme simplificateur dans leurs perceptions de l'entreprise. Ce dualisme est manifeste dans les distinctions des élèves entre les magasins haut et bas de gamme par exemple, mais aussi dans la faible appréciation relative des rapports qualité-prix ou qualité-coût.

Dans une perspective d'ingénierie didactique, la conception d'activités d'enseignement-apprentissage ne peut ignorer les acceptions spontanées des élèves à propos de qualité et les pratiques empiriques qu'ils mobilisent. Nous supposons que la prise en charge du « langage des élèves » est possible grâce à la confrontation des relations distinctes des élèves au produit et aux pratiques techniques (relations A, B et C de la figure 2). Selon cette perspective, les projets techniques du collège constituent des exemples à partir desquels la relation A peut être construite en identifiant les acteurs du projet technique en classe ainsi que ceux des entreprises de référence (concepteurs-producteurs et clients-usagers). C'est à partir de cette explicitation et de sa confrontation avec les pratiques familières de consommation-utilisation, que la distinction des points de vue et de leurs spécificités est susceptible d'être élaborée par les élèves, ainsi que la différenciation des acceptions du terme qualité. Progrès langagiers et progrès conceptuels seraient ainsi associés.

Mais cette proposition pour l'enseignement-apprentissage dépend de deux aspects de la mise en œuvre pédagogique. Le premier concerne la comparaison possible des produits scolaires et des produits réels du marché et de leurs critères ou attributs de *qualité*. Le second est la différenciation des rôles des élèves dans les activités de projet technique pour qu'ils puissent nettement identifier la relation A. Les conditions actuelles de l'enseignement de la technologie ne sont pas propices à cette orientation. En effet, l'examen de ces réalisations (Lebeaume, 2001) révèle qu'en raison de l'obligation d'achat par les familles de ces « objets confectionnés » – obligation de fait en raison de l'absence de financement des activités –, les projets techniques

confondent souvent les rôles d'industriel-commerçant et de client-usager. La relation C (figure 2) alors privilégiée, ne peut que très difficilement évoquer la relation A et la distinguer de la relation B. Toutefois, les programmes et les équipements offrent des opportunités, en particulier dans le scénario « production d'un service » ou dans les « réalisations assistées par ordinateur » notamment les conceptions et mises à disposition de sites qui permettent d'une part d'échapper aux contraintes financières d'achat de matériaux et d'autre part de mener des projets techniques en relation avec des références explicites. La relation A peut alors être explicitée et confrontée aux deux autres relations ancrées sur les pratiques individuelles des jeunes. Ces projets sont même susceptibles de bousculer les attributs de *qualité* mobilisés par les élèves, en particulier la durabilité, premier dans l'exploration menée. Mais cette solution envisageable pose de nouvelles questions sur l'approche que font les élèves de ces produits immatériels, notamment pour les sites gratuits qui risquent de faire confondre l'utilisateur et le client.

Les réponses des collégiens permettent également de discuter les propositions de programmes et de suggérer des notions susceptibles d'être élaborées en éducation technologique. À cet égard, *produit* est sans doute le centre d'un réseau de notions permettant de distinguer les points de vue et d'articuler les premières élaborations des couples notionnels : produit-production, produit-marché, produit-marchandise, client-fournisseur, demande-offre, prix-coût, satisfaction attendue – satisfaction offerte. Dans chacun de ces couples, les termes et les points de vue des relations A et B peuvent en effet être distingués. Concevoir les possibles de cette approche notionnelle, sa progressivité pour que *qualité* soit mieux caractérisée par les élèves est aussi une perspective de recherche.

Au-delà des informations recueillies et analysées sur les acceptations du terme *qualité* qui constituent des éléments disponibles pour le guidage par les professeurs des progrès langagiers et notionnels des élèves, l'exploration présentée suggère des propositions pour la technologie au collège. Les élaborations notionnelles, exprimées dans les programmes actuels en termes de schémas de pensée⁽³⁾, jusqu'alors peu étudiées dans les recherches en didactique de la technologie constituent des éléments fondamentaux de l'éducation technologique. Ce sont, en effet, les outils intellectuels qui, d'une part, ouvrent les élèves à l'analyse critique du monde « technicisé » et à l'action raisonnée et qui, d'autre part, leur permettent de discuter leurs opinions largement exprimées dans leurs réponses à l'enquête sur la *qualité*.

NOTES

1. Remarque : au cycle central, le scénario « essai et amélioration d'un produit » vise à poser et résoudre des problèmes de qualité. Dans le même esprit, le scénario « extension de gamme d'un produit » met l'accent

sur l'innovation afin de comprendre les politiques de produit justifiant l'adéquation optimale de la diversification des produits à la segmentation du marché.

2. Remarque : dans le domaine industriel, la *fiabilité* est une caractéristique définie par une norme (NFX 50-500). Elle est exprimée par la probabilité que le produit accomplisse une fonction requise dans des conditions données, pendant un temps donné. La *maintenabilité* correspond à la probabilité attachée à la durée de réparation. Ces deux caractéristiques définissent la *disponibilité* du produit qui indique l'usage potentiel du produit. Ces caractéristiques d'usage se distinguent de la *durabilité* à laquelle correspond, selon la norme NFX 50-500, la durée de vie ou durée de fonctionnement potentiel d'un produit pour les fonctions qui lui ont été assignées dans des conditions d'utilisation et de maintenance données. La fiabilité et la durabilité se confondent lorsqu'à la première défaillance, le produit est éliminé (cas par exemple des produits jetables). (voir Aublin *et al.*, 1996).

3. Voir le programme du cycle central (évaluation) : « *des schémas de pensée permettant d'ouvrir un questionnement, d'orienter l'observation ou la compréhension, de diriger l'analyse, d'organiser l'espace et le temps, ou d'orienter les choix d'action* ».

BIBLIOGRAPHIE

ANDREUCCI C. & GINESTIÉ J. (2002). Un premier aperçu sur l'extension du concept d'objet technique chez les collégiens. *Didaskalia*, n° 20, pp. 41-66.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION (1978). *Norme NFX50-500 : durée de vie et durabilité des biens. Vocabulaire*. Paris, AFNOR.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. (1996). *Norme NFX50-150 : vocabulaire du management de la valeur, de l'analyse de la valeur et de l'analyse fonctionnelle*. Paris, AFNOR.

AUBLIN M., CAHUZAC R., FERRAZ J.-P. & VERHNÈRES G. (1996). *Construction mécanique*. Paris, Dunod.

AUDIGIER F. (1987). *Entreprise et représentations*. Paris, INRP.

BEITONE A. & LEGARDEZ A. (1995). Enseigner les sciences économiques : pour une approche didactique. *Revue française de pédagogie*, n° 112, pp. 33-45.

BOYER C. (1997). *Conceptualisation de la reproduction végétale à l'école primaire*. Thèse de doctorat, université Paris V.

BRUGUIÈRE C., SIVADE A. & CROS D. (2002). Quelle terminologie adopter pour articuler enseignement disciplinaire et enseignement thématique de l'énergie, en classe de première de série scientifique ? *Didaskalia*, n° 20, pp. 67-100.

CHATEL E. (1996). *Une analyse économique de l'action éducative : évaluation et apprentissage dans les lycées*. Thèse de doctorat, université Paris X.

CORDIER F. (1994). *Représentations cognitives et langage : une conquête progressive*. Paris, Armand Colin.

DELAFOLLIE G. (1991). *Analyse de la valeur*. Paris, Hachette.

FAVIER J., GAU S., GAVET D., RAK I. & TEIXIDO C. (1996). *Dictionnaire de technologie industrielle*. Paris, Foucher.

- HACHETTE (2002). *Dictionnaire de la langue française*.
- HANAK J., BIALES M. & FOSSE M.-H. (1996). *Notions fondamentales de mercatique*. Paris, Foucher.
- LANCASTER K. (1971). *Consumer demand : a new approach*. New York, Columbia University Press.
- LAROUSSE (2002). *Le Petit Larousse Illustré*.
- LEBEAUME J. (dir.) (2001). *Réalisations-productions et objets-produits en technologie au collège. Rapport de recherche en réponse à l'appel à l'association de l'INRP*. Orléans-Cachan-Paris, IUFM Orléans-Tours, LIREST-GDSTC, INRP.
- LEBEAUME J. (2003). Les matériaux et leurs familles selon les élèves de 6e : questionnements pour les contenus de la technologie. In D. Raichvarg, A. Giordan & J.-L. Martinand (éds), *Actes des 25^e journées internationales de Chamonix*. Paris, DIRES, pp. 243-250.
- LEBEAUME J. & MARTINAND J.-L. (coord.), (1998). *Enseigner la technologie au collège*. Paris, Hachette.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris, Hachette.
- LENDREVIE J. & LINDON D. (1990). *Mercator – Théorie et pratique du marketing*. Paris, Dalloz.
- MARTINAND J.-L. (1995). Rudiments d'épistémologie appliquée pour une discipline nouvelle : la technologie. In M. Develay, (dir.), *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines*. Paris, ESF, pp. 339-352.
- MICROSOFT CORPORATION. (2004). *Encarta*. CDRom.
- NOYÉ D. (1989). Quelles formations à la qualité ? *Éducation permanente*, n° 97, pp. 7-18.
- ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION (1994). *Norme ISO 8402 : management de la qualité et assurance de la qualité. Vocabulaire*. Paris, AFNOR.
- RAK I., TEIXIDO C., FAVIER J. & CAZENAUD M. (1992). La démarche de projet industriel. *Technologie et Pédagogie*. Paris, Foucher.
- ROBERT (2000). Qualité. *Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*. pp. 1574-1575.
- ROEDDER JOHN D. (2001). 25 ans de recherche sur la socialisation de l'enfant-consommateur. *Recherche et Applications en Marketing*, vol. 16, n° 1, pp. 87-129.
- ROLLAND A. & MARZIN P. (1996). Étude des critères du concept de vie chez les élèves de sixième. *Didaskalia*, n° 9, pp. 57-82.
- TEIXIDO C. (1995). *La compétitivité industrielle*. Paris, Foucher.
- TIBERGHEN A. (dir.) (2003a). *Des connaissances naïves au savoir scientifique*. Synthèse commandée par le programme École et sciences cognitives.
- TIBERGHEN A. (2003b). Des connaissances naïves au savoir scientifique. In M. Kail & M. Fayol (dirs), *Les sciences cognitives et l'école*. Paris, PUF, pp. 353-413.
- VERGÈS P. (1989). Représentations sociales de l'économie : une forme de connaissance. In D. Jodelet (dir.), *Les représentations sociales*. Paris, PUF, pp. 387-405.

REMERCIEMENTS

L'auteur remercie Oderic Delefosse et Serge Goffard pour leurs conseils dans le domaine des sciences du langage et leur relecture de l'article.

Cet article a été reçu le 19/12/01 et accepté le 3/02/04.



Approches historique et didactique de la réversibilité

Historical and didactical approaches of reversibility

Martine MÉHEUT

IUFM de l'académie de Créteil
Laboratoire de didactique des sciences physiques, université Paris 7
Case 7086, 2, place Jussieu, 75251 Paris cedex 05, France.

Chantal DUPREZ

Université Lille 2

Isabelle KERMEN

Université d'Artois

Résumé

Nous analysons différentes facettes de la notion de réversibilité en relation avec l'histoire du second principe de la thermodynamique. Ceci nous permet de caractériser les approches développées dans les ouvrages d'enseignement de premier cycle universitaire. Nous étudions enfin, par des entretiens et des questionnaires, les représentations d'étudiants de niveau « licence » à ce sujet.

Mots clés : thermodynamique, réversibilité, histoire, manuels, étudiants.

Abstract

We propose an analysis of the notion of reversibility, in relation with the historical development of the second law of thermodynamics. Then we characterize pedagogical approaches of this notion as presented in first years university books. Interviews and questionnaires allow us to describe representations developed by bachelors of physics.

Key words : thermodynamics, reversibility, history, books, students.

1. PROBLÉMATIQUE

Le travail présenté ici se situe dans une perspective de développement de situations d'enseignement-apprentissage de la thermodynamique dans les premières années de l'enseignement universitaire. Nous nous intéressons plus particulièrement à la notion de réversibilité/irréversibilité d'une transformation, dont l'émergence est très liée à celle du second principe, qui « *fait la force du second principe* » (Planck, 1903, p. 84), dont « *l'assimilation constitue en fait la clef de la Thermodynamique – et de son utilisation pratique* » (Fer, 1970, p. 68).

Quelques travaux (Kesidou & Duit, 1993 ; Ben Zvi, 1999) proposent, pour des élèves de 15-16 ans, une première approche du second principe en termes de transformation et de dégradation de « l'énergie », ce terme désignant aussi bien des transferts d'énergie que l'énergie à proprement parler. Cette approche fait intervenir des notions faiblement définies telles que la qualité de « l'énergie » et le caractère naturel/artificiel, spontané/forcé, des transformations.

Au niveau universitaire, différentes approches du second principe ont été suggérées (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996). Ces suggestions ne sont pas argumentées par rapport aux difficultés et possibilités cognitives des étudiants, encore peu connues, et n'ont pas, semble-t-il, fait l'objet d'expérimentations contrôlées.

Les quelques études concernant les raisonnements des étudiants à ce sujet montrent que là où plusieurs éléments doivent intervenir dans le raisonnement, les étudiants ont tendance à se centrer sur un objet unique, à ne raisonner que sur une variable à la fois (Rozier & Viennot, 1991). Ils privilégient dans les raisonnements les variables les plus accessibles au sens commun. Ainsi, par exemple, les élèves ne retiennent-ils de l'entropie que ce qui se rattache aux variables spatiales (Gréa & Viard, 1994).

Que l'on se place dans le cadre de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988) ou dans la perspective présentée par Kattmann *et al.* (1995) sous le terme de « *reconstruction didactique* », l'analyse des savoirs en jeu et des formes de pensée disponibles chez les étudiants constituent des étapes préalables à l'élaboration de contenus et de situations d'apprentissage. Nous reviendrons donc sur quelques étapes de la genèse historique de cette notion. Nous verrons ensuite comment elle est présentée dans des ouvrages de premier cycle universitaire. Nous analyserons enfin, par des entretiens et des questionnaires, quels types de raisonnement développent les étudiants pour répondre à des questions concernant la réversibilité d'une transformation.

Ces analyses ne sont pas totalement indépendantes. Certaines « erreurs » des étudiants ont en effet attiré notre attention sur l'une ou l'autre « *facette* » (Minstrell, 1992) de cette notion de réversibilité, ce qui nous a sug-

géré des directions d'analyse des manuels. Le retour aux textes historiques nous a conduites à pointer des « manques » dans les manuels, qui pourraient contribuer aux difficultés rencontrées par les étudiants et nous suggérer des directions de « reconstruction didactique ».

Il ne s'agit pas ici d'étudier des « conceptions du sens commun » ou « raisonnements spontanés » à propos de tel ou tel phénomène physique, mais plutôt de repérer, à travers les raisonnements des étudiants, résultant des enseignements habituels, les difficultés, les obstacles possibles à l'acquisition et au bon usage de cette notion. Comme bien souvent dans ce type d'études, il s'agit, dans un premier temps, de repérer des difficultés, des erreurs, qui perdurent après enseignement et de chercher à comprendre ce qui, dans ces « erreurs », peut être dû à l'enseignement et ce qui peut être attribué à des manières de penser préexistant à l'enseignement. Les résultats ainsi obtenus nous serviront ultérieurement pour analyser différentes approches de cette notion (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996), et en élaborer de nouvelles, argumentées non seulement en termes de contenu (« facettes » du concept mises en jeu), mais aussi par rapport aux possibilités et difficultés cognitives des élèves.

2. QUELQUES FACETTES DE LA NOTION DE RÉVERSIBILITÉ/IRRÉVERSIBILITÉ

Il ne s'agit pas ici de refaire une histoire de la thermodynamique, ou plus particulièrement du second principe. Il s'agit plutôt, en nous appuyant sur de tels travaux (Brunhes, 1909 ; Brush, 1976 ; Guedj, 2000 ; Pourprix, 2003) de dégager quelques repères utiles pour l'analyse de l'enseignement de ces notions et des raisonnements des étudiants.

Si le terme de « réversibilité » a été introduit par Thomson (Brush, 1976), cette notion est déjà présente dans les travaux de Carnot (1824), lorsqu'il associe l'optimisation de la « puissance motrice » obtenue au cours d'un cycle à la possibilité d'inverser les différentes opérations constituant ce cycle. Elle acquiert différentes facettes au cours de l'élaboration des deux principes de la thermodynamique. L'une de ces facettes est liée à des essais de caractérisation de transformations de l'énergie en termes de « dégradation » ou de « dissipation », en parallèle avec l'élaboration du premier principe de la thermodynamique. Une autre « facette » de cette notion concerne les évolutions des systèmes associées à ces transformations d'énergie ; la notion d'entropie et le second principe de la thermodynamique constituent des étapes essentielles dans le développement de cette approche. Ces deux approches apparaissent descriptives, que la description concerne des transformations d'énergie ou les évolutions des systèmes concomitantes. La recherche des

causes d'irréversibilité est présente dès les débuts mais il faut attendre le développement de la thermodynamique des phénomènes irréversibles pour voir se formaliser et s'opérationnaliser la prise en compte des causes d'irréversibilité.

Nous présentons par la suite quelques étapes du développement de cette notion, en situant les différentes contributions par rapport aux grandes lignes évoquées dans le paragraphe précédent (figure 1). Dans cette schématisation, nous voulons montrer que l'analyse des causes d'irréversibilité peut constituer un dénominateur commun aux trois points de vue, la dégradation de l'énergie, l'irréversibilité des évolutions des systèmes, la création d'entropie, pouvant s'expliquer par l'existence, la nature, l'importance des phénomènes dissipatifs et les inhomogénéités de grandeurs intensives.

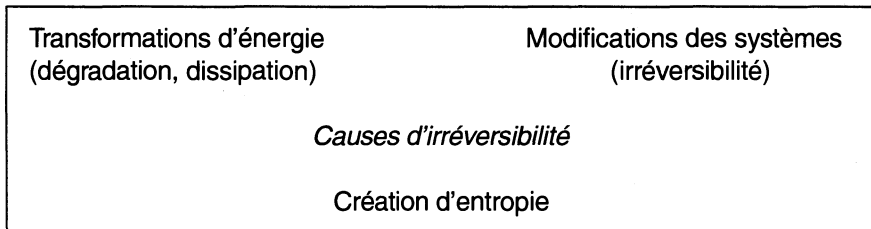


Figure 1 • Différentes « facettes » de la notion d'irréversibilité

2.1. Réversibilité et second principe de la thermodynamique

► CARNOT : optimiser la production de travail à partir de chaleur

Carnot (1824) s'intéresse à « *la question de savoir si la puissance motrice de la chaleur est limitée* » (Carnot, 1824, p. 6), à la valeur de cette limite et aux conditions dans lesquelles cette puissance motrice maximale peut être obtenue « *pour une quantité de calorique donnée, la différence des températures étant également donnée* » (Carnot, 1824, p. 14). Il n'est pas encore question de transformation de chaleur en travail, mais de production de puissance motrice à partir de chaleur ; comme indiqué par M. Guedj : « *Le travail et la chaleur sont considérés comme entretenant des relations du type "cause à effet", pour lesquelles toute transformation de travail en chaleur ou de chaleur en travail est exclue.* » (Guedj, 2000, p. 43).

Les facteurs évoqués par Carnot comme susceptibles de limiter la puissance motrice sont essentiellement les discontinuités de température : « *Cette condition se trouvera remplie si, comme nous l'avons remarqué plus haut, il ne se fait dans les corps aucun changement de température qui ne soit dû à un changement de volume, ou, ce qui est la même chose autrement*

exprimée, s'il n'y a jamais de contact entre des corps de températures sensiblement différentes. » (Carnot, 1824, p. 38).

Il associe cette optimisation de la puissance motrice à la possibilité d'effectuer les mêmes opérations en sens inverse : « *Toutes les opérations ci-dessus décrites peuvent être exécutées dans un sens et dans un ordre inverses.* » (Carnot, 1824, p. 35).

► THOMSON & TAIT : dissipation et dégradation de l'énergie

La contribution de Thomson & Tait (1852) participe très fortement du mouvement « énergétiste », qui constitue l'énergie comme grandeur fondamentale de la physique, et sa conservation comme principe. La question de l'irréversibilité apparaît ici très liée à celle de la dissipation (non-conservation) de l'énergie mécanique, ou de la dégradation (perte de qualité) de l'énergie, qui se conserve : « *La réponse apportée par Thomson à l'incompréhension de la transformation de chaleur en travail réside entièrement dans l'utilisation du terme "wasted", à la place de "annihilated". Ainsi, lors du fonctionnement des machines, de l'effet mécanique n'est pas perdu comme le pense Carnot, il est gaspillé, il devient inutile, impropre au fonctionnement d'une machine* » (Guedj, 2000, p. 170).

Si ces considérations semblent avoir permis à Thomson & Tait de concilier l'idée de « perte » d'effet mécanique avec la conservation de l'énergie, elles n'ont guère connu de développement opératoire. Il nous semble par ailleurs percevoir certaines ambiguïtés dans l'utilisation de ces notions. Ainsi la notion de « dissipation » apparaît-elle initialement appliquée à l'énergie mécanique, elle est ailleurs appliquée de manière plus générale à l'énergie. Dégradation et dissipation sont alors utilisées sans qu'une distinction claire ne soit faite dans l'usage de ces deux termes.

Ce point de vue a donné lieu à des essais de classification de différentes formes d'énergie, « *hautes* » et « *basses* » (Lodge, 1879, cité par Pourprix, 2003, p. 148), « *supérieures* » et « *inférieures* » (Brunhes, 1909). Notons que si la catégorisation de Lodge concerne uniquement les formes de transferts d'énergie, celle de Brunhes porte à la fois sur des formes d'énergie et des formes de transfert, la lumière et chaleur étant considérées par Brunhes comme des formes d'énergie inférieures, l'énergie mécanique, l'énergie potentielle élastique, électrique, chimique étant considérées comme des formes supérieures d'énergie. À cette hiérarchisation des formes d'énergie est associée une catégorisation des transformations en « *naturelles* » et « *artificielles* » ; il faut y ajouter les transformations « *indifférentes* » entre formes d'énergie supérieures (Brunhes, 1909).

Si cette approche en termes de qualité, de dissipation, dégradation, d'énergie, a pu, et peut encore s'avérer utile, pour accepter la conservation de l'énergie malgré son apparente « usure », et si elle a pu apparaître comme

une alternative possible à l'utilisation de la grandeur entropie, jugée « *bien délicate* » (Brunhes, 1909, p. 241), elle ne semble guère avoir ouvert de perspectives fructueuses.

► CLAUDIUS

Les contributions de Clausius (1868) apparaissent multiples : forte distinction entre transformations de l'énergie et modifications des systèmes, interprétation « microscopique » de l'énergie, introduction d'une nouvelle fonction d'état : l'entropie.

Clausius s'intéresse également aux transformations de l'énergie, principalement la transformation de chaleur en travail, et l'inverse. Les modifications de l'Univers associées à cette transformation d'énergie sont évoquées sous les termes de « *changement* » ou de « *modification* ». Ainsi, une transformation d'énergie peut être, ou non, compensée ; les changements ou modifications des systèmes pouvant être réversibles ou non. Il évoque différents phénomènes qui peuvent donner lieu à des transformations d'énergie non compensées : conceptions thermique et électrique. En ce qui concerne l'irréversibilité mécanique, deux aspects sont évoqués, de manière indépendante : les frottements d'une part, les déséquilibres mécaniques d'autre part.

« Les phénomènes qui peuvent donner lieu à des transformations non compensées sont, sinon dans leur essence, au moins dans leur apparence extérieure, d'espèces assez différentes. L'un des plus ordinaires est la transmission de la chaleur par simple conductibilité, qui a lieu au contact de deux corps de températures différentes. Nous mentionnerons en outre la production de chaleur par le frottement, ou par un courant électrique qui doit surmonter la résistance du conducteur, et les phénomènes dans lesquels une force qui effectue un travail n'a pas à vaincre une résistance qui lui soit égale, et produit par suite un mouvement très rapide, perceptible extérieurement, et dont la force vive se transforme en chaleur. » (Clausius, 1868, p. 158).

Un peu plus loin, il revient sur les conditions de la réversibilité, mécanique et thermique, en mettant l'accent sur les discontinuités de température et les déséquilibres mécaniques ; ceci l'amène à situer la réversibilité comme une limite théorique inatteignable : « *Si le changement a lieu de telle sorte que la force et la résistance soient égales, il pourra avoir lieu en sens inverse sous l'action des mêmes forces. Mais si un changement a lieu de telle sorte que la force l'emporte sur la résistance, il ne pourra pas s'effectuer en sens inverse sous l'influence des mêmes forces. Dans le premier cas, nous disons que le changement a lieu d'une manière réversible, dans le second qu'il a lieu d'une manière non réversible. À la rigueur la puissance doit toujours l'emporter sur la résistance ; mais comme l'excès ne doit pas avoir une grandeur déterminée, on peut s'imaginer qu'il devienne de plus en plus petit, de sorte qu'il s'approche autant que l'on voudra de zéro. On voit par là que le cas où*

la modification est réversible est une limite que l'on ne peut pas atteindre complètement, mais dont on peut s'approcher autant que l'on voudra. On peut donc, dans des conditions théoriques, parler de ce cas comme s'il était en effet réalisable, et il joue, comme limite même, un rôle important dans la théorie. » (Clausius, 1868, pp. 262-263).

L'introduction de l'entropie, et, auparavant, de la « valeur d'équivalence » d'une transformation, ouvre la porte à une approche quantitative de l'irréversibilité. Il s'agit de traduire de manière quantitative la « compensation » des transformations d'énergie dans un cycle réversible. Clausius définit la « valeur d'équivalence » d'une transformation de travail en chaleur, et inversement d'une transformation de chaleur en travail « [...] *la production de la quantité de chaleur Q à la température t au moyen de travail aura la valeur d'équivalence Q/T et le passage de la quantité de chaleur Q de la température t₁ à la température t₂ aura la valeur d'équivalence Q (1/T₁ - 1/T₂)* » (Clausius, 1868, p. 148).

En étudiant des cycles réversibles, puis non réversibles, il arrive à ce qui constitue un premier énoncé du second principe « *la somme algébrique de toutes les transformations qui se présentent dans un cycle fermé ne peut être que positive ; à la limite elle peut être nulle. [...] pour tout cycle fermé réversible on aura l'équation $\int \frac{\delta Q}{T} = 0$, et en général pour tout cycle fermé possible la relation $\int \frac{\delta Q}{T} \geq 0$.* » (Clausius, 1868, p. 256).

La « chaleur » est très présente dans ces raisonnements, « chaleur » qui peut exister sous différentes formes, et se transformer. On trouve ainsi la « *quantité de chaleur reçue par le gaz* », la « *chaleur libre* » ou « *chaleur réellement existante dans le corps* » (énergie interne cinétique), la « *chaleur consommée par le travail intérieur* » (variation de l'énergie interne potentielle) et enfin la « *chaleur consommée par le travail extérieur* ».

C'est en raisonnant sur le « travail intérieur » et donc sur l'arrangement des molécules que Clausius introduit de manière d'abord qualitative, le degré de division d'un système, qu'il propose ensuite de caractériser par une grandeur mathématique, la disgrégation, qui est la « *valeur de transformation de l'arrangement actuel des particules du corps* » (composante spatiale de l'entropie).

Il définit par ailleurs « *la valeur de transformation de la chaleur du corps comptée à partir d'un état initial donné* » (composante cinétique de l'entropie).

L'entropie, ou « contenu de transformation du corps », apparaît comme la somme de ces deux termes.

Dans le cas d'une transformation non réversible, la valeur d'équivalence de la transformation non compensée peut s'écrire $N = S - S_0 - \int \frac{\delta Q}{T}$.

La variation d'entropie $S-S_0$ apparaît donc comme la somme de deux termes, un terme $\int \frac{\delta Q}{T}$ lié à l'échange de chaleur (entropie échangée), et un terme N toujours positif (entropie créée).

► DUHEM : la formalisation « cinématique » de la réversibilité et les débuts de la thermodynamique des phénomènes irréversibles

Nous trouvons dans les travaux de Duhem (1911) deux types de contributions à la notion de réversibilité. L'une concerne la formalisation de la notion de réversibilité, propriété de l'évolution d'un système. L'autre marque la prise en compte des phénomènes, causes d'irréversibilité, elle concerne le calcul de la création d'entropie associée à des phénomènes de conduction de la chaleur, de conduction de l'électricité.

S'appuyant sur une description d'une modification d'un système comme une suite d'états de ce système, Duhem définit une « *modification réelle variable d'une manière continue* » dont la limite peut être une suite continue d'états d'équilibre ; sans doute peut-on voir là l'origine de la notion de transformation quasi-statique : « *Une modification réelle, variable d'une manière continue suivant une certaine loi, peut avoir pour forme limite une suite continue d'états d'équilibre du système.* » (Duhem, 1911, p. 308)

Ceci lui permet alors de définir une modification réversible (p. 311).

Il discute alors la différence entre « *suite continue d'états d'équilibre* » et « *modification réversible* » d'un système, montrant que ces deux notions ne sont pas équivalentes pour des systèmes « *affectés de frottement ou d'hystérésis* » (Duhem, 1911, p. 316), frottement et hystérésis étant pris ici au sens large et incluant les phénomènes de déformation permanente (inélasticité par exemple) et l'existence d'états métastables (faux équilibres).

Notons la distinction entre transformations réelles et transformations limites, les notions de « *suite continue d'états d'équilibre* » et de « *modification réversible* » ne s'appliquant qu'à des transformations fictives.

2.2. Au-delà du second principe : premiers pas de la thermodynamique des phénomènes irréversibles

Les travaux de Duhem relatifs à la production d'entropie liée à des phénomènes de transport (Duhem, 1911), ceux de Gibbs (1899) et De Donder & Van Rysselberghe (1936) concernant la création d'entropie au cours de réactions chimiques, ont conduit à exprimer la production d'entropie liée à des processus irréversibles « *comme une somme de produits de forces généralisées (ou affinités) par les vitesses correspondantes (ou « flux »*

généralisés) des processus irréversibles » (Prigogine, 1968, p. 43), les « forces » pouvant être considérées comme les causes des flux traduisant les phénomènes irréversibles. Ces grandeurs, flux et forces, sont des grandeurs phénoménologiques, non déductibles d'une théorie générale, et ne sont pas définies de manière univoque. En l'absence de réaction chimique, les forces sont fonction des dérivées spatiales des champs de grandeurs intensives (température dans le cas de la conduction thermique, tension électrique dans le cas de la conduction électrique, pression, densité de particules dans le cas de la diffusion, vitesses pour la viscosité). Dans le cas par exemple de la production d'entropie associée à la conduction de la chaleur, on prend en général comme « force » le gradient de température, qui peut être considéré comme la cause du « flux » de chaleur. Dans le cas d'une réaction chimique, la « force » est $\frac{A}{T}$ (A : affinité chimique), le « flux » est la vitesse de réaction.

Notons que si le système n'est le siège d'aucun phénomène « dissipatif » par rapport à la perturbation qui lui est imposée, il ne peut revenir à l'équilibre et oscillera indéfiniment (pendule sans frottement, boucle supraconductrice, par exemple). Si l'expression du flux en fonction du gradient ne comporte pas de terme constant, on peut réduire l'entropie créée et la faire tendre vers zéro en « décomposant » la transformation en transformations élémentaires (transformation quasi-statique) ; si l'expression du flux en fonction du gradient comporte un terme constant, il s'agit d'un phénomène « à seuil » (frottement solide par exemple), on ne peut réduire l'entropie créée autant que l'on veut, on ne peut « tendre vers » la réversibilité (Latour, 1997).

Notons également que cette approche des phénomènes irréversibles suppose que les grandeurs évoquées puissent être définies au cours de la transformation, au moins localement.

2.3. Pour conclure

On voit donc, à partir des premières réflexions de Carnot sur l'optimisation de la « *puissance motrice du feu* », se différencier progressivement plusieurs points de vue :

- un point de vue en termes de transformation d'énergie, qui conduit aux idées de qualité d'énergie, de dissipation, et de dégradation ;
- un point de vue « cinématique », qui s'intéresse à la caractérisation des évolutions des systèmes et conduit à définir précisément les transformations limites « suites continues d'états d'équilibre » et les transformations réversibles ;
- une approche en termes de production d'entropie, qui conduit à prendre en compte les « causes » de l'irréversibilité : forces généralisées (affinité chimique d'un système, gradients des grandeurs intensives) d'une part, processus dissipatifs d'autre part (diffusion, conduction électrique, thermique,

frottements, viscosité, réactions chimiques, etc.) et à une formalisation mathématique des « effets » de ces différentes causes d'irréversibilité.

De ces différents points de vue, nous allons voir lesquels sont privilégiés dans les ouvrages de premier cycle de l'enseignement supérieur actuel en France.

3. LA RÉVERSIBILITÉ DANS LES MANUELS D'ENSEIGNEMENT

Nous avons étudié des manuels récents (parus depuis moins de dix ans) concernant l'enseignement de la thermodynamique physique en DEUG et classes préparatoires scientifiques (première et deuxième année de l'enseignement supérieur) sachant que la plupart de ces ouvrages s'adresse indifféremment à ces deux populations d'étudiants.

Nous avons repéré la première apparition des termes réversible/irréversible, les définitions qui en étaient données et cherché à les situer par rapport aux différentes facettes de cette notion présentées par la figure 1.

Nous avons constaté que l'approche « cinématique » occupe une place importante, et est en général utilisée pour introduire, et définir, la notion de réversibilité ; l'énoncé du second principe, qui établit un lien entre réversibilité et variation d'entropie, vient plus tard. La recherche des « causes d'irréversibilité » est inégalement développée.

3. 1. Points de vue « cinématiques »

Parmi les quatorze ouvrages analysés, sept donnent une place importante à la notion de transformation quasi-statique, le caractère quasi-statique étant une condition nécessaire (non suffisante) pour qu'une transformation soit réversible. Pour qu'une transformation quasi-statique soit réversible, il faut y ajouter d'autres conditions, dont l'expression diffère légèrement selon les auteurs :

- « *Lorsque l'évolution est quasi-statique, il est parfois possible a priori de revenir de l'état final à l'état initial par les mêmes étapes intermédiaires : une telle évolution quasi-statique est alors réversible* » (Faverjon, 2003, p.72) ;
- « *Une transformation quasi-statique est réversible si on peut la décrire dans un sens ou dans l'autre en changeant le signe de la cause extérieure infiniment petite qui pilote son évolution* » (Lhuillier & Rous, 1998, p. 118).

Les autres ouvrages ne font pas usage de la notion de transformation quasi-statique pour définir la réversibilité. Ainsi trois ouvrages définissent-ils une transformation réversible comme une suite continue d'états d'équilibre thermodynamique :

- « *C'est une transformation qui se fait par une suite continue d'états d'équilibre, la condition d'équilibre concernant aussi bien le système étudié que le milieu extérieur avec lequel il interagit* » (Faroux & Renault, 1997, p. 15) ;
- « *Transformation réversible : qui passe par une succession d'un nombre infini d'états d'équilibre avec l'extérieur* » (Le Rille, 2001, p. 3).

La définition proposée par Brébec (1996) renvoie aux équations d'évolution du système : « *Les transformations réelles spontanées d'un système isolé ont un sens d'évolution qui correspond au sens d'écoulement du temps. Leurs équations d'évolution ne sont pas invariantes par changement de ce sens d'écoulement.*

De telles transformations sont dites irréversibles.

Lorsque les équations sont invariantes par changement du sens d'écoulement du temps, les évolutions correspondantes sont dites réversibles. » (Brébec, 1996, p. 149).

Cette définition est reformulée en faisant davantage appel à l'intuition et au sens commun « *le film projeté à l'endroit est identique au film projeté à l'envers* ». (Brébec, 1996, p. 149).

Trois ouvrages s'appuient sur la variation d'entropie pour définir la réversibilité.

3.2. Entropie et second principe

La notion de réversibilité apparaît dans tous les ouvrages dans le chapitre consacré à l'énoncé du second principe, qui est exprimé en termes de variation d'entropie. La formulation du second principe apparaît dans la plupart des ouvrages (11/14) après définition de la réversibilité : « *L'entropie d'un système isolé, évoluant de manière irréversible, croît jusqu'à l'établissement d'un état d'équilibre. Si cette évolution est réversible, l'entropie de ce système reste constante.* » (Brébec, 1996, p. 150).

Dans trois ouvrages, c'est la variation d'entropie qui permet au contraire la caractérisation d'une transformation comme réversible ou irréversible : « *L'égalité $S_c = 0$ correspond à des transformations limites dites réversibles, pour lesquelles le sens de l'écoulement du temps n'a aucune influence* » (Pérez, 2001, p. 104)

3.3. Causes d'irréversibilité

L'idée de gradients, de non-uniformité des grandeurs intensives, peut être considérée comme sous jacente aux notions de transformation quasi-statique et à la distinction entre transformation quasi-statique et transformation réversible (équilibre interne, équilibre du système avec l'extérieur). On retrouve cette même idée dans l'analyse des causes d'irréversibilité qui apparaît dans certains ouvrages.

Cinq ouvrages ne développent pas cette question ; les autres évoquent, de manière plus ou moins structurée, quelques phénomènes dissipatifs, sans discuter la possibilité, ou non, suivant la nature des phénomènes dissipatifs intervenant dans le fonctionnement du système, de réduire l'irréversibilité en réduisant les gradients des grandeurs intensives. Phénomènes dissipatifs et gradients apparaissent comme des facteurs d'irréversibilité indépendants.

« Il existe plusieurs causes d'irréversibilité :

- tout d'abord les frottements d'un système mécanique qui "consomment" de l'énergie mécanique transformée en chaleur,

- ensuite, la non uniformité des grandeurs intensives dans le système, comme la pression pour la détente de Joule ou la température lorsque l'on met en contact deux corps à des températures initialement différentes. » (Lorenceau & Restagno, 2003, p. 45).

3.4. Discussion

Ainsi les manuels privilégient-ils une définition de la réversibilité comme caractérisant l'évolution d'un système. Cette approche, que nous avons appelée « cinématique », peut se révéler difficile à mettre en oeuvre. Comment savoir si l'évolution d'un système est réversible ? Les équations d'évolution du système sont rarement connues. La démarche la plus fréquemment proposée aux étudiants consiste à utiliser la notion de transformation quasi-statique. Mais comment savoir si une transformation peut être considérée comme quasi-statique ? Et comment savoir si une transformation peut être inversée ? Cela demande en fait de connaître les phénomènes dissipatifs susceptibles de se produire au sein du système.

4. REPRÉSENTATIONS DES ÉTUDIANTS

L'analyse des manuels d'enseignement donne à penser que l'enseignement usuel privilégie une approche « cinématique » de la notion de réversibilité, au détriment d'une étude structurée des causes possibles d'irréversibilité. Il nous a semblé intéressant d'étudier les effets de cet enseignement en termes de « représentations » que les étudiants ont pu construire de cette notion de réversibilité. Nous empruntons cette notion de représentation à la psychologie sociale (Schiele, 1976). L'enseignement universitaire fonctionnant à ce jour sur un mode plutôt transmissif que constructiviste, il s'agit d'étudier comment une notion scientifique peut être assimilée par les étudiants, compte tenu des formes de pensée disponibles. Il ne s'agit pas ici d'établir des liens de causalité entre l'usage de tel ou tel ouvrage et un type d'erreur donné, mais plus modestement de repérer des difficultés qui

perdurent après enseignement et de chercher à comprendre ce qui, dans ces « erreurs », peut être mis en relation avec des tendances générales de l'enseignement repérées par l'analyse des manuels et ce qui peut être attribué à des formes de pensée préexistant à l'enseignement.

Ceci apportera des informations utiles à des essais de « reconstruction didactique » concernant l'enseignement de cette notion, en nous permettant d'apprécier les points d'ancrage possibles d'une démarche de construction de cette notion, et le chemin à parcourir.

4.1. Méthodologie de l'étude de représentations

Afin de répondre à ces questions, nous avons d'abord réalisé dix entretiens auprès d'étudiants ayant au moins un niveau licence en physique.

Le protocole d'entretien (annexe 1) comporte une demande de définitions et d'exemples de transformations réversibles ou irréversibles. On demande ensuite aux étudiants de caractériser des transformations présentant des caractéristiques variées, et d'argumenter leurs réponses. En proposant différents types de transformations, on cherche à voir quelles caractéristiques les étudiants prennent en considération pour décider de la réversibilité d'une transformation. Sont proposées :

- deux transformations dans lesquelles un système revient à son état initial, sans que l'environnement n'y revienne (T1 et T3),
- deux transformations dans lesquelles les inhomogénéités de variables intensives (pression ou température) sont faibles (T2 et T4),
- deux transformations dans lesquelles cette inhomogénéité est grande, et les phénomènes dissipatifs importants (T5 et T6).

À partir des résultats obtenus, des questions ont été mises au point et réparties en trois questionnaires. Ces questionnaires ont été proposés à des étudiants préparant un CAPES de physique-chimie dans différents IUFM, avant les « révisions » de thermodynamique. Les résultats obtenus apportent donc des informations sur les difficultés qui persistent après enseignement en DEUG et licence. Ces questionnaires comportaient différentes questions, très proches de celles utilisées dans les entretiens. Nous présenterons ici les résultats de l'analyse des réponses des étudiants à trois de ces questions. Ces questions concernent des transformations dues à des discontinuités de pression :

- un cycle irréversible (retour à l'état initial d'un système sans que l'environnement n'y revienne) (T3),
- une transformation pour laquelle les inhomogénéités de pression sont faibles (T2),
- une transformation dans laquelle les phénomènes dissipatifs sont importants (T6).

4.2. Résultats des entretiens

Il s'agit donc d'étudier les facettes de la notion de réversibilité mobilisées par les étudiants pour caractériser différentes transformations. La méthode d'analyse relève d'une analyse thématique classique (voir par exemple Bardin, 1993 ; Guilbert & Meloche, 1993). Les propos des étudiants sont découpés en « unités de signification », que l'on regroupe ensuite en catégories. Ces catégories résultent de la confrontation des propos des étudiants à l'analyse présentée au §2. Il s'agit en effet d'analyser quelles sont les « facettes » de la notion de réversibilité disponibles chez les étudiants après enseignement de cette notion. Les étudiants privilégient-ils certaines de ces facettes ? Certaines questions les conduisent-ils à mobiliser préférentiellement l'une ou l'autre de ces facettes ? C'est à ces questions que nous essaierons de répondre.

Comme nous le verrons, certaines facettes de la notion de réversibilité sont absentes, ou presque, des réponses des étudiants ; d'autres sont beaucoup plus fréquentes, sous des formes diverses. Nous présentons dans un premier temps les « facettes » de la notion de réversibilité qui émergent de cette analyse, en les situant par rapport à celles issues des analyses déjà présentées. Nous présentons ensuite les profils de réponses des étudiants. Nous discutons enfin les liens entre les questions et les facettes du concept mobilisées.

4.2.1. Les catégories d'analyse des propos des étudiants

4.2.1.1. Les facettes « cinématiques »

En confrontant les propos tenus par les étudiants aux résultats des analyses précédentes, on constate que les étudiants ne raisonnent pas en termes de transformations d'énergie, mais plutôt en termes d'évolution des systèmes ; l'approche « cinématique » est fortement prépondérante (catégories A, B, C, D).

A - Possibilité du retour à l'état initial ou « restaurabilité »

Un argument très fréquemment utilisé (40 occurrences) concerne la possibilité de retour à l'état initial. Il est utilisé par neuf étudiants sur les dix interviewés ; un seul n'y fait jamais appel.

Pour certains étudiants, ce retour à l'état initial doit de plus pouvoir être effectué « sans action extérieure », « sans apport d'énergie » : « *Parce que sinon sans action extérieure on peut pas rétablir une température de vingt degrés et de quatre-vingt degrés* » (E1-T5).

À quoi s'applique cette possibilité du retour à l'état initial ? S'agit-il de l'Univers ou seulement d'une partie, « le système » ? Ce n'est en général

pas précisé : « *Une transformation réversible c'est que on part d'un état initial à un état final et on peut revenir de l'état final à l'état initial.* » (E4-Def).

Dans certains cas, néanmoins, il est clair qu'il s'agit du retour d'un système à son état initial, sans prise en compte de l'environnement : « *À long terme c'est réversible ; le cube va reprendre une température de vingt degrés Celsius.* » (E1-T1).

On trouve là une confusion assez répandue chez les étudiants entre cyclique et réversible : « *Dans le fonctionnement du piston d'un moteur on a toujours les mêmes états qui reviennent ; pour moi cela veut dire que c'est réversible.* » (E1-Def).

Un seul étudiant évoque une modification de la source pour justifier l'irréversibilité : « *On pourra plus négliger la différence de température du bain par rapport à la première expérience* » (E9-T1)

B - Renversabilité de la transformation

Les arguments en termes de « renversabilité », de possibilité d'inverser la transformation, de retour à l'état initial « par le même chemin » (15 occurrences) apparaissent de manière moins fréquente que les précédents. Huit étudiants sur les dix interviewés y font néanmoins appel, mais de manière plus occasionnelle. Les formulations restent assez vagues :

- « *C'est quelque chose qui, s'il le veut, peut revenir en arrière.* » (E7-Def) ;
- « *On peut faire marche arrière dans l'évolution du système.* » (E3-Def).

C - Suite d'états

Nous avons classé ici les arguments dans lesquels il est question de « succession d'états », sans qu'il s'agisse nécessairement d'une définition très précise d'une transformation quasi-statique. Ce type d'arguments (20 occurrences) est utilisé par sept étudiants sur les dix :

- « *Il y a une continuité dans les états donc par lesquels passe le système pour aller d'un état 1 à un état 2.* » (E3-T2) ;
- « *Ça se rapproche plus d'une transformation réversible puisqu'on passe par des états successifs.* » (E3-T5) ;
- « *Si on ouvre le robinet un tout petit peu moins qu'une seconde on a toujours une suite d'états d'équilibre.* » (E8-T2).

D - Lente = réversible ; rapide = irréversible

Un argument également très fréquent (25 occurrences) est celui de la vitesse/lenteur de la transformation ; ce type d'arguments apparaît chez huit étudiants.

Une transformation « lente » serait réversible, une transformation « rapide » serait irréversible :

- « *On m'a toujours dit que quand la transformation était lente elle était réversible.* » (E1-T5) ;
- « *Là je verrais bien réversible parce que cela va se faire relativement lentement.* » (E5-T4).

4.2.1.2. Production d'entropie

L'approche en termes de production d'entropie apparaît de manière moins importante (catégorie E).

L'entropie apparaît parfois (8 occurrences), de manière un peu incantatoire, sans grande justification. Il est vrai que les étudiants ne sont guère en situation de développer les calculs qui leur fourniraient des arguments plus précis :

- « *Donc quand ΔS est positif ça veut dire qu'il y a une augmentation du désordre moléculaire, et donc pour moi cela veut dire que la réaction est irréversible.* » (E1-T3) ;
- « *C'est dû à l'entropie en fait parce qu'il y a une entropie qui est créée [...] à cause de la rapidité du phénomène.* » (E9-Def).

Quatre étudiants y font appel. Un seul l'utilise pour plusieurs situations.

4.2.1.3. Causes d'irréversibilité : gradients et phénomènes dissipatifs

Un seul étudiant raisonne en termes de gradients et de phénomènes dissipatifs (catégories F et G) : « *Peut-être que là dans la mesure où on n'a peut-être pas des grosses différences de températures [...] peut-être c'est plus facile d'imaginer quelque chose de réversible.* » (E5-T4).

Cet étudiant évoque les frottements pour répondre sur la réversibilité d'une transformation : « *Il y a des frottements [...] Pour moi les frottements c'est aussi une cause d'irréversibilité d'une transformation.* » (E5-T6).

De telles considérations n'apparaissent chez aucun autre étudiant interviewé. Il semble que la question de l'existence, de l'importance, des phénomènes dissipatifs soit largement ignorée.

4.2.1.4. Autres catégories de réponses

H - Naturelle-spontanée/contrôlée

Un étudiant (quatre occurrences) argumente à plusieurs reprises en opposant transformation « naturelle, spontanée » à transformation « contrôlée » :

- « *La réaction réversible n'est pas naturelle ; elle ne se fait pas spontanément.* » (E8-Def) ;
- « *Dans ma définition une transformation irréversible c'est une transformation naturelle spontanée, et ça enfin pour réaliser celle-là il faut une action extérieure.* » (E8-T3).

I - Pas d'échanges avec l'extérieur

On voit apparaître ici un argument inattendu (huit occurrences) ; quatre étudiants y font appel : « *Y'a pas d'échanges vis à vis de l'extérieur, pour moi elle est réversible.* » (E8-T1).

J - La réversibilité n'existe pas

Un dernier type d'arguments apparaît chez quatre étudiants (5 occurrences), argument fort sensé, que nous avons évoqué dans l'analyse de contenu, à savoir que la réversibilité n'existe pas :

- « *Ben voilà justement c'est le problème pour moi les transformations réversibles ça n'existe pas.* » (E3-T4) ;
- « *Alors on va dire que les transformations réversibles n'existent pas, donc c'est toujours irréversible.* » (E5-T4).

4.2.2. Synthèse des résultats

Le tableau suivant (tableau 2) présente les résultats de l'analyse des arguments utilisés par les étudiants interviewés pour répondre de la réversibilité ou de l'irréversibilité des transformations qui leur sont proposées.

Pour chaque étape de l'entretien : demande de définition (Déf.), demande d'exemples (Ex.), demande de caractérisation d'une transformation (T1 à T6), nous indiquons les arguments utilisés par les étudiants pour caractériser une transformation comme réversible, ou irréversible. Il s'agit de repérer si certains étudiants font appel de manière préférentielle à certaines facettes du concept de réversibilité, si certaines questions suscitent spécifiquement l'utilisation de certaines facettes. Si le même type d'arguments apparaît de manière répétitive à propos d'une même situation, nous ne le comptons qu'une fois.

	Déf.	Ex.	T1	T2	T3	T4	T5	T6
E1	A	AEJ	A	D	D	A	A D	AD
E2	B	D	A	D	DE	AE	A	?
E3	A	D	I	BCDE	I	AJ	BCI	IJ
E4	A	A	A	A	ACD	A	AI	A
E5	C	BCD	BD	CD	D	DJF	CD	CDG
E6	BC		A	C	ACI	A	A	B
E7	BJ	ABCD	I	D	D	A	AI	AD
E8	CH	B	BC	BC	BCH	CDH	A	CH
E9		ABCDE	AF	CD	BCE	AE	A	ACDE
E10	B	A	A	A	A		A	B

Tableau 1 • **Catégories d'arguments mobilisés par les étudiants pour répondre sur la réversibilité d'une transformation** (les deux cases vides correspondent à des questions non posées, le « ? » à une réponse non argumentée par l'étudiant)

Nous retrouvons dans ce tableau la prépondérance des catégories correspondant à une approche « cinématique ».

On la trouve principalement sous une forme réduite au « retour possible du système à l'état initial » (catégorie A), éventuellement assortie de conditions « sans action extérieure » ou « sans échanges avec l'extérieur »... Ce type d'argument traduit une confusion entre transformation réversible et cycle.

D'autres formes apparaissent également de manière significative : vitesse de la transformation (catégorie D), suite d'états d'équilibres (catégorie C), renversabilité (catégorie B).

En ce qui concerne les gradients de grandeurs intensives (catégorie F), il semble qu'à ce type de considérations se soient substituées des considérations du type « quasi-statique, suite d'états d'équilibre, lent/rapide ». L'existence de phénomènes dissipatifs (catégorie G) est très peu évoquée.

Si on analyse les réponses, question par question, on constate que la majorité des étudiants (7/10) caractérisent de manière correcte la dernière transformation (T6) comme irréversible, l'argument répandu (mais insuffisant en général) en termes de possibilité/impossibilité de retour du système à l'état initial (catégorie A) conduisant ici à une réponse correcte. Ce même argument conduit à des réponses incorrectes pour les transformations T1 et T4 : cinq considèrent T1 comme réversible « *car le cube revient à son état initial* », sept considèrent T4 comme irréversible « *car on ne peut pas reconstituer le glaçon* ». L'expérience de Clément-Desormes (T2) est considérée comme irréversible (8/10) du fait de la « *rapidité* » de l'ouverture de la soupape (catégorie D). Les transformations T3 et T5 donnent lieu à des réponses plus mélangées, faisant intervenir deux arguments contradictoires : la possibilité du retour à l'état initial (catégorie A) et le caractère quasi-statique ou non (catégorie C).

Les critères qu'ils utilisent étant partiels, approximatifs, les étudiants peuvent se trouver pris dans des contradictions.

Ainsi, par exemple, l'étudiant E1, à propos de la transformation T6 (détente à travers un bouchon poreux), se trouve dans une contradiction lorsque, utilisant un argument de type « lenteur de la transformation », il conclut à la réversibilité de la transformation et, utilisant un argument de type « retour à l'état initial sans action extérieure », il arrive à une conclusion opposée : « *On m'a toujours dit en cours que quand la transformation était lente elle était réversible, mais je vois pas comment elle pourrait être réversible une fois qu'on a la même pression dans les deux compartiments ; il faut une action extérieure pour renverser la situation.* » (E1-T6).

L'étudiant E8 se trouve pris à plusieurs reprises dans une contradiction entre deux de ses arguments, un argument de type « suite d'états

d'équilibre » et un argument de type « une transformation naturelle est irréversible » :

- « *J pense qu'on aura une suite d'états d'équilibre [...] en fait j'ai des arguments pour et contre à chaque fois oui mais en fait c'est la transformation naturelle de si on réchauffe un glaçon il se transforme en eau.* » (E8-T4) ;

- « *Si l bouchon laisse passer lentement on peut considérer qu'il y a des états d'équilibre entre deux, qu'en fait c'est encore contradictoire [...] parce que c'est la réaction naturelle.* » (E8-T6).

4.3. Résultats des questionnaires

Nous présentons ici les réponses à trois questions concernant des transformations faisant intervenir la pression. Ces questions reprennent les transformations T2, T3 et T6 étudiées en entretien.

4.3.1 Cycle irréversible

Cette question concerne la transformation T3 étudiée en entretien. La situation proposée (figure 2) comporte un gaz placé dans un récipient fermé par un piston (I). Les parois du récipient ne sont pas isolantes, c'est-à-dire qu'à la fin de la transformation, le gaz est à la température ambiante. Une masse M est placée sur le piston. Il apparaît alors une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur, le gaz subit une compression. Après avoir oscillé, le piston s'arrête à sa position d'équilibre (II) en raison des forces de frottement et de la viscosité du gaz. Si on enlève la masse M , apparaît à nouveau une différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur. Le piston remonte, oscille et s'arrête à la position d'équilibre. Le gaz retrouve son état initial (III).

N=44

Soit un récipient fermé par un piston mobile horizontal de masse négligeable, de surface 10 cm^2 . Le récipient contient un gaz parfait. Les parois laissent passer la chaleur. Dans l'état initial (situation I), le gaz est à la température T_0 identique à la température extérieure. Le piston est à l'équilibre.

On place une masse $M=1\text{kg}$ sur le piston. Le piston se déplace jusqu'à ce qu'il atteigne une position d'équilibre où la température est à nouveau T_0 (situation II).

On enlève la masse M . Le piston revient à la position initiale et le gaz est à la température T_0 (situation III).

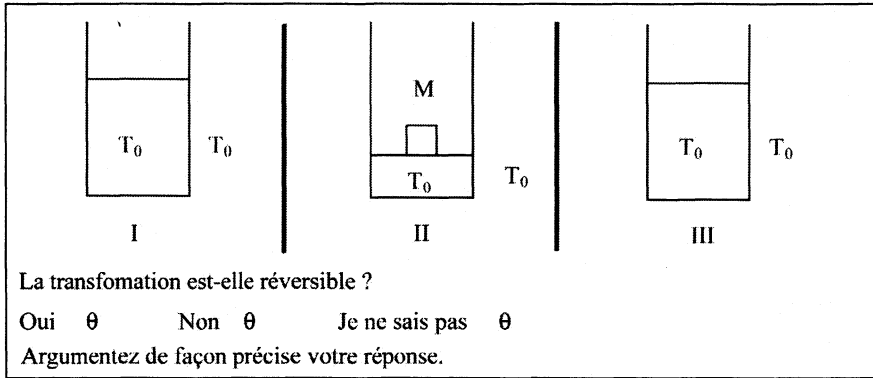


Figure 2 • Transformation due à une discontinuité de pression avec retour du système à l'état initial

La transformation est irréversible puisqu'elle comporte deux transformations successives produites par des différences de pression importantes entre la pression extérieure et la pression du gaz enfermé dans le récipient fermé par un piston. La question est posée pour tester si les étudiants se centrent sur le gaz dans leur analyse et concluent à la réversibilité de la transformation ou s'ils peuvent prendre en compte l'environnement qui a changé entre la situation I et la situation III. En effet, comme le montre la figure 3, dans la situation II, la masse M se trouve au niveau de la position d'équilibre du piston, correspondant à l'égalité des pressions extérieure et intérieure. Pour que le piston remonte, on enlève M qui se trouve dans la position basse. Les situations I et III ne sont donc pas identiques. L'énergie potentielle de la masse M dans la situation I a été transformée en énergie interne de l'environnement en raison de la viscosité du gaz et des frottements. On pourrait dire qu'il y a eu dissipation de l'énergie mécanique.

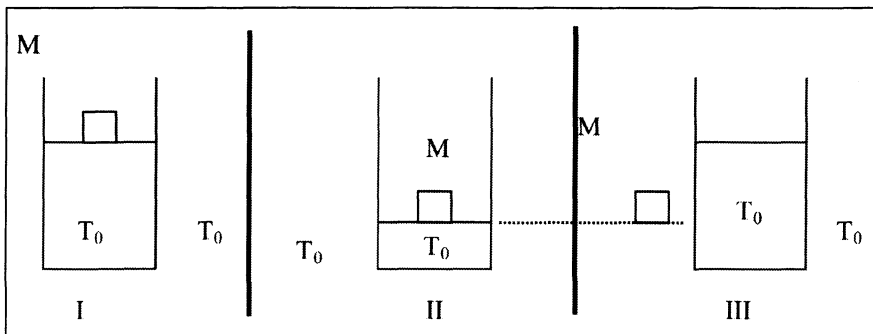


Figure 3 • Différence entre la situation I et la situation III

Une moitié (48 %) des étudiants répond, à juste titre, que cette transformation est irréversible. Les principaux arguments sont que la transformation ne peut être considérée comme une suite d'états d'équilibre (catégorie C, 34 %) et/ou qu'elle est brutale (catégorie D, 21 %) : « *Si la masse est posée brutalement, la transformation ne passera pas par une série d'états d'équilibre, il n'y aura donc pas réversibilité* » ; « *La transformation est rapide (passage « brutal » de l'état d'équilibre I à l'état d'équilibre II) dans les deux cas (II-III). La transformation est donc irréversible* ».

Par contre, environ une autre moitié des étudiants (45 %) répond de manière incorrecte que la transformation est réversible, l'argument principal (39 %) étant le retour à l'état initial du piston, du gaz, ou plus vaguement du système (catégorie A) :

- « *Le système retrouve à la fin le même état qu'au départ* » ;
- « *On retrouve l'état initial du gaz* » ;
- « *Le piston reprend sa position initiale avec les mêmes conditions, c'est donc une transformation réversible* » ;
- « *Une fois la masse retirée du piston, le piston reprend sa position initiale et le système retrouve sa pression et sa température initiales* ».

Aucun étudiant ne prend en compte le changement de position de la masse M et aucun ne fait intervenir les phénomènes dissipatifs dans l'analyse alors que le piston s'arrête à la position d'équilibre en raison des frottements solides et de la viscosité du gaz.

18 % répondent qu'ils ne savent pas ou ne répondent pas.

4.3.2. Transformation due à une discontinuité de pression avec des phénomènes dissipatifs importants

Cette question concerne la transformation T6 étudiée en entretien. La situation proposée (figure 4) est la situation couramment étudiée d'une détente irréversible de Joule Thomson. Un tuyau est séparé en deux par un bouchon poreux qui laisse diffuser du gaz de 1 vers 2, la pression P_1 étant supérieure à la pression P_2 . Il est précisé dans la question que la diffusion s'opère de façon très lente afin de tester si les étudiants utilisent ce critère et concluent de façon erronée que la transformation est réversible ou s'ils reconnaissent l'irréversibilité de la transformation et, dans ce cas, quels arguments ils utilisent ?

N=44

Un tuyau est séparé en deux par un bouchon poreux qui laisse diffuser du gaz de façon très lente. La pression d'un côté du tuyau est $P_1 = 2 \text{ atm}$, de l'autre à $P_2 = 1 \text{ atm}$. La température est identique des deux côtés. Cette détente est-elle réversible ?

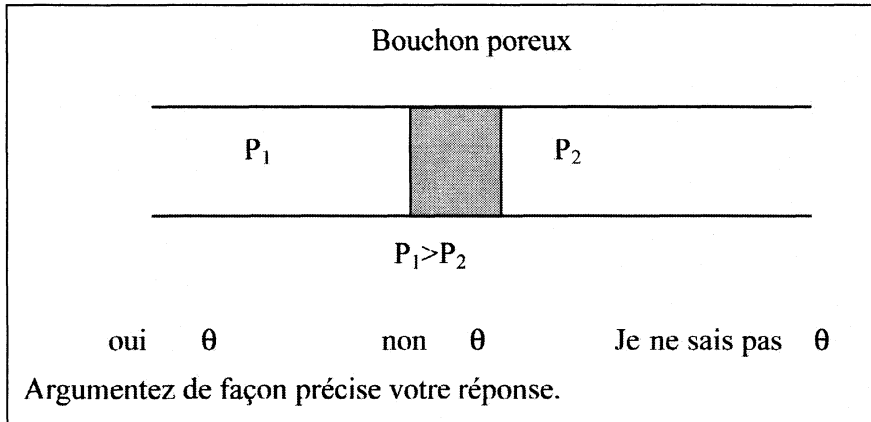


Figure 4 • Transformation due à une discontinuité de pression avec phénomènes dissipatifs importants

45 % des étudiants répondent de manière erronée que la transformation est réversible, les arguments majoritaires étant (D) la lenteur de la transformation (32 %) et/ou (C) la décomposition de la transformation en une suite d'états d'équilibre (23 %) :

- « Car le bouchon poreux laisse diffuser du gaz de façon très lente . Si la diffusion était rapide nous aurions eu une transformation irréversible » ;
- « Comme elle est très lente, on peut définir à chaque instant P et $T \Rightarrow$ succession d'états d'équilibre, \Rightarrow donc elle est quasi-statique et inversable, donc elle est réversible ».

Or, dans le cas de la détente de Joule-Thomson, la transformation ne peut être considérée comme une suite d'états d'équilibre en raison du flux de matière induit par la différence de pression de part et d'autre du bouchon.

39 % des étudiants répondent correctement que la transformation est irréversible. Les arguments sont très dispersés. L'argument majoritaire (9 %) est que le retour à l'état initial n'est pas possible :

- « Pour être réversible, il faudrait que les particules dans le compartiment 2 reviennent dans le compartiment 1. Statistiquement possible mais de trop faible probabilité » ;
- « Sans action extérieure, le système constitué par les deux gaz ne peut pas évoluer en sens inverse ».

Seuls deux étudiants soulignent la différence de pression entre les deux compartiments : « Les transformations réversibles se faisant pour de petites variations de P à $P+dP$ ».

16 % répondent qu'ils ne savent pas ou ne répondent pas.

4. 3.3. Transformation due à une faible discontinuité de pression

La question (figure 5) concerne la transformation T2 de l'entretien. Il s'agit de l'expérience de Clément-Desormes où une surpression faible (1 % par rapport à la pression atmosphérique) est créée en introduisant de l'air dans un récipient et en s'intéressant à la détente produite quand on met le récipient en contact avec l'atmosphère extérieure pendant un court instant à l'aide d'une soupape.

N=67

On dispose d'un récipient de volume 20L, contenant de l'air assimilé à un gaz parfait. La température est la température ambiante ($t = 20^{\circ}\text{C}$). Le récipient est muni d'un tube en U contenant de l'eau. L'air est à la pression P_1 telle que la différence de niveau d'eau dans les deux tubes soit $h = 10\text{ cm}$. Le récipient peut être mis en contact avec l'atmosphère extérieure par l'intermédiaire d'une soupape qui permet l'entrée ou la sortie d'air. On soulève la soupape que l'on lâche le plus rapidement possible. La pression dans le récipient devient alors la pression atmosphérique $P_{\text{atm}} = 1\text{ atm}$

La transformation réalisée est-elle réversible ?

oui θ non θ Je ne sais pas θ

Argumentez de façon précise votre réponse

Figure 5 • Transformation due à une faible discontinuité de pression

La surpression étant faible, il est possible de considérer que la transformation est proche d'une transformation réversible sans qu'elle soit rigoureusement réversible. Les deux réponses, transformation réversible ou transformation irréversible, peuvent donc être acceptées comme correctes.

La réponse quasi-unanime (84 %) est l'irréversibilité de la transformation. L'argument majoritaire (D) est la brutalité ou la rapidité de la transformation (63 %). Ce résultat n'est sans doute pas indépendant du fait que, dans la formulation de la question, il est précisé qu'on lâche rapidement la soupape. Cette précision est apportée pour que l'étudiant en déduise que l'échange thermique est très faible et que l'on peut considérer la détente comme adiabatique. Un certain nombre d'étudiants associe automatiquement le mot « rapide » à l'irréversibilité de la transformation :

- « Elle est irréversible car on lâche le plus rapidement possible la soupape » ;
- « La soupape est soulevée de façon très rapide, donc l'air dans le récipient passe rapidement de P_1 à P_{atm} » ;

alors que la rapidité du changement de pression est liée à la faible différence des pressions entre le récipient et l'atmosphère.

27 % des arguments concernent l'impossibilité de retrouver l'état initial (catégorie A) : « Si on réouvre la soupape, il est impossible que la pression à l'intérieur du récipient redevienne supérieure à P_1 . »

36 % des étudiants considèrent que la transformation n'est pas une suite d'états d'équilibre (catégorie C) alors que la différence de pression est faible : « Si on avait fait varier la pression par palier en laissant à chaque instant le système revenir à un état d'équilibre, la transformation aurait été réversible ».

Les étudiants qui répondent que la transformation est réversible (12 %) reconnaissent l'expérience de Clément-Desormes, mais donnent une justification inexacte, ou ne donnent aucune justification.

4.3.4. Synthèse des résultats

Le tableau 3 présente la fréquence des différents types d'arguments utilisés par les étudiants pour caractériser chacune de ces transformations. Trois catégories d'arguments apparaissent de manière importante en réponse à ces différentes questions, même si leur pondération dépend des questions. Il s'agit des catégories A, C et D. La transformation T3 se révèle particulièrement favorable aux arguments de type A (retour du système à l'état initial), la transformation T2 aux arguments de type D. Les arguments de type C sont plus également répartis. La catégorie B est moins utilisée. Les autres types d'arguments (faisant intervenir l'entropie, les phénomènes dissipatifs, etc.) apparaissent de manière négligeable.

	T3	T6	T2
A en %	41	9	27
B en %	7	2	12
C en %	41	23	39
D en %	21	36	63

Tableau 2 • Principales catégories d'arguments utilisées par les étudiants pour caractériser des transformations

5. CONCLUSIONS

L'analyse de manuels d'enseignement universitaire, et un retour sur le développement de la notion de réversibilité, nous ont montré que l'enseignement privilégie une approche « cinématique » de cette notion, au détri-

ment de l'analyse des « causes » possibles d'irréversibilité, phénomènes dissipatifs et gradients de grandeurs intensives. Ceci conduit à une définition peu opératoire de la réversibilité à ce niveau : comment savoir si l'univers peut revenir à son état initial, comment savoir si les équations d'évolution du système sont symétriques par rapport au temps ?

Des entretiens réalisés auprès de dix étudiants montrent que ces étudiants ne disposent pas de critères qui leur permettent d'analyser les situations et de conclure de façon sûre à la réversibilité ou non réversibilité de la transformation (ou, plus précisément, à la plus ou moins grande irréversibilité de la transformation). Ils utilisent des arguments souvent incomplets. La diversité des transformations proposées en entretien nous a montré que ces arguments partiels peuvent faire illusion, en conduisant, dans certaines situations, à des réponses correctes. Cela nous permet par contre de repérer des types de transformations susceptibles de « mettre en évidence » ces formes de raisonnement, dans lesquelles les notions du sens commun semblent encore très présentes, et les facettes de la notion de réversibilité thermodynamique bien érodées.

Les arguments les plus souvent invoqués sont :

- le retour possible du système (sans prise en compte de l'environnement) à son état initial,
- la lenteur/rapidité de la transformation,
- le caractère « quasi-statique » de la transformation,
- la possibilité d'inverser la transformation, cette notion restant assez vague.

Les questionnaires nous ont permis, pour différentes transformations, d'évaluer l'importance de ces différents arguments auprès d'étudiants titulaires d'une licence de physique.

Les entretiens nous ont également montré que certaines des situations de questionnement étaient favorables à la mise en contradiction de ces manières de raisonner, avec prise de conscience par les étudiants. Nous trouvons là des exemples de contradiction entre schèmes de pensée ou contradiction intra-psychique (Piaget, 1974), qui pourront être utilisés dans des stratégies d'apprentissage.

6. PERSPECTIVES

Ces premières analyses, analyse « épistémologique » des différentes facettes de la notion de réversibilité thermodynamique et analyse « didactique » de certains effets de l'enseignement usuel, permettront de situer différentes démarches pédagogiques que nous avons déjà pu repérer (Fuchs, 1987 ; Marcella, 1992 ; Baierlein, 1994 ; Thomsen & Bers, 1996 ; Leff, 1996). Elles seront par ailleurs utilisées pour la conception et l'expérimenta-

tion de nouvelles situations d'enseignement-apprentissage. Pour l'élaboration de ces situations, nous prendrons en compte (Méheut & Psillos, 2004), outre les trois dimensions des analyses préalables suggérées dans le cadre de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988), une quatrième dimension qui concerne la motivation des élèves et la signification sociale des problèmes traités (Katman *et al.*, 1995). En ce qui concerne la reconstruction des savoirs, les résultats obtenus ici nous conduisent à envisager une approche plus « phénoménologique » donnant davantage d'importance à l'analyse des « causes » d'irréversibilité (inhomogénéités et phénomènes dissipatifs), et à proposer de raisonner non plus en termes dichotomiques (réversible/irréversible) mais en termes de réduction de l'irréversibilité. Une approche nous semble apporter une contribution intéressante à cette entreprise de « reconstruction didactique » : celle de J. Ogborn (1990) et R. Booahan (1996) qui propose une étude des différentes causes des changements. Nous pourrions nous appuyer par ailleurs sur l'approche développée par M. Welzel & G. Pospiech (2001) qui donne une large place à l'analyse de phénomènes et d'appareils « de la vie quotidienne », ce qui nous semble pouvoir contribuer à une recontextualisation de ces savoirs plus signifiante pour les étudiants.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 281-308.
- BAIERLEIN R. (1994). Entropy and the second law: A pedagogical alternative. *American Journal of Physics*, vol. 62, n° 1, pp. 15-26.
- BARDIN L. (1993). *L'analyse de contenu*. Paris, PUF.
- BEN ZVI R. (1999). Non-science oriented students and the second law of thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 21, n° 12, pp. 1251-1267.
- BOOHAN R. (1996). Using a picture language to teach about processes of change. In G. Welford, J. Osborne & P. Scott (éds), *Research in Science Education in Europe Current Issues and Themes*. London, The Falmer press, pp. 85-99.
- BRUNHES B. (1909). *La dégradation de l'énergie*. Paris, Flammarion (réédition, 1991).
- BRUSH S.G. (1976). *The kind of motion we call heat. A history of the kinetic theory of gases in the 19th century*. Amsterdam, North Holland.
- CARNOT S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris, Chez Bachelier, (réédition, Jacques Gabay, 1990).
- CLAUSIUS R. (1868). *Théorie mécanique de la chaleur*. Paris, Eugène Lacroix, (réédition, Jacques Gabay, 1991).
- DE DONDER T. & VAN RYSSELBERGHE P. (1936). *L'affinité*. Paris, Gauthier-Villars.
- DUHEM P. (1911). *Traité d'énergétique*. Paris, Gauthier-Villars (réédition, Jacques Gabay, 1997).
- FER F. (1970). *Thermodynamique macroscopique*. Paris, Gordon & Breach.
- FUCHS H. U. (1987). Entropy in the teaching of introductory thermodynamics. *American Journal of physics*, vol. 55, n° 3, pp. 215-219.
- GIBBS J.-W. (1899). *Équilibre des systèmes chimiques*. Paris, Gauthier-Villars.

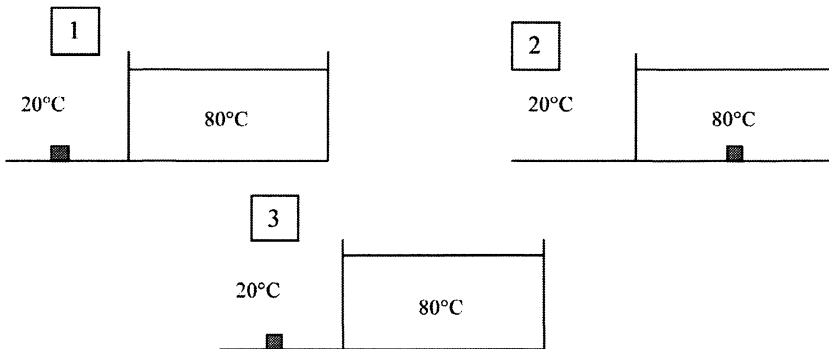
- GRÉA J. & VIARD J. (1995). From Language to Concept Appropriation in Physics. Two Cases Studies. In C. Bernadini, C. Tarsitani & M. Vincentini (éds), *Proceedings of the International Conference : Thinking Physics for Teaching*, Roma 1994. New York, Plenum Press, pp. 97-106.
- GUEDJ M. (2000). *L'émergence du principe de conservation de l'énergie et la construction de la thermodynamique*. Thèse de doctorat, université Paris 7.
- GUILBERT L. & MELOCHE D. (1993). L'idée de science chez des enseignants en formation : un lien entre l'histoire des sciences et l'hétérogénéité des visions. *Didaskalia*, n° 2, pp. 7-30.
- KATTMANN U., DUIT R., GROPENIEBER H. & KOMOREK M. (1995). *A Model of Educational Reconstruction*, Paper presented at The NARST Annual Meeting, San Francisco.
- KESIDOU S. & DUIT R. (1993). Students' Conceptions of the Second Law of Thermodynamics, An interpretative Study. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 30, n° 1, pp. 85-106.
- LATOUB B. (1997). *Leçons de thermodynamique*. Paris, Ellipses.
- LEFF H. S. (1996). Thermodynamic entropy : The spreading and sharing of energy. *American Journal of Physics*, vol. 64, n° 10, pp. 1261-1271.
- MARCELLA T. V. (1992). Entropy production and the second law of thermodynamics : An introduction to second law analysis. *American Journal of Physics*, vol. 60, n° 10, pp. 888-895
- MÉHEUT M. & PSILLOS D. (2004). Teaching-learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, vol. 26, n° 5, pp. 515-535.
- MINSTRELL J. (1992). Facets of students' knowledge and relevant instruction. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (éds), *Research in Physics learning : Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel, IPN, pp. 110-128.
- OGBORN J. (1990). Energy, change, difference and danger. *School Science Review*, vol. 72, n° 259, pp. 81-85.
- PIAGET J. (1974). *Recherches sur la contradiction*. Paris, PUF.
- PLANCK M. (1903). *Treatise on Thermodynamics*. London, Longmans.
- POURPRIX B. (2003). *La fécondité des erreurs*. Villeneuve d'Ascq, Presses Universitaires du Septentrion.
- PRIGOGINE I. (1968). *Introduction à la thermodynamique des processus irréversibles*. Paris, Dunod (réédition, Jacques Gabay, 1996).
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, pp. 159-170.
- SCHIELE B. (1976). Note pour une analyse de la notion de coupure épistémologique. Les représentations. *Recherche et formation*, vol. 6, n° 2-3, pp. 43-98.
- THOMSEN J. S. & BERS H. C. (1996). The reversible process : A zero-entropy-production limit. *American Journal of Physics*, vol. 64, n° 5, pp. 580-583
- THOMSON W. (1852) On a universal tendency in nature to the dissipation of mechanical energy. *Philosophical Magazine*, n° 4, pp. 304-306.
- WELZEL M. & POSPIECH G. (2001). Research Based and Content Guided Design of a Teaching-Learning Sequence. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselfes, G. Bisdikian, G. Fassopoulos, E. Hatzikraniotis & M. Kallery (éds), *Proceedings of the Third International Conference on Science Education Research in the Knowledge Based Society*. Thessaloniki, Art of Text, pp. 242-244.
- MANUELS D'ENSEIGNEMENT ANALYSÉS
- BRÉBEC J.-M. (1996). *H-prépa Thermodynamique 1^{re} année*. Paris, Hachette.
- COULON C., LE BOITEUX S. & SEGONDS P. (1997). *Cours de Physique. Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- FAROUX J.-P. & RENAULT J. (1997). *Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- FAVERJON G. (2003). *Les nouveaux précés Bréal. Thermodynamique PCSI*. Rosny sous Bois, Bréal.

- FRÈRE C. & KREMPF P. (1999). *Thermodynamique, 2^e année*. Paris, Ellipses.
- GRECIAS P. (1999). *Exercices et problèmes de physique, Thermodynamique*. Paris, Tec & Doc.
- LAVERTU G. (1997). *Thermodynamique*. Paris, Vuibert.
- LE HIR J. (1999). *Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- LE RILLE A. (2001). *Thermodynamique. Exercices et problèmes corrigés, rappels de cours*. Paris, Dunod.
- LHUILIER C. & ROUS J. (1998). *Introduction à la thermodynamique*. Paris, Dunod.
- LORENCEAU E. & RESTAGNO F. (2003). *Aide-Mémoire, Thermodynamique*. Paris, Dunod.
- MAÎTRE C. (1995). *Thermodynamique*. Paris, Masson.
- OLIVIER S. & GIE H. (1998). *Thermodynamique 1^{re} et 2^e année*. Paris, Lavoisier.
- PÉREZ J.-P. (2001). *Thermodynamique - Fondements et applications*. Paris, Masson.

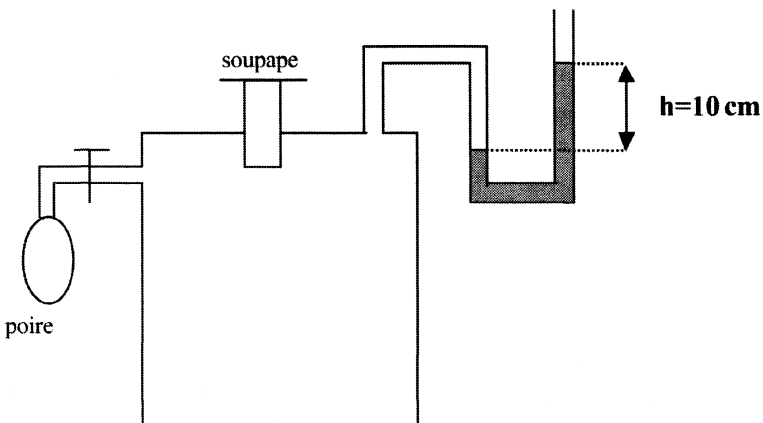
ANNEXE

Protocole de l'entretien sur transformations réversible et irréversible

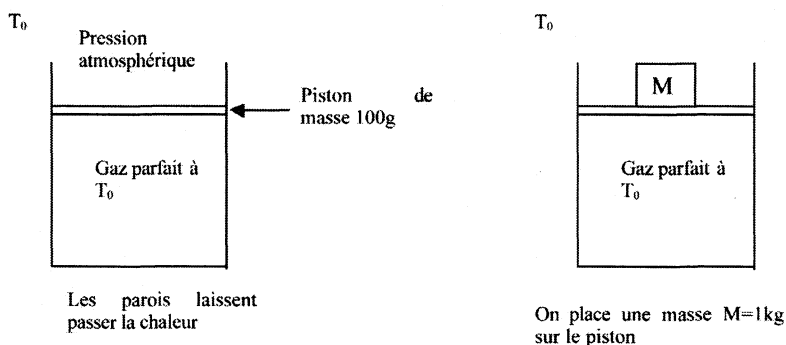
- 1) Un de vos camarades a entendu parler de transformations réversibles et irréversibles et il ne sait pas ce que c'est. Qu'est ce que vous lui diriez pour lui expliquer ce qu'est une transformation réversible ou irréversible ?
- 2) Pouvez-vous me donner un exemple de transformation réversible et un exemple de transformation irréversible.
- 3) Voici une situation avec un petit cube de métal de volume 8 cm^3 , par exemple, qui est à la température ambiante et 100 L d'eau à 80° Celsius . On met le cube dans l'eau et on attend qu'il prenne la température de 80° Celsius . Ensuite on le reprend et on le remet à la température ambiante. La transformation est-elle réversible ou irréversible ?



- 4) On réalise devant l'étudiant la manipulation de Clément-Desormes. (À l'aide d'une poire, on envoie de l'air dans la bonbonne. On ferme le robinet lorsque la surpression est d'environ 10 cm d'eau. On précise à l'étudiant que cette situation est pour nous la situation initiale. On soulève ensuite la soupape rapidement. L'air qui s'échappe de la bonbonne produit un bruit.) On demande alors : « Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ? »

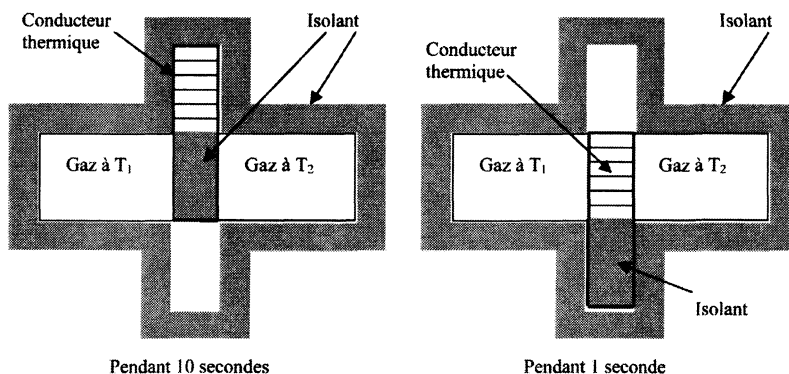


5) On a un récipient dont les parois laissent passer la chaleur. Il y a un gaz parfait dans le récipient qui est à la température ambiante T_0 . Un piston léger ($m=100g$) ferme le récipient de manière étanche. La pression atmosphérique s'exerce au-dessus du piston. Ensuite, on ajoute une masse M de 1 kg au-dessus du piston. À votre avis que se passe-t-il ? Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?

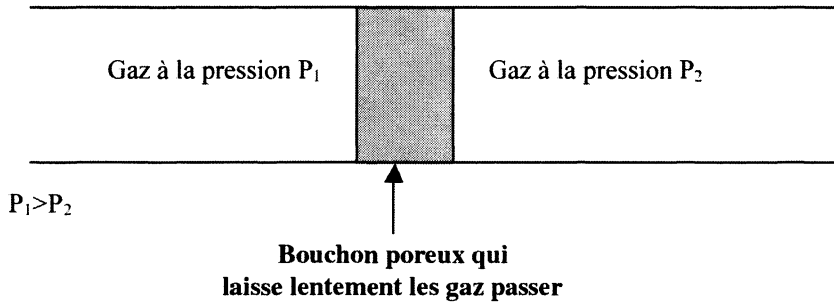


6) Un glaçon d'eau de 8 cm^3 de volume est à la température de $-0,2^\circ\text{C}$. Il est donc proche de zéro degré. On place ce glaçon dans un récipient qui contient 10L d'eau liquide à la température de $+0,5^\circ\text{C}$. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?

7) Deux récipients fermés contiennent chacun un gaz parfait. Les volumes sont identiques dans les deux récipients. Dans l'un des récipients, la température est de 20°C , dans l'autre de 80°C . L'ensemble est isolé de l'extérieur, il n'y a pas d'échange de chaleur possible avec l'extérieur. On réalise une transformation telle que les deux récipients sont isolés thermiquement pendant dix secondes grâce à un matériau isolant représenté par les stries. Ensuite pendant une seconde la chaleur peut passer (le matériau conducteur de la chaleur est représenté par le grisé). La manipulation de va et vient isolant-conducteur est répétée autant de fois qu'il le faut pour que les températures deviennent égales dans les deux compartiments. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?



8) Un gaz à la pression P_1 est dans la partie gauche du tuyau. Dans la partie droite, la pression vaut P_2 . Le tuyau ne laisse pas passer la chaleur. Un bouchon poreux laisse passer lentement le gaz d'un côté du compartiment vers l'autre. Est-ce que la transformation est réversible ou irréversible ?



Cet article a été reçu le 10/12/2002 et accepté le 30/09/2004.



Observation de chemins suivis par les élèves dans l'apprentissage des bases de l'électrocinétique

Student's learning paths observation in basic electricity

Marie-France MISSONNIER

LDSP, université Paris VII
Lycée d'Arsonval,
19100 Brive, France.

Jean-Louis CLOSSET

LDSP, université Paris VII
Faculté universitaire des sciences agronomiques
2, passage des Déportés,
5030 Gembloux, Belgique.

Résumé

Une démarche d'ingénierie didactique relative à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde (grade 10) en France a permis d'observer des étapes de son apprentissage par les élèves. Des analyses préalables nous ont conduits à tester quatre hypothèses reposant sur la maîtrise des pré-requis, une approche énergétique préalable du circuit électrique, une démarche qualitative et une introduction indépendante des concepts. Leur

mise en œuvre, d'abord dans la classe du chercheur, puis dans d'autres classes, enfin dans d'autres académies ont permis de découvrir :

- *des aides à l'apprentissage, comme la maîtrise des prérequis ou l'approche qualitative, facilitées par des classes plutôt homogènes et des espaces de remédiation ;*
- *des chemins d'apprentissage du concept d'intensité électrique ;*
- *des difficultés non résolues comme le passage au formalisme ;*
- *l'élaboration par ces élèves d'un savoir d'une nature différente.*

Mots clés : *didactique, électricité, chemin d'apprentissage, ingénierie didactique, lycée.*

Abstract

A didactic engineering approach about the teaching of electricity for a grade 10 class in France has led to the observation of the progressive stages of students' learning paths. Previous analyses has led to test four hypotheses based upon the prerequisites' mastery, a previous energetic approach of the electric circuit, a qualitative approach and an independent presentation of the required concepts. The implementation of all these, in the researcher's class, first, in other classes in the same or in others academies, after, have led the discovery of :

- *learning effective assistances such as a prerequisites' mastery or a qualitative approach which is facilitated by relatively homogeneous classes and remedial work ;*
- *learning paths of the concept of intensity ;*
- *unresolved difficulties about the transition towards formalism ;*
- *the fact that these students have worked out a different knowledge.*

Key words : *sciences education, electricity, learning path, didactic ingenieering, upper secondary school.*

1. RAPPEL DE QUELQUES RÉSULTATS ISSUS DE LA RECHERCHE EN DIDACTIQUE

La physique serait une discipline difficile d'accès (Johsua, 1983) et l'électricité difficile à apprendre (Tiberghien *et al.*, 1995). Leur enseignement habituel est le plus souvent celui d'une science dépourvue de modélisation, réduite à des mesures (Canal, 1996), des formules (Lemeignan & Weil-Barais, 1993) ou des recettes (Johsua, 1985) ce qui n'intéresse pas l'élève et lui permet de conserver ses représentations qui se retrouvent au niveau universitaire (Closset, 1983). Nous pensons, tout au contraire, qu'il faut engager

les élèves dans une démarche d'apprentissage qui ait du sens, ce qui nous a conduits à nous intéresser aux représentations, plus spécialement en électricité, à la nature du savoir scientifique et aux processus d'apprentissage.

1.1. Les représentations

1.1.1. Généralités

Pour appréhender le réel par la pensée l'homme doit s'en faire une représentation. Ces représentations, élaborées à partir du vécu de phénomènes de la vie courante, lui permettent d'anticiper les événements et de réguler son action (Lemeignan & Weil-Barais, 1993).

Ainsi, les élèves arrivent en classe avec des représentations efficaces au quotidien, qui se révèlent tenaces et résistantes à l'enseignement. Souvent, elles ne cèdent pas d'un coup. Plusieurs cohabitent chez un même individu, « *leur activation dépend de la situation proposée* » (Johsua, 1985, p. 5).

1.1.2. Les principales représentations en électrocinétique

Nous nous intéressons à des élèves de seconde (grade 10) en France. Ces élèves, à l'entrée en seconde, répondent à des questions portant sur le circuit électrique essentiellement en termes de **courant**. Ce terme appartient au domaine de la physique, mais les propriétés que l'élève lui attribue ne sont pas celles du physicien (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Pour certains il peut exister un **courant statique** dans les fils en circuit ouvert (Closset, 1983), qui peut devenir un **fluide matériel** en circuit fermé « *métaphore du fluide en mouvement* » (Johsua, 1985, p. 2), ayant certaines propriétés de **l'énergie** (stockage, transfert, transformation), mais sans conservation (Von Rhöneck, 1982).

Lors de nos essais préliminaires, nous avons mis en évidence, chez la majorité de nos élèves, l'ignorance des concepts de circuit, de circulation et de différence de potentiel. Le plus souvent, l'élève ne sait pas si une résistance placée dans un circuit simple élève ou diminue l'intensité.

Pour répondre aux questions en termes d'intensité, l'élève considère toujours le **générateur** ayant un **débit constant** quelles que soient les modifications apportées au circuit. Il cherche à rendre compte des échanges énergétiques dans une relation agent-patient où, le plus souvent, c'est la pile qui impose un débit au circuit, lequel se trouve généralement modifié soit :

- uniquement à l'intérieur de la résistance, **raisonnement local**,
- soit à partir de celle-ci, **raisonnement séquentiel** (Closset, 1983), majoritaire à l'entrée en seconde. Il conduit l'élève à :

- prévoir un éclairage différent pour des ampoules identiques montées en série,
- attribuer une importance à la place du fusible ou
- imaginer du courant en amont d'un interrupteur ouvert (50 % des élèves).

En début de seconde, plus rares sont les élèves au raisonnement à **courant constant** où la résistance serait sans effet sur le courant, lequel resterait identique à lui-même en tout point du circuit, quoi qu'il lui arrive.

1.2. Analyse des contenus à enseigner

1.2.1. Nature de la connaissance scientifique

Le raisonnement usuel met volontiers en jeu des histoires d'objets avec leurs propriétés et leurs fonctions (Lemeignan & Weil-Barais, 1992). Les représentations, le plus souvent non conscientes et implicites, ont un statut d'évidence non ouverte à la réfutation.

Si le scientifique cherche aussi à se représenter le monde, c'est à l'aide d'un **modèle** au caractère hypothétique et révisable (Popper, 1988). Il reconstruit un monde idéal, à l'aide de grandeurs physiques, reproduisant certains phénomènes du monde réel. Les éléments de construction, nommés **concepts**, ne sont pas des propriétés intrinsèques de l'objet, n'existent pas réellement, ont été librement inventés. On les définit et on les mesure. Cette connaissance est explicite, questionnable, structurée, cohérente et partagée par une communauté.

Ainsi le physicien se livre-t-il à « *une activité en rupture avec le sens commun* » (Johsua, 1983, p. 69), car « *le réel n'est jamais "ce qu'on pourrait croire", mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser* » (Bachelard, 1986, p. 13). Nous voulons partir des représentations initiales de l'élève, qui ne sont autres que des tentatives de réponses à ses interrogations centrées sur l'énergie, et le conduire au besoin de concepts. Or le modèle construit n'est qu'une représentation partielle du réel, qui peut être considérée comme un outil imparfait susceptible d'améliorations successives. Ainsi la modélisation peut être abordée à différents niveaux ce qui devrait permettre de la rendre accessible à l'élève par une transposition didactique (Chevallard, 1985).

1.2.2. Le modèle de fonctionnement du circuit que nous souhaitons voir construire

Le modèle repose sur l'existence d'une représentation du circuit et de la circulation au sein de celui-ci. Nos questionnaires préliminaires ayant révélé que la moitié de nos élèves les ignoraient, nous nous sommes trouvés

dans l'obligation de construire la notion de circuit, chaîne conductrice fermée, y compris à l'intérieur du générateur, condition nécessaire pour qu'un courant (mouvement ordonné de porteurs de charge) puisse circuler. Au contraire, s'il existe une ouverture, rien ne circule nulle part.

Les élèves empruntent le plus souvent un raisonnement causal linéaire : s'il existe un courant, il y a une cause à cette circulation, qui est la pile. Elle sera caractérisée par la d.d.p. entre ses bornes, « *prédisposition de la pile à établir un courant* » (Psillos *et al.*, 1988, p. 35). Ce concept représentera d'abord une propriété de la pile : « *l'existence d'une tension provoque un courant* » (Tiberghien *et al.*, 1994, p. 23). Puis, dans un deuxième temps, s'il circule un courant entre deux points, ces deux points ne sont pas à la même « altitude », ils ne sont pas au même potentiel (ce qui peut permettre d'établir un lien entre chute de tension et échange énergétique, lien précieux à connecter à la vision énergétique des élèves, mais aussi d'introduire les concepts de résistance et d'intensité). Une question naît : comment agir sur la quantité de charges en circulation, sur leur débit ? Ce qui conduit à la construction du concept de résistance :

- comparons le rôle d'une ampoule et d'un résistor, tous deux transformateurs d'énergie qui s'échauffent quand un courant les traverse, mais aussi régulateurs de courant ; la résistance sera la grandeur physique qui indique la difficulté de passage du courant, et nous souhaitons la nommer autrement que l'objet ;
- ce composant, comme tout élément d'un circuit électrique est un conducteur, plus ou moins bon, qui offre une résistance plus ou moins grande au passage du courant. Psillos (1994) suggère de l'appeler « *conducteur-résistant* », son effet conducteur étant illustré lorsqu'il est ajouté en dérivation (la résistance du circuit diminue), son effet résistant lorsqu'il est ajouté en série (la résistance du circuit s'élève) ;
- enfin, la d.d.p. pouvant être considérée comme la prédisposition de la pile à établir un courant, pour un générateur donné, selon la résistance du circuit l'intensité du courant sera plus ou moins grande ; nous arrivons ainsi à une approche qualitative des interactions au sein d'un circuit résumées par la loi d'Ohm.

Le circuit peut aussi comporter des dérivations, il y a toujours conservation de la charge, ni accumulation ni perte : ce qui arrive à un nœud en repart, de même pour la pile, ou tout autre composant.

1.3. Connaissances sur les processus d'apprentissage en physique

1.3.1. Le constructivisme

Nous acceptons l'hypothèse constructiviste selon laquelle un apprentissage serait une construction à partir des représentations et des structures

cognitives, en interaction avec l'environnement. Dans ce cadre, l'activité intellectuelle de l'élève est centrale et chaque élève réalise son apprentissage d'une manière personnelle. Apprendre consiste à transformer des structures cognitives pour passer d'une cohérence à une autre, ce qui demande d'intégrer des informations nouvelles et d'en éprouver la pertinence.

Comment aider l'élève à s'engager dans cette démarche difficile ? Une première étape consiste à le rendre actif, le mettre en quête de sens, faire en sorte qu'il se pose des questions ; une deuxième, lui donner la possibilité de s'approprier la connaissance nouvelle.

1.3.2. La dévolution du problème

« Avant tout il faut savoir poser des problèmes... Dans la vie scientifique les problèmes ne se posent pas d'eux-mêmes... Pour un esprit scientifique toute connaissance est une réponse à une question. S'il n'y a pas eu de question il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit. » (Bachelard, 1938, p. 14)

Le maître doit imaginer une situation faite pour la construction de connaissances qui puisse permettre à l'élève de s'emparer d'un problème, lui-même calibré en vue de provoquer la construction par l'élève d'un savoir nouveau. Ces « *situations d'apprentissage* » (Brousseau, 1986) seront l'occasion pour le maître, non de la transmission d'une connaissance, mais de la dévolution du bon problème. Aussi de nombreux chercheurs proposent-ils d'engager les élèves dans la résolution de **situations-problèmes** qui aient du sens pour l'élève. Dans ce contexte la question qui se pose tout naturellement est : comment faire en sorte que la question de l'enseignant devienne une question pour l'élève, qu'elle ait un sens pour l'élève ?

L'élève ne peut apprendre qu'en étant actif, en faisant fonctionner et en faisant évoluer ses connaissances, le maître aura la responsabilité du choix judicieux d'une « situation-problème » à laquelle tout élève peut fournir une réponse, reflet d'une certaine connaissance dans ce domaine. Ces situations-problèmes engendrent de la part des élèves un éventail de solutions plus ou moins contradictoires qui peuvent être à l'origine d'un débat dans la classe, et du besoin d'un enseignement adapté, qui fera appel à une nécessaire **transposition didactique** (Chevallard, 1985).

La « théorie des situations » (Brousseau, 1986) conduit à repenser la place des éléments en interaction au cours de l'apprentissage, une stratégie d'enseignement précisant le rôle :

- du maître en lien avec le savoir savant et le savoir de l'élève d'une part, mais aussi l'élève et la classe ;
- de l'élève en lien avec ses représentations, ses pairs, le maître et l'expérimental ;
- de l'expérience.

1.3.3. Rôle de l'expérience

Le maître propose à l'élève une situation familière à propos de laquelle il lui demande de fournir par écrit des prévisions ou une interprétation. Chacun répond à l'aide de ses représentations, puis expose son point de vue aux autres, l'argumente, écoute celui de l'autre, etc. Les diverses prévisions, expression des représentations des élèves, prennent le statut d'hypothèses que l'élève souhaite tester par l'expérience.

Le plus souvent l'expérience contredit les prévisions : « *le démenti leur est apporté par la situation sans que le professeur ou les autres élèves n'aient besoin d'intervenir* » (Charnay & Mante, 1990, p. 59). « *La distorsion avec les résultats expérimentaux provoque une insatisfaction, un étonnement, une curiosité, un questionnement et une demande d'explication qui feront apparaître la suite comme une réponse à des attentes, comme un besoin.* » (Canal, 1996, p. 36). Ainsi l'expérience, en jouant le rôle de **test d'hypothèses**, contribue à la **construction du problème** avec la classe.

L'élève se trouve conduit à raisonner sur le mode « hypothético-déductif », proche de la démarche réelle de construction du savoir en sciences : formulation correcte du problème, émission d'hypothèses, vérification de ces hypothèses et interprétation des résultats (Pinelli & Lefèvre, 1993).

Cette démarche peut être exploitée à **tous les stades de l'apprentissage d'un concept** : en faire naître le besoin, mais aussi construire et structurer le modèle ou en tester la validité. Elle s'appuie sur le couple étonnement-questionnement qui permet de transformer des situations d'enseignement en situations d'apprentissage.

2. PROBLÉMATIQUE

2.1. Nos choix concernant l'apprentissage, sur lesquels se fonde la séquence, et les conséquences sur son déroulement

Nous voulons **rendre l'élève actif** dans la construction de ses connaissances, **l'initier à une démarche scientifique**, lui montrer que le **monde** qui l'entoure peut être **intelligible**. Notre but est de l'amener progressivement au besoin et à la construction des concepts et des lois du physicien, qu'ils aient du **sens** pour lui. Pour rendre l'élève actif dans la construction de ses connaissances il paraît nécessaire :

- de **partir de l'état réel de ses connaissances**, que nous avons cherché à préciser lors des essais préliminaires (hétérogénéité des représentations, absence de modèle de circuit et de circulation, un courant parfois statique, souvent « énergétique ») ;

- **d'éveiller sa curiosité** par des situations-problèmes, mais aussi en ne fournissant des éléments de connaissance qu'en réponse à une question, ce qui conduit l'élève à une modélisation progressive par une initiation à une **démarche de test d'hypothèses**.

Les analyses qui précèdent et le but poursuivi par notre enseignement sont à l'origine des choix qui ont piloté la conception de la séquence :

H1 – La maîtrise des prérequis

Comme le suggère la pédagogie de la maîtrise (Bloom, 1979), nous pensons qu'il est judicieux de vérifier l'existence des prérequis utiles au nouvel apprentissage envisagé. Ainsi, avant d'aborder le concept d'intensité, il nous est apparu nécessaire que les élèves possèdent une représentation du circuit et de la circulation. Cette base commune n'existant pas, elle a fait l'objet du premier apprentissage.

Tout au long de l'apprentissage d'un concept nous fournissons de nombreuses occasions de comprendre (réinvestissements, entretiens dans la mesure du possible, tests sont autant d'opportunités de remédiation) avant de passer à l'étape suivante afin d'assurer une nouvelle base commune pour un maximum d'élèves.

De la maîtrise des prérequis nous attendons :

- la construction d'un modèle de circuit et de circulation, et donc une diminution du taux de réponses prévoyant l'existence d'une circulation en circuit ouvert ;
- une meilleure implication des élèves dans la tâche d'apprentissage et donc moins d'élèves dépourvus de réponses (de représentations).

H2 – Approche énergétique du circuit

Les élèves abordant souvent l'électricité avec la notion d'un courant stockable et consommable, leur analyse se ferait en termes d'énergie. Nous pensons qu'il pourrait être intéressant pour l'élève que l'enseignement fournisse une réponse à sa question implicite. Aussi la séquence aborde-t-elle le circuit comme un système où s'effectuent des échanges énergétiques. Ce choix est étroitement lié à celui du système analogique au circuit électrique : la chaîne de vélo (Closset, 1983), système mécanique assurant également un transfert d'énergie.

L'approche énergétique préalable devrait entraîner une diminution du taux d'interprétations énergétiques et donc du raisonnement séquentiel.

H3 – Approche qualitative du fonctionnement du circuit

Pour aider à donner du sens, à construire pas à pas, par approches successives les concepts, et peu à peu un modèle de fonctionnement du

circuit nous avons fait le choix d'un travail qualitatif qui permette à l'élève de comprendre « comment ça marche ». Ce choix se traduit par :

- des questions, des observations, des interprétations qualitatives ;
- le choix des aides, analogies ou images, supports concrets pour la pensée ;
- le nom de conducteur-résistant attribué au composant R, frein à la circulation en série, chemin supplémentaire en dérivation ;
- le choix de travailler avec des circuits qui se transforment, où l'on demande de comparer le fonctionnement du nouveau circuit à celui de l'ancien, sans formules et sans calculs.

L'approche qualitative devrait conduire à une meilleure représentation des concepts qui pourrait s'observer à la nature des explications fournies.

H4 – Une approche progressive et indépendante des concepts

Cette hypothèse répond au souci d'avancer à petits pas (Vygotsky, 1978), en réponse à une question de l'élève, pour mieux donner sens à chacun des concepts. Elle pilote le plan de la séquence : en premier la différence de potentiel, puis l'intensité et le conducteur résistant. Enfin le circuit, système en interaction, concept dont la loi d'Ohm fournit une excellente synthèse.

L'introduction indépendante et progressive des concepts devrait aider à la disparition de la notion floue de courant au profit de concepts distincts aux propriétés spécifiques.

Nous remarquons que tous ces choix devraient concourir à un progrès cognitif qui, s'il est observé, sera à considérer comme étant le fruit de notre « bouquet d'hypothèses ».

2.2. Hypothèse concernant un chemin d'apprentissage

À partir de réponses d'élèves à des stades d'apprentissage différents, Closset (1992) a émis l'hypothèse que la hiérarchie cognitive observée pourrait correspondre à un chemin d'apprentissage.

Nous avons profité de l'expérimentation de la séquence pour tester cette hypothèse en observant les raisonnements, mis en œuvre par un même élève en réponse aux questions posées, en fonction de l'avancement de la séquence et de la complexification du circuit.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Les acteurs de l'expérimentation

Deux années d'expérimentation par le chercheur ont permis la rédaction du texte définitif de la séquence, d'étendre son expérimentation

avec des **enseignants du lycée** de Brive, puis d'autres académies. Ils n'ont reçu aucune formation particulière, le seul critère de « sélection » était le volontariat.

Les élèves de seconde qui ont participé à l'expérimentation constituaient des populations différentes : ceux de Brive étant regroupés selon que leur projet professionnel nécessitait un baccalauréat scientifique ou un baccalauréat sciences économiques, alors que ceux des autres académies constituaient des classes indifférenciées.

3.2. Recueil et analyse de données

Les données recueillies sont essentiellement des traces écrites sous forme de **réponses à des questionnaires « papier-crayon »** :

- avant enseignement elles donnent accès aux représentations initiales des élèves ;
- lors du réinvestissement puis de l'évaluation, elles permettent de suivre l'apprentissage de chaque élève.

Nous disposons également **d'entretiens** effectués :

- lors des essais préliminaires pour préciser les représentations de certains élèves et comprendre des réponses inattendues comme le viol de la loi des nœuds ;
- lors de la prise de repères externes (Rouffiac-Missonnier, 2002) pour expliquer l'origine de l'absence de réponse de certains élèves.

Dans tous les cas ils ont offert à l'élève l'opportunité d'une remédiation.

3.3. La séquence

3.3.1. Démarche de construction d'un concept

Notre démarche de construction d'un concept se situe dans un cadre constructiviste où l'enseignant tente de faire construire un maximum de connaissances par l'élève. Mais l'élève ne peut pas tout construire seul : une partie de la connaissance doit lui être transmise. Il reste à la charge de l'élève de se l'approprier à l'occasion de réinvestissements sur des situations voisines. La démarche suivie pour la construction de chacun des concepts est toujours la même :

- **étape 1**, un questionnaire préliminaire qualitatif auquel l'élève répond à l'aide de ses représentations ;
- **étape 2**, mise en commun des réponses (les élèves les expriment et les discutent) ;
- **étape 3**, formulation des hypothèses retenues, à tester par l'expérience ;
- **étape 4**, expérimentale, de tests d'hypothèses (l'observation de l'expérience, qui contredit les prévisions rend la situation encore plus énigmatique, met l'élève en quête d'explications) ;

- **étape 5**, apports du maître en réponse aux questions (ce peut être l'introduction d'un concept, complétée par une image ou une analogie) ;
- **étape 6**, selon les élèves réinvestissements ou remédiations, à partir d'un nouveau questionnaire qui demande de nouvelles prévisions qualitatives, qui seront suivies de nouvelles expériences tests d'hypothèses dont les observations nécessiteront la mise en œuvre du modèle proposé pour devenir intelligibles ;
- **étape finale**, l'évaluation, sous forme de questions, dont la correction sera sous forme expérimentale de tests d'hypothèses, ultime tentative pour inciter tous les élèves à se servir du modèle.

3.3.2. Activités de l'élève qui apprend avec la séquence

L'élève met en œuvre ses représentations pour fournir une réponse écrite aux questions, puis il doit exposer et justifier ses prévisions devant la classe.

Certains élèves sont déstabilisés face à la diversité des prévisions, alors que d'autres sont vraiment certains de ce qu'ils affirment. Ces prévisions deviennent des hypothèses à tester.

Le montage est très vite réalisé : l'élève en attend la confirmation de ses prévisions. Sinon, il refait le circuit, observe celui des autres tables, manifeste alors son étonnement, son incompréhension, la situation est vraiment énigmatique. Un voisin ou le maître lui demande de considérer d'autres hypothèses : laquelle se trouve-t-elle confirmée par l'expérience ?

Il se peut aussi que le maître ait à introduire un concept, ou à proposer un modèle qu'il demande à l'élève de considérer pour interpréter les faits observés.

Cette connaissance nouvelle, l'élève doit se l'approprier : c'est le rôle de réinvestissements avec les mêmes tâches pour l'élève à partir de situations nouvelles proposées par un nouveau questionnaire.

3.3.3. Plan de la séquence

Le plan est donné par l'ordre d'introduction des concepts : circuit, circulation, d.d.p., intensité, conducteur résistant et enfin le circuit électrique.

Durée : 10 heures de cours et 10 séances de T.P. (15 heures).

3.4. Évaluations

En lien avec nos hypothèses nous avons procédé à une évaluation interne ainsi qu'à une prise de repères externes.

3.4.1. Évaluation interne

L'évaluation interne poursuit deux objectifs :

- d'une part nous avons cherché à savoir si les chemins d'apprentissage des élèves étaient en lien avec la hiérarchie cognitive attendue : dans ce but nous avons suivi les réponses, élève par élève, à la recherche des étapes par lesquelles passe l'apprentissage de chacun ;
- d'autre part nous avons recherché quelques effets spécifiques de chacune des hypothèses, ainsi qu'un effet global sur l'apprentissage des concepts en observant l'évolution des représentations. Nous avons aussi cherché à mesurer l'impact dans le temps de l'apprentissage à l'aide de la séquence, par un questionnaire six mois plus tard.

3.4.2. Prise de repères externes

Nous avons effectué deux prises de repères externes. La première avant tout enseignement en seconde, afin de s'assurer que l'état initial soit le même quel que soit ensuite le mode d'apprentissage suivi par les élèves participant aux prises de repères. Etant parti d'un état initial comparable, nous cherchons à savoir si l'état final l'est aussi, sinon quelles différences observe-t-on ? Peut-on émettre une hypothèse sur leur origine ? Peut-on établir un lien avec les hypothèses de la séquence ?

4. RÉSULTATS EN TERMES DE SUIVIS

Cette séquence, après 2 ans d'essais préliminaires et de mise au point avec les élèves de 4 classes, a été expérimentée avec 9 classes d'une trentaine d'élèves chacune. Aussi, dans le cadre de cet article nous ne pourrions pas faire partager l'ensemble de nos observations (Rouffiac-Missonnier, 2002) concernant l'apprentissage des trois concepts réunis dans la loi d'Ohm. Nous ne parlerons que de ce qui concerne le concept d'intensité et nous illustrerons nos résultats par le cas de deux classes représentatives de l'ensemble.

4.1. Documents disponibles

Les documents proviennent de 56 élèves appartenant à 2 classes différentes : l'une avec des élèves ayant un projet scientifique (Brive) et l'autre indifférenciée (Grenoble). Nous examinons d'abord les réponses aux questionnaires successifs d'approche du concept d'intensité : avant enseignement de la circulation, préliminaire à l'intensité, réinvestissement sur les circuits mixtes, test, questionnaire final six mois après enseignement.

Nous ne nous intéressons qu'à l'influence de la résistance sur le débit, en circuit fermé. Nous avons cherché à classer les raisonnements en « local », « séquentiel », « à courant constant » ou « systémique ».

4.2. Évolution du raisonnement de l'élève du circuit simple à la branche principale d'un circuit avec dérivation

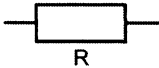


Figure 1 • Circuit simple

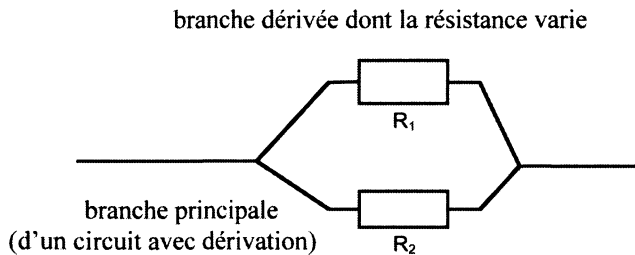


Figure 2 • Circuit avec dérivation

4.2.1. Élèves partant d'un raisonnement local (en partie ou en totalité)

Sur 13 élèves au raisonnement initial à caractère local, 10 ont adopté un raisonnement identifiable à chaque étape : sur ces dix élèves au raisonnement initial à caractère local, 8 adoptent finalement le raisonnement systémique. Avant ce raisonnement :

- 5/8 sont passés par le raisonnement à courant constant ;
- 2/8 sont passés directement du raisonnement local au raisonnement systémique ;
- 1/8 est passé par le raisonnement séquentiel.

Le **raisonnement à courant constant** paraît, à partir de ce premier petit échantillon, l'**étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique**. C'est également l'**étape la plus fréquente après le raisonnement local**.

4.2.2. Élèves partant d'un raisonnement séquentiel

Le raisonnement séquentiel est emprunté en début d'année par 31 élèves, soit la moitié de la population observée, et par 8 autres qui l'ont utilisé mêlé à d'autres raisonnements.

Sur 31 + 8 élèves au raisonnement qui peut être séquentiel selon la question en début d'année, 28 adoptent un raisonnement systémique en fin d'apprentissage, en passant par les étapes suivantes :

- 9/31 élèves passent directement du raisonnement séquentiel au raisonnement systémique ;

- 12/31 passent par le raisonnement à courant constant.

Les trois élèves qui, au départ, avaient un raisonnement séquentiel mêlé de « correct » passent tous par l'étape à courant constant.

Le **raisonnement local** n'apparaît pas parmi ceux employés après le raisonnement séquentiel : cela tendrait à confirmer qu'il **précéderait le raisonnement séquentiel**. Une fois abandonné l'élève n'y revient plus.

Cet échantillon d'élèves, plus important que le précédent, confirme que le **raisonnement à courant constant** paraît être **l'étape la plus fréquente avant le raisonnement systémique**. C'est également **l'étape la plus fréquente après le raisonnement séquentiel**.

Remarque : il arrive qu'après être passé par le raisonnement à courant constant l'élève retourne au raisonnement séquentiel. Ce retour en arrière n'est qu'apparent : d'un questionnaire au suivant, le circuit possède plus de composants et se complique. L'élève se trouve face à une situation moins familière où le raisonnement séquentiel se transpose de préférence au raisonnement correct (Closset, 1983).

4.2.3. Élèves partant d'un raisonnement à courant constant

Nous n'en avons pas trouvé dans la population suivie. Nous ne pouvons analyser ce raisonnement que comme étape d'apprentissage.

4.2.4. Élèves partant d'un raisonnement correct

Dix élèves utilisaient au départ un raisonnement qui paraissait correct : quatre l'ont conservé tout au long de l'apprentissage. Les six autres, pour répondre à une question un peu plus difficile, ou moins familière, ont emprunté le raisonnement à courant constant avant d'adopter un raisonnement systémique.

4.2.5. Analyse des observations

Nous disposons pour chacun des 52 élèves de leurs réponses à au moins deux, sinon trois ou quatre questionnaires successifs entre lesquels un enseignement a été dispensé. Pour chaque élève nous avons observé les raisonnements empruntés à chacune des étapes de son apprentissage. Nous avons rassemblé dans le tableau 1 les successions de raisonnements rencontrées. Par exemple, pour 7 élèves ayant utilisé uniquement un raison-

nement local pour répondre à un questionnaire, à l'étape suivante, 5 élèves ont emprunté le raisonnement à courant constant, les deux autres ayant choisi le raisonnement séquentiel et le raisonnement systémique.

Raisonnement à un stade initial ou intermédiaire :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage (X = pas encore d'apprentissage en seconde)			
	Local	Séquentiel	À courant constant	Systémique
Local (7 élèves)	X	1	5	1
Séquentiel (31 élèves)	0	X	17	12
À courant constant (30 élèves)	0	6	X	22
Correct (17 élèves)	0	1	7	X

Tableau 1 • Récapitulation de l'évolution des raisonnements de 56 élèves

Ce tableau 1 semblerait confirmer une hiérarchie des raisonnements utilisés par les élèves pour l'analyse d'un circuit électrique, partant du plus primitif :

- **1 - Le raisonnement local**, une fois délaissé, il apparaît rarement que l'élève y revienne. Partant de ce raisonnement l'élève passe le plus souvent au raisonnement à courant constant (sous réserve d'une part de notre petit effectif (7 élèves), d'autre part peut-être de nos outils d'apprentissage qui se voulaient agressifs pour le raisonnement séquentiel) ;
- **2 - Le raisonnement** suivant semblerait être le raisonnement **séquentiel** dans la mesure où l'élève ne l'abandonne, lors de l'apprentissage, qu'au profit du raisonnement à courant constant ou du raisonnement systémique, qui seraient donc plus évolués ;
- **3 - Le raisonnement séquentiel** évolue majoritairement en passant par l'étape du **raisonnement à courant constant**. Ce raisonnement n'est pas « naturel » à l'élève qui entre en seconde, mais l'étape intermédiaire d'apprentissage la plus empruntée ;
- **4 - Le raisonnement systémique** est le plus évolué. En fin d'apprentissage il apparaît souvent mêlé au raisonnement à courant constant que l'élève utilise plus volontiers sur les montages avec dérivations, donc plus complexes. On observe également que des élèves au raisonnement initial correct passent par un raisonnement à courant constant avant de revenir à un raisonnement systémique. Ce point confirme que le raisonnement à courant constant est le plus proche du raisonnement systémique, même si le fossé entre les deux est important.

Cette première analyse a une portée limitée par le nombre d'élèves suivis (56) mais surtout en raison de l'apprentissage qu'ils ont vécu. Il aurait

été intéressant de pouvoir comparer avec d'autres élèves ayant suivi un autre enseignement. Cela s'est révélé impossible, l'enseignement habituel ne consacrant pas assez de temps à l'apprentissage d'un concept pour que l'on ait accès aux étapes par lesquelles passe le raisonnement de l'élève.

4.3. Évolution du raisonnement de l'élève sur la branche dérivée dont la résistance varie

Sur 8 élèves ayant employé d'abord le raisonnement local sur la branche dérivée, tous arrivent au raisonnement systémique sur la branche, 6 directement et 2 en passant par le raisonnement séquentiel.

Sur 21 élèves ayant d'abord fait une analyse séquentielle sur la branche dérivée, 15/21 passent directement au raisonnement correct, un au raisonnement local, un au raisonnement à courant constant et quatre après un détour par le raisonnement correct reviennent au raisonnement séquentiel.

Le raisonnement à courant constant est utilisé par 4 élèves avant le raisonnement systémique, mais l'un d'eux termine avec un raisonnement séquentiel.

Ces hésitations révèlent un raisonnement correct non stabilisé et un raisonnement séquentiel auquel l'esprit revient dès que la situation est moins familière, ou que le circuit se complexifie.

Sur 25 élèves ayant abordé l'analyse de la branche dérivée avec un raisonnement correct, 20 l'ont conservé, quatre sont passés par le raisonnement séquentiel, dont deux pour retrouver un raisonnement systémique. Le dernier a préféré le raisonnement à courant constant

Nous allons observer le nouveau raisonnement installé au détriment de celui préexistant, au niveau de la branche dérivée, lors de l'apprentissage de l'intensité (tableau 2).

Raisonnement à un stade initial ou intermédiaire :	Raisonnement au stade suivant de l'apprentissage (X = absence d'évolution)			
	Local	Séquentiel	À courant constant	Systémique
Local (8 élèves)	X	1	0	6
Séquentiel (25 élèves)	1	X	1	23
À courant constant (6 élèves)	0	0	X	4
Correct (74 élèves)	0	9	1	X

Tableau 2 • Récapitulation du raisonnement emprunté par les élèves sur la branche dérivée où R varie

4.4. Récapitulation des observations lors du passage du circuit série au circuit mixte

Lors d'essais antérieurs sur deux classes (72 élèves) nous avons suivi l'évolution du raisonnement de l'élève lors du passage du circuit série au circuit mixte.

Le raisonnement local, conservé sur la branche par 7 élèves, leur permet de respecter le débit de part et d'autre d'un dipôle ainsi que la loi des nœuds, mais avec partage égal de l'intensité dans les branches dérivées.

Les raisonnements « local », « séquentiel », « à courant constant » font majoritairement place au **raisonnement correct sur la branche**, mais sans interaction avec le circuit principal, le **générateur** conservant un **débit constant**. Cette propriété peut admettre une interaction avec l'autre branche. Le raisonnement reste localisé : il limite l'effet du dipôle soit à sa branche, soit à l'ensemble des dérivations, dans les deux cas sans interaction avec le générateur : **peu à peu l'élève semble étendre le domaine d'action d'un dipôle**.

Raisonnement sur : le circuit série	Local	Séquentiel	A courant constant (C.Ct)	Correct	Total
les éléments du circuit mixte	26	15 + 1	7	23	72
Branche où R varie	4 local 3 séquentiel 2 C.Ct 17 C.Ct	3 séquentiel 2 C.Ct 10 C.Ct	2 C.Ct 5 C.Ct	3 local 5 C.Ct 15 C.Ct	7 local 6 séquentiel 11 C.Ct 47 C.Ct
Branche principale	1 séquentiel 19 C.Ct 6 correct	1 séquentiel 11 C.Ct 4 correct	6 C.Ct 1 correct	13 C.Ct 10 correct	2 séquentiel 49 C.Ct 21 correct

Tableau 3 • Résumé de l'évolution des raisonnements lors du passage du circuit série au circuit mixte

4.5. Conclusion

On peut remarquer que les élèves qui, sur le circuit série, employaient un raisonnement :

- local, choisissent parmi toutes les formes de raisonnement pour analyser un circuit mixte ;
- séquentiel, n'utilisent plus jamais le raisonnement local, par contre, ils peuvent utiliser l'un des autres ;
- à courant constant, n'utilisent jamais le raisonnement local ou séquentiel,

par contre ils se servent soit de celui à courant constant, soit du raisonnement correct ;

- correct, utilisent le raisonnement correct ou celui à courant constant (à 3 élèves près qui ont utilisé le raisonnement local sur la branche où R varie).

Cette étude contribue à valider l'**hypothèse de la hiérarchie** des raisonnements, émise par Closset :

- le raisonnement local, avec deux discontinuités du débit serait le plus primitif ;
- le raisonnement séquentiel, n'ayant plus qu'une discontinuité, représenterait un réel progrès, mais il semblerait que cette étape ne soit pas toujours utilisée ;
- le courant constant, qui ne présente plus de discontinuité, serait le plus proche du raisonnement correct, tout en restant à un niveau plus simple ;
- le passage du raisonnement séquentiel au raisonnement à courant constant présenterait un fossé moins important que le saut au raisonnement systémique. Les raisonnements pris dans l'ordre

local ———> séquentiel ———> courant constant ———> correct

peuvent constituer des **étapes d'apprentissage** (sachant qu'un élève est susceptible de sauter des étapes, ou d'effectuer des retours en arrière sur une situation plus complexe), où le fossé entre le raisonnement séquentiel et celui à courant constant apparaît moins important que le saut pour passer au raisonnement systémique.

5. RÉSULTATS EN TERMES D'APPRENTISSAGE

5.1. Évolution du raisonnement concernant le débit dans une branche dérivée

Nous avons observé l'évolution du raisonnement emprunté par les élèves de 6 classes, appartenant à 4 académies, soit 146 élèves ayant suivi la séquence, à différentes étapes de leur apprentissage, pour analyser :

- avant enseignement, un circuit simple à un seul récepteur, puis,
- après apprentissage avec la séquence, un circuit série (comprenant plusieurs récepteurs en série),
- différents circuits, lors du test final en fin d'année.

Nous donnons également, à titre indicatif, nos observations aux mêmes étapes d'apprentissage, d'élèves ayant suivi un enseignement habituel. Nous sommes conscients que de nombreuses variables secondaires interviennent, qui, pour un aussi petit nombre de classes, interdisent une comparaison statistique stricte puisqu'il est impossible de randomiser ces variables secondaires. Lorsqu'il nous arrivera de donner les résultats

obtenus dans l'enseignement habituel, ce ne sera qu'à titre indicatif, comme repère externe (tableau 4).

Raisonnement Population	Local	Séquentiel	Courant constant	Systemique
Avant enseignement (190 élèves)	28 %	54 %	3 %	15 %
Après la Séquence (146 élèves)	9 %	15 %	15 %	51 %
Bilan	- 19 %	- 39 %	+ 12 %	+ 36 %
Après l'enseignement habituel (68 élèves)	19 %	40 %	9 %	19 %
	- 9 %	- 14 %	+ 6 %	+ 4 %

Tableau 4 • **Évolution des raisonnements concernant l'intensité le long d'un circuit série, en fonction de l'enseignement reçu (6 mois après enseignement, élèves de 4 académies)**

Notre prise de repère externe laisse penser que la hiérarchisation ne serait pas trop dépendante du type d'apprentissage : **les raisonnements semblent évoluer dans le même sens, à savoir une diminution des raisonnements locaux et séquentiels et un progrès des raisonnements à courant constant et systémique.**

L'enseignement de la séquence conduirait à une plus forte diminution des raisonnements locaux et séquentiels, accompagnée d'une plus forte utilisation des raisonnements à courant constant et systémique, ce qui revient à dire qu'elle aurait, en fin d'année, une efficacité supérieure.

5.2. Évolution du raisonnement cohérent employé sur l'ensemble du questionnaire

Une autre façon de mesurer l'état de la connaissance peut être d'observer, tout au long d'un questionnaire qualitatif, quel est le **raisonnement cohérent le plus représenté** chez les élèves (élèves ayant conservé le même raisonnement pour répondre à l'ensemble du questionnaire). Voici les résultats recueillis à Brive, six mois après enseignement, dans les deux classes du chercheur et deux autres classes (tableau 5).

Raisonnement Enseignement	Local	Séquentiel	Courant constant	Correct	Total
Séquence (64 élèves)	6 %	6 %	20 %	37 %	70 %
Habituel (56 élèves)	7 %	36 %	21 %	2 %	66%

Tableau 5 • **Nature du raisonnement cohérent employé sur l'ensemble du questionnaire (six mois après enseignement, Brive)**

Le raisonnement cohérent le plus représenté dans la séquence est le raisonnement correct, alors que dans l'autre population, c'est toujours le raisonnement séquentiel.

Il y a 4 élèves de la séquence (8 %) qui n'ont pas fourni de réponse à la dernière question et 15 de l'enseignement habituel (27 %).

Ces observations tendraient à indiquer, au niveau des élèves de la séquence, une amélioration :

- de l'engagement dans la recherche de réponses à une question ;
- du niveau du raisonnement cohérent.

6. ANALYSE A POSTERIORI

Ces observations sont sans doute en lien avec l'ensemble des hypothèses mises en œuvre. Nous allons maintenant rechercher quelques effets plus spécifiques.

6.1. Quelques observations en lien avec nos choix

6.1.1. Recherche d'effets en lien avec la maîtrise des prérequis

6.1.1.1. Existence d'une représentation, ou engagement de l'élève dans la tâche d'apprentissage

Quels que soient le questionnaire, la question, le concept testé, que la question soit qualitative ou numérique, le nombre d'élèves ne fournissant pas de réponse est toujours plus élevé chez les élèves de l'enseignement habituel. Vus en entretien, ces élèves sont dépourvus de réponse, en fait dépourvus de représentation du concept.

6.1.1.2. Nécessité d'enseigner les concepts de circuit et de circulation, ou de l'utilité d'enseigner des implicites

Le questionnaire passé chaque année aux élèves entrant en seconde avait révélé qu'environ la moitié des élèves imaginait du courant quelque part en circuit ouvert. Un professeur stagiaire (Jourdes, 1999) a voulu tester l'intérêt d'enseigner les concepts de circuit et de circulation. Il a fait passer un questionnaire en fin d'année aux élèves de 3 classes ayant appris avec notre séquence (« séquence »), et à des élèves de 3 classes ne l'ayant pas vécue (« habituel »). Voici par exemple l'une de ses questions avec les réponses recueillies.

Analyse : « les élèves de l'enseignement habituel utilisent à plus de 40 % un raisonnement séquentiel sur le circuit ouvert, alors que cette représentation a pratiquement disparu chez les élèves de la séquence ». J.-L. Closset (1983)

et S. Johsua (1985) ont retrouvé de telles représentations au niveau universitaire. Les réponses aux diverses questions de L. Jourdes (1999) illustrent l'absence d'évolution de la représentation du circuit ouvert chez les élèves qui ont reçu un enseignement qui n'aborde pas les situations de circuit ouvert. Son travail incite à penser qu'il serait nécessaire d'étudier le circuit (fermé et ouvert) en introduction à l'enseignement de l'électricité. Voici par exemple l'une de ses questions (figure 3) avec les réponses recueillies.

Dans le circuit suivant indiquez les lampes qui s'allument en les entourant.

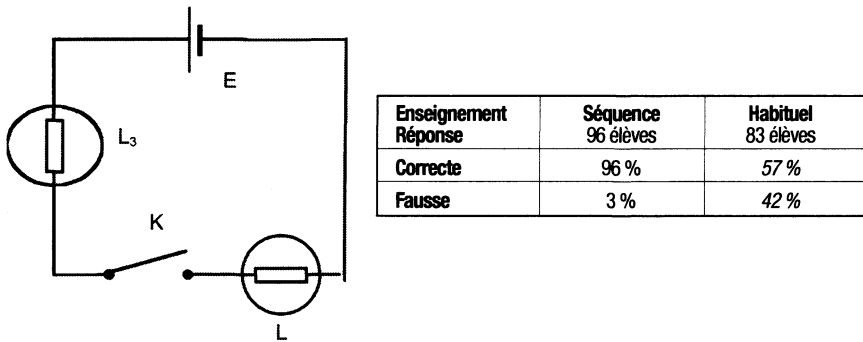


Figure 3 • Exemple de question posée par L. Jourdes

6.1.2. Recherche d'effets en lien avec l'approche qualitative

6.1.2.1. Nature des justifications

Exemple concernant le rôle du **conducteur-résistant** :

- ajouté **en série**, 20/24 (80 %) des prévisions correctes sont en termes de **frein** à la circulation. Cette justification est employée par 22/35 élèves (63 %) ;
 - ajouté en **dérivation**, 15/22 prévisions correctes sont en termes de **chemin** supplémentaire. Cette justification ne conduit à aucune prévision fausse (100 % de réponses correctes) ; elle est employée par 15/35 élèves (43 %).
- Ces représentations sont assez fortes pour se retrouver en fin de 1^{re} S.

6.1.2.2. Évolution du débit du générateur

Cette idée a été introduite en lien avec celle d'interaction, illustrée par l'analogie avec la chaîne de vélo. Voici les pourcentages de réponses à un questionnaire qualitatif, passé six mois après enseignement, portant sur des circuits à une ou deux ampoules : il était demandé à l'élève si le débit du générateur varie lorsqu'on enlève ou ajoute une ampoule (tableau 6).

Question portant sur un Circuit Enseignement	Simple	Série	Avec dérivation
<i>Effectif</i>	123 élèves	59 élèves	64 élèves
Séquence	74 %	46 %	42 %
<i>Effectif</i>	113 élèves	57 élèves	56 élèves
Habituel	21 %	3 %	21 %

Tableau 6 • Réponses où le débit du générateur varie lors d'une modification du circuit (6 mois après enseignement)

Lors de cet essai, pour 74 % des élèves de la séquence et 21 % des autres, le courant traversant le générateur varie lorsque la valeur de la résistance d'un circuit simple évolue.

Observons ce que deviennent ces représentations en fin de 1^{re} S (tableau 7).

Question portant sur un Circuit Enseignement	Simple	Série	Avec dérivation
Séquence 39 élèves	85 %	75 %	58 %
Habituel 72 élèves	38 %	35 %	23 %

Tableau 7 • Élèves ayant adapté le débit du générateur au circuit (réponses qualitatives - fin 1^{re} S)

Globalement on retrouve les mêmes réponses un an plus tard, avec toutefois un progrès chez les deux populations entre la classe de seconde et celle de première (Rouffiac-Missonnier, 2002). Mais ces résultats révèlent deux difficultés. On constate que le raisonnement à **débit constant du générateur** constitue un **réel obstacle** empêchant l'élève d'accéder au raisonnement systémique du physicien. Le raisonnement à débit constant va de pair avec l'impossibilité d'envisager une interaction entre les différents éléments constitutifs d'un circuit. Nous avons constaté une lente remise en cause de cette représentation tout au long du travail qualitatif, mais aussi la fragilité des acquis.

Nous ne nous sommes pas penchés sur la **difficulté** que pouvait représenter le **passage au formalisme**, nos élèves raisonnaient beaucoup mieux qu'ils ne calculaient. Sur les exemples numériques ils ont tendance à introduire inconsciemment l'hypothèse de la conservation du débit du générateur, ce qui simplifie la démarche de réponse.

Question portant sur le Enseignement	Circuit	Série	Dérivation
Séquence	6 / 19 élèves	32 %	8 / 20 40 %
Habituel	1 / 35 élèves	3 %	6 / 37 16 %

Tableau 8 • **Fréquence des réponses numériques où il existe une interaction entre le générateur et le circuit (fin 1^{er} S)**

En fin de 1^{er} S, les élèves ayant suivi la séquence **fournissent de meilleures réponses aux questions qualitatives**. Pour les réponses chiffrées, les outils à employer ne leur sont pas assez familiers, telle la résistance équivalente, ce qui les conduit à émettre (plus ou moins explicitement) des hypothèses fausses, comme la constance du débit de la branche principale. Plus des trois quarts de ces élèves fournissent une réponse correcte sur le circuit simple ou en série, ils sont moins familiers du montage en dérivation ou mixte.

Dans tous les **cas ils sont au moins deux fois plus nombreux à imaginer une interaction** entre le générateur et son circuit que ceux ayant suivi un enseignement habituel : on peut noter là un **effet conjugué des hypothèses**.

6.2. Dans quelle mesure les hypothèses ont-elles été mises en œuvre ?

En l'absence de formation particulière des enseignants avant l'expérimentation de la séquence nous pouvons seulement être certains de la mise en œuvre des hypothèses qui participaient au déroulement de la séquence :

- l'approche énergétique ;
- l'approche indépendante des concepts ;
- la maîtrise des premiers prérequis (concepts de circuit et de circulation).

Nos observations tendraient à montrer qu'une formation des enseignants les aiderait à mieux exploiter les hypothèses dont l'approche qualitative. De plus, du temps est nécessaire pour maîtriser l'usage d'un autre contrat didactique.

En résumé, les effets attendus se sont effectivement produits, pas toujours avec l'ampleur espérée. Nous y voyons au moins deux raisons :

- l'absence de formation des enseignants,
- l'absence de réflexion sur le fossé que représente pour l'élève le passage au formalisme.

7. CONCLUSIONS

Cette séquence, avec ses hypothèses, semble avoir permis des progrès cognitifs : avoir aidé les élèves à construire un début de représentation du concept d'intensité ; nous avons relevé une construction par les élèves d'un début de représentation qualitative du conducteur-résistant et d'interaction entre le générateur et son circuit mais ce n'est qu'une base qui serait à compléter.

Les suivis d'élèves ont permis d'observer par quelles étapes les élèves passent lors de la construction du concept d'intensité : ces observations se trouvent en accord avec l'hypothèse de hiérarchie des raisonnements. La représentation du générateur à débit constant serait un réel obstacle en lien avec la marche élevée que représente le passage du raisonnement à courant constant au raisonnement systémique.

Il est apparu que ce travail demanderait une réelle formation des maîtres et des espaces de liberté pour assurer une bonne maîtrise des prérequis.

La prise de repères externes semble montrer pour chacun des concepts un plus grand nombre de réponses, une meilleure qualité des réponses et des justifications chez les élèves de la séquence : la population non scientifique ayant suivi la séquence fournit des prévisions équivalentes à celles des élèves scientifiques de l'enseignement habituel. Ces observations sembleraient indiquer un impact réel des méthodes d'apprentissage de la séquence.

Cette impression est confortée par la **nature différente de la connaissance** à laquelle chacun de ces enseignements donne accès. **La séquence**, en multipliant les réinvestissements, aiderait l'élève à **décontextualiser** la connaissance et à se l'approprier : il a été entraîné à réfléchir et à **mieux se représenter** le fonctionnement d'un circuit. À l'opposé, de nombreux auteurs soulignent que **l'enseignement habituel** conduirait l'élève à un **savoir de mémoire**, à des **raisonnements mécaniques**, ce qui expliquerait qu'il soit déstabilisé dès que la question n'est plus habituelle, que le circuit évolue, etc.

Il en coûte aux élèves et aux enseignants de changer de contrat didactique. Mais de l'expérimentation du nôtre, il ressort :

- que **l'élève** a bénéficié d'un enseignement plus personnalisé permettant à chacun de progresser à partir de son état de connaissance. Nous avons cherché à éveiller sa curiosité, puis les analogies et les modèles qualitatifs l'ont aidé à se représenter les phénomènes ; il a eu l'impression et le plaisir de comprendre ;
- que **l'enseignant** a eu l'opportunité de découvrir (parfois avec surprise) les raisonnements de ses élèves et a pu tester si nos hypothèses d'apprentissage les aidaient à se rapprocher des modèles du physicien ;
- que **le passage au formalisme** représente un saut cognitif tel qu'il reste un domaine de recherche.

Les réactions des partenaires de la séquence ont été essentiellement positives :

- les élèves actifs, curieux, intéressés en classe, se rendaient volontiers aux entretiens dont ils repartaient heureux de commencer à comprendre ;
- les enseignants avaient eux l'impression que « le courant passait mieux » et ont trouvé judicieuse pour la compréhension l'analogie avec la chaîne de vélo.

Toutefois il est apparu que cette séquence gagnerait à être étalée dans le temps : ne nécessitant aucun savoir initial, elle pourrait se dérouler dans le cadre des nouveaux programmes de collège, débiter en classe de 4^e et se poursuivre en 3^e.

Nos conclusions s'appuient sur des résultats obtenus dans le contexte de la recherche ici décrite. Il serait intéressant de renouveler la démarche dans des contextes différents et variés ce qui permettrait soit de confirmer, soit de nuancer nos résultats. Une suite nécessaire à ce travail serait d'envisager une ingénierie de formation permettant d'étudier dans quelles mesures et sous quelles conditions la démarche pourrait être généralisée à l'enseignement en France.

Le lecteur intéressé par la mise en œuvre de la séquence peut écrire au premier auteur pour des informations complémentaires et/ou se référer à la thèse disponible au LDSP.

NOTE

1. Randomiser : disposer d'un nombre suffisant de groupes expérimentaux pour que les valeurs prises par les variables secondaires puissent être considérées comme distribuées aléatoirement).

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1938 / 1986). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BLOOM B.S. (1979). *Caractéristiques individuelles et apprentissages scolaires*. Bruxelles, Labor.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- CANAL J.-L. (1996). *Courant, tension, résistance et énergie. Essai de conceptualisation des grandeurs fondamentales en électricité*. Thèse de doctorat, université de Toulouse.
- CHARNAY R. & MANTE M. (1990-1991). De l'analyse d'erreurs en mathématiques aux dispositifs de remédiation : quelques pistes... *Grand N*, n° 48, pp. 37-64.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, la Pensée sauvage.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse de doctorat, université Paris VII.

- CLOSSET J.-L. (1992). Raisonnements en électricité et en hydrodynamique. *Aster*, n° 14, pp. 143-155.
- JOHSUA S. (1983). La « métaphore du fluide » et le « raisonnement en courant ». *Recherches en didactique de la physique*, pp. 321-330.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse de doctorat, université d'Aix-Marseille II.
- JOURDES L. (1999). *Quel enseignement en électricité pour une classe de seconde ? Mémoire professionnel*, IUFM de Limoges.
- KOUMARAS P., KARIOTOGLOU P. & PSILLOS D. (1994). Devons-nous utiliser des phénomènes évolutifs en introduction à l'étude de l'électricité ? *Didaskalia*, n° 4, pp. 107-120.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1992). L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie. *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*, pp. 171-231.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris, Hachette.
- PINELLI P. & LEFÈVRE R. (1993). « Étudiants - chercheurs » une proposition en électrocinétique. *Aster*, n° 17, pp. 65-87.
- POPPER K. (1988). *La logique de la découverte scientifique*. Paris, Payot.
- PSILLOS D., KOUMARAS P. & TIBERGHIE A. (1988). Voltage presented as a primary concept in an introductory teaching on D.C. circuits. *International Journal of Science Education*, vol. 10, n° 1, pp. 29-43.
- ROUFFIAC - MISSONNIER M.-F. (2002). *Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique*. Thèse de doctorat, université Paris VII.
- TIBERGHIE A., ARSAC G. & MÉHEUT M. (1994). Analyse de projets d'enseignement issus de recherches en didactique. In *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- TIBERGHIE A., PSILLOS D. & KOUMARAS P. (1995). Physics instruction from epistemological and didactical bases. *Instructional Science*, n° 22, pp. 423-444.
- Von RHÖNECK C. (1982). *Students' conceptions of the electrical circuit before physics instruction. Proceedings of an international Workshop on Problems Concerning Students' representation of Physics and Chemistry Knowledge*. Pädagogische Hochschule, Ludwigsburg, pp. 194-212.
- VYGOTSKY L.S. (1978). *Pensée et langage*. Paris, Éditions sociales.

Cet article a été reçu le 8/04/04 et accepté le 13/07/04.

■ COMPTE RENDU D'INNOVATION

Report of innovation

**Pour une didactique des sciences
en classe d'intégration scolaire :
compte rendu d'innovation
Partir de ce qu'ils pensent afin
de les faire gagner en abstraction**

**For a didactic's science in scholar
integration classroom : report of innovation
From what they think in order to make
them win in abstraction**

Pierre MARTINET

Professeur des écoles CLIS 1, doctorant en sciences de l'éducation (Lyon 2)
4, chemin d'Orcet,
63800 Cournon, France.

Alain PEYRONNET

Docteur en sciences de l'éducation et en philosophie de l'existence
Ceyssat, route de Contournat,
63800 Saint-Georges-sur-Allier, France.

Résumé

L'article interroge la place et la pratique de l'enseignement scientifique dans les classes « non ordinaires » appelées CLIS 1. Depuis le cadre théorique

de « l'apprentissage allostérique », il rappelle la réalité qui préexiste à toute didactique, à savoir celle des conceptions. Il décrit et analyse ensuite une expérience conduite dans le Puy de Dôme (1999-2003) qui s'appuie sur l'astronomie et la biologie. Il présente les outils qui ont favorisé avec ces apprenants le prélèvement des représentations concernant notre planète et la digestion. Il rend compte des leviers qui ont permis à ces enfants les premiers franchissements d'obstacles. À travers l'évolution significative des modèles explicatifs de ces élèves, il bouscule simultanément nos images, préjugés et stéréotypes relatifs à la différence.

Mots clés : astronomie, biologie, classe d'intégration scolaire, conceptions, modèle allostérique d'apprentissage.

Abstract

The article questions the place and the practice of the scientific teaching in "non ordinary" classrooms called CLIS 1. Since the framework theoretical of "the Allosteric learning model", it reminds the reality that preexists to all didactic, namely that ideas, conceptions. It describes and analysis then an experience driven in the Puy de Dome (1999-2003) that leans on the astronomy and the biology. It presents tools that have favored with these learners the levy of representations concerning our planet and the digestion. It renders account levers that have allowed these children the first over comings of obstacles. Through the significant evolution of their explanatory models, it turns one's simultaneously our relative images, prejudices and stereotypes to the difference.

Keys words : allosteric learning model, astronomy, biology, scholar integration classroom, conceptions.

On le sait, l'enseignement des sciences passe mal. Malgré les efforts et appels à éduquer mieux, les résultats ne répondent guère aux attentes. Cet insuccès, alors que la société se « scientifie » de plus en plus, est aussi contradictoire qu'embarrassant. Mais, il y a plus gênant encore, ou du moins qui le devrait. Pendant que d'autres ont du mal à profiter d'un savoir dominant, certains enfants n'y ont toujours pas accès. L'initiation scientifique, osons-le dire, n'entre quasiment jamais dans les classes d'intégration scolaire. Ce public, identifié comme ayant de grandes difficultés d'apprentissage, est souvent assimilé à un groupe déficient. Être en structure « spéciale » autorise rarement de se confronter à des concepts scientifiques.

Cette exclusion du partage de la connaissance est inacceptable (situation banalisée par l'absence de programme). Ces élèves manifestent une curiosité qui demande aussi à être accompagnée... et valorisée. Comme ceux des classes dites « ordinaires » ils doivent pouvoir interroger leur monde à la faveur d'une approche éclairée par les technosciences. Ce droit à une éducation de qualité, pour donner lieu à des actions adaptées, impose

de poser certaines questions. Quel cheminement convient-il d'aménager avec ces jeunes pour une entrée signifiante dans l'univers des savants ? Quels canaux sont-ils susceptibles de les accrocher véritablement ? Quels supports doit-on adopter ou inventer pour que « ça marche » ? Comment mesurer enfin les bénéfices probables ?

Pour répondre à ces interrogations, la présente contribution problématise la situation de la manière suivante : à quelles conditions peut-on permettre à des élèves présentant un retard mental d'accéder comme les autres à des concepts scientifiques scolaires ? On rend compte ici d'une expérience mise en place depuis quatre ans en CLIS 1 (Auvergne). Son affiliation théorique renvoie au modèle d'apprentissage de type allostérique (LDES Genève). Cette innovation travaille à une transformation des conceptions enfantines *via* le repérage d'obstacles à la compréhension. Il privilégie la biologie et l'astronomie, concentrant les efforts sur deux concepts (la digestion et le monde). Ses préoccupations en matière de recherche sont triples : comment identifier les schémas explicatifs enfantins ? Comment les faire évoluer ? Comment évaluer les progrès ainsi obtenus ?

Dix enseignants de classes d'intégration se sont mobilisés. Ils ont été scindés en deux équipes de cinq (selon l'investissement accepté). L'une a reçu une formation en didactique des sciences (« impliquée »), l'autre a servi de témoin (« intéressée »). Les rencontres avec la première (1999-2002) durent environ quatre heures à raison d'une fois par mois (année scolaire). Les contenus portent d'abord sur la démarche systémique promue par l'équipe d'A. Giordan (importance du réseau des relations dans l'apprendre). Ils explicitent ensuite les modalités de recueil, de dépouillement et d'exploitation des fiches de prélèvements (représentations du « corps humain » et de « notre planète »). Enfin, au vu des difficultés mises au jour, une série d'outils-remédiation est co-élaborée (tremplin vers des objectifs conceptuels raisonnables) puis les protocoles de passation arrêtés.

Quatre-vingt deux élèves constituent l'échantillon, ils sont répartis en deux groupes équivalents. Une analyse comparée et circonscrite de productions (« trajet des aliments », « forme de la Terre et comportements d'objets »), est réalisée en début et à chaque fin d'année.

Vont être successivement présentés les outils réalisés par l'équipe formée (partie 1), la démarche pour les exploiter efficacement (partie 2), les premiers résultats (partie 3).

1. ACCUEILLIR LES CONCEPTIONS D'UN PUBLIC « NON ORDINAIRE »

Cette approche met en avant la spécificité de la forme requise par la connaissance nouvelle pour être intégrée (analogie avec certaines enzymes

dites allostériques). Résolument centrée sur l'apprenant elle doit le rendre à la fois acteur et auteur de sa formation (Giordan, 1998). Il s'agit avant tout pour l'enseignant d'établir une continuité cognitive entre les contenus (conceptions d'avant/ambitions pour après). Pour y parvenir, huit conditions sont au moins réclamées. Ce sont 1°) de recentrer sur ce qu'est et connaît déjà l'élève, 2°) de partir de ce qui le touche, le concerne directement, 3°) de prélever ce qui est déjà présent dans les têtes 4°) d'offrir un retour sur ce déjà-là, 5°) de faire confronter activement les visions individuelles, 6°) de créer des outils spécifiques tout en disposant de ressources suffisantes, 7°) d'introduire en périodes de confort des paramètres déstabilisants, 8°) d'aménager des niveaux différents dans la formulation de concepts.

Satisfaire aux deux premières recommandations requiert de garder à l'esprit que le public est ici spécifique. Âgé de 8 à 12 ans, il présente des troubles avérés d'ordre intellectuel (B.O., circulaire du 30/04/2002). La pensée magique reste là omniprésente. Les préoccupations tournent souvent autour de thèmes organo-déjectifs (devenir des aliments, pouvoirs transférés, nature de l'excrétion, etc.) Elles regardent aussi fréquemment du côté des origines (création de notre planète, existence extra-terrestre, influences de divinités cosmiques, etc.) Cette pente animiste et les centres d'intérêt qui l'accompagnent suffisent à combler le vide entretenu par le silence des instructions officielles (Gardou, 1999a, 1999b). Après réflexion sur ce qui apparaît le plus urgent, nous insistons sur la digestion et le monde. Nous présentons ci-dessous les fiches qui ont servi à faire émerger le « déjà-là ».

1.1. Supports pour le concept de digestion

De nombreuses données sont mobilisables concernant l'étude par les sciences du phénomène digestif. On découvre notamment que depuis le V^e siècle avant J.-C. la digestion a connu des définitions bien différentes (Guyénot, 1941 ; Sauvageot-Skibine, 1991 ; Clément, 1991 ; Giordan, 1995, etc.) Toutefois une typologie des modèles concurrents et successifs fait encore défaut. L'enseignant a néanmoins la possibilité de recueillir les représentations qui coexistent dans sa classe. Plusieurs travaux ont déjà été réalisés avec des élèves du primaire et du secondaire (Giordan & De Vecchi, 1987 ; Rolando, 1995 ; Rolland & Marzin, 1996, etc.) Reste qu'à ce jour rien n'a été produit concernant les populations CLIS. Le groupe « impliqué », dès la première année de formation en didactique, a conçu puis utilisé deux fiches-diagnostics. Elles sont intitulées : « *Pour que l'on comprenne ce que vous pensez que votre corps fait de la nourriture solide* ». La première propose une silhouette humaine complète, vue de face, la seconde une autre mais de profil (facilitante pour le phénomène d'excrétion, figure 1). Un texte-image questionne sur le devenir de ce qu'on avale (ci-après).



Imaginons que tu as envie de manger une pomme. Tu la croques. Mais, au fait, que devient le morceau de pomme que tu as croqué ?

Deux autres fiches diagnostics sont également exploitées. Elles ont pour titre : « *Pour que l'on comprenne ce que vous pensez que votre corps fait de la nourriture liquide* » (figure 1).



Imaginons que tu as très soif. Tu vas boire un verre de jus d'oranges. Mais, au fait, que devient ce jus d'oranges que tu viens d'avaler ?

Les mots utilisés doivent être faciles à lire et surtout à comprendre (bien des enfants ne sont pas lecteurs). La consigne doit être claire voire redondante (d'où un encodage dessin - contextualisation en images).

Dessine ce qui se passe d'après toi.



☛ Tu dois faire ton dessin à l'aide d'un crayon à papier et de crayons de couleurs.

Pour chacune de ces fiches, le temps n'est pas limité. Des précisions sont individuellement apportées une fois tous les dessins réalisés. Les commentaires des élèves sont enregistrés.

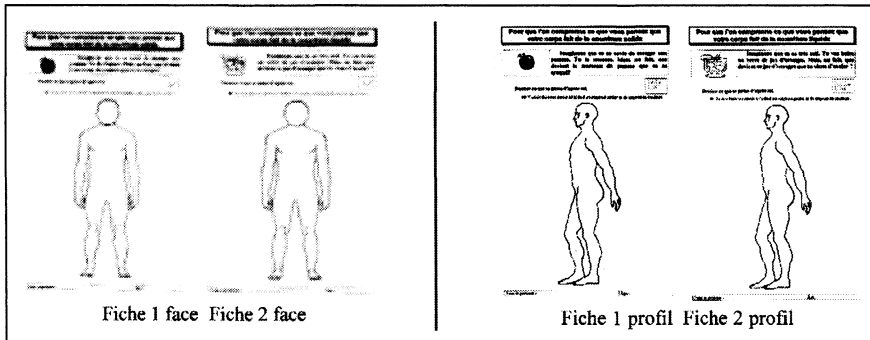


Figure 1 • Les quatre fiches diagnostics pour la digestion (solide/liquide)

Cette série de fiches doit être accompagnée de doublures. En effet, les jeunes sujets de CLIS 1 tendent à s'identifier au personnage. S'ils détestent personnellement le fruit ou la boisson de l'énoncé, le prélèvement est compromis. Par ailleurs, en fonction de l'âge, l'identification peut réclamer une silhouette féminine (à anticiper donc...)

Afin d'établir des critères significatifs, le groupe en formation s'est principalement intéressé à trois choses. Ces enfants en grande difficulté

d'apprentissage ont-ils conscience du phénomène d'excrétion ? Quelle connaissance ont-ils des organes qui sont en jeu ? Ont-ils construit ou approchent-ils la notion de système ? Une action chimique est-elle envisagée ? Il ressort assez rapidement que la négative s'impose pour la première et les deux dernières interrogations. Au vu de la diversité des productions enfantines, plusieurs grilles d'identification ont été réalisées. Elles permettent de distinguer trois grands types de conceptions (localisation, diffusion, trajectoire organique, figure 2). La première recense des apprenants qui considèrent la digestion comme un stockage sans transformation initiale. La suivante rassemble ceux qui se représentent la digestion comme une distribution générale et probablement fortifiante. La dernière, dédoublée (avec présence ou non de l'objet pomme), regroupe ceux qui reconstruisent un parcours.














Localisation			Diffusion			Organique(s)			
									
Image face pomme quasi centrée			Image face pomme omniprésente			Image face simple sac centré			
<i>haute</i>	<i>centrée</i>	<i>basse</i>	<i>holog.</i>	<i>Frag.</i>	<i>codée</i>	<i>codée</i>	<i>Tuyau</i>	<i>+ sac</i>	<i>+ excré.</i>
									

Figure 2 • Les trois grands types de conceptions et leurs subdivisions

Nous pouvons maintenant passer à notre seconde batterie d'instruments pour prélever (fiches diagnostics pour les conceptions du monde).

1.2. Supports pour le concept de monde

Contrairement au phénomène de digestion, les modèles concernant notre planète et son ciel ont fait l'objet d'un recensement (figure 3). Ils permettent de comprendre que le nombre de propositions historiques se ramène à cinq (Nussbaum, 1990). Le passage à un modèle scientifique (type 5) exige la modification de trois composantes. Le concept de forme doit tendre vers la boule (le monde plan s'incurve et se ramasse sur lui-même). Cela influe sur la nature de l'espace (plus de socle ni de ciel horizontal) et sur les comportements de « chute » (au final, trajectoires radiales et verticales).

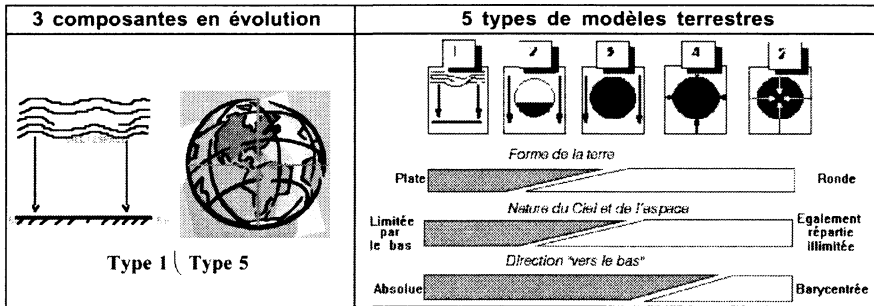


Figure 3 • Typologie des conceptions « monde »

Un parallèle entre l'histoire des sciences et les transformations conceptuelles des apprenants amène à utiliser des fiches spécifiques. Celles-ci s'inspirent d'études (Almany & Sarrate, 1986 ; Baxter, 1989 ; Nussbaum, 1991), mais aussi d'outils concrets (Estalella, 1986 ; Vosniadou & Brewer, 1992 ; Peyronnet, 1993). Elles répondent également aux exigences particulières de ce public (troubles cognitifs, adualisme, comportements de croyance immédiate) (Dumas, 2003). Ces fiches sont ici au nombre de six et obéissent à un ordre de passation.

La première, dite d'expression libre, s'intitule « *Pour que l'on comprenne comment vous voyez notre planète et l'espace* » (figure 4). Il s'agit pour le maître de séparer les conceptions de type 1-2 (horizontalité absolue du sol) des autres (rotondité terrestre). Une question résume l'interrogation, une consigne donne la marche à suivre, un cadre borne le dessin (2/3 de page A4).

Quelle Terre et quel ciel ?

Tu essaies de dessiner, à ta façon, le plus simplement possible, et dans le cadre ci dessous

1°) la Terre 🍷 (crayon à papier, avec si tu veux crayons de couleurs) ;

2°) Le ciel 🍷 (feutre ou stylo).




Figure 4 • Fiche d'expression libre

La deuxième est destinée à lever l'illusion possible du cercle (figure 5). Tracer un « rond » n'est pas nécessairement un indicateur de conception sphérique (type 2) ou de modèle-boule (type 3 à 5). L'image socialement valorisée (circulaire) prime souvent sur le fonctionnement cognitif (vision en plan). Un paramètre perturbateur est donc introduit (fusée).

Quelle Terre, quel ciel, quel sol ?
Tu essaies encore de dessiner, à ta façon, dans le cadre ci-dessous

1°) La Terre 🖍️ (crayon à papier, avec si tu veux crayons de couleurs)
2°) Le ciel 🖍️ (feutre ou stylo) ;
3°) Le sol 🖍️ (feutre ou stylo différents).

*** Mais, attention,**
il faudra aussi placer sur le sol une fusée qui doit bientôt décoller.

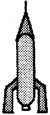

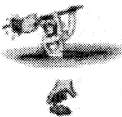


Figure 5 • Fiche confirmation

Les quatre fiches suivantes cherchent à savoir jusqu'où la notion de centre gravitationnel est maîtrisée (fiches 6, 7, 8, 9). Leurs titres annoncent les situations à réfléchir. Elles commencent toutes par : « *Pour que l'on comprenne...* » et focalisent ensuite un comportement d'objet : « [...] *un objet lourd passant à l'intérieur d'une planète* », « [...] *un objet que l'on lancerait en l'air* », « [...] *une grosse pierre lâchée à l'entrée de deux tunnels dans la planète* », « [...] *une bouteille pleine mais ouverte est posée sur une planète* ».

Quelle sera la trajectoire ?
Soit une petite planète. Dans celle-ci on perce un tunnel, au « milieu » et jusqu'au bout. On place ensuite dans ce « trou » qui traverse la planète un gros tuyau. Arrive un astronaute, muni d'une grosse pierre. Il s'approche de l'ouverture. Il lâche alors cet objet lourd dans le tunnel.




Le dessin de la situation

Que va faire la pierre ?

Figure 6 • Fiche un seul tunnel

Dans la majorité des cas, il s'agit pour l'enfant de tracer le chemin suivi par l'objet pesant. Toutefois, pour la fiche n° 4, il faut aussi colorier le ciel.

Quelles seraient les trajectoires ?
Imaginons cinq personnages à cinq endroits différents sur une planète ressemblant à la Terre mais plus petite. Ensemble, ils vont lancer de toutes leurs forces une balle en direction du ciel.



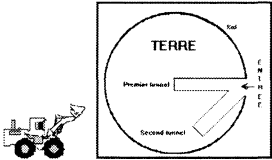
Le dessin de la situation

Que vont faire les balles ?

Figure 7 • Fiche trajectoire balles

Le cinquième support, pour dépasser le facteur « chance », est en deux feuillets (neuf situations ; voir le résumé en infra).

Quelle sera la trajectoire ?
 Avec de gros « engins », on creuse **deux tunnels** dans la Terre. On perce le sol au même endroit mais **dans deux directions différentes**.



On donne un nom à chaque tunnel. Une grosse pierre est lâchée à l'entrée (petit carré noir)


Les dessins de neuf situations de forage

Que va faire la pierre ?

Figure 8 • Fiche deux tunnels

La dernière fiche, comme d'ailleurs les n° 3 et 4, s'efforce de réduire les effets de cadre. Ici, l'induction de « chute » doit rester limitée.

Que fera le liquide ?
 Imaginons une grosse bouteille remplie d'eau, sans bouchon, et posée sur une petite planète. Que va donc faire ce liquide ? Dessine si besoin **en vert**.



Le dessin de la situation

Que devient l'eau ?

Figure 9 • Fiche trajet du liquide

Résumons avec les images les diverses suggestions.

Situations proposées sur les fiches 3-6

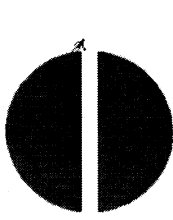
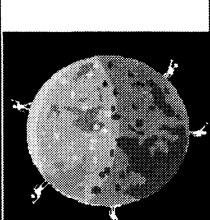
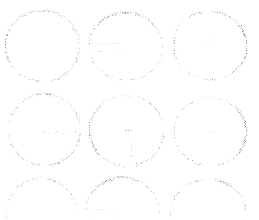
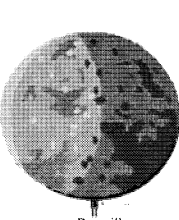
			
<i>Tunnel vertical</i>	<i>Lancers de balles</i>	<i>Série de doubles tunnels</i>	<i>Hémisphère sud</i>

Figure 10 • Synthèse des situations

Là, les enseignants ont été particulièrement vigilants à la forme de la planète exprimée et aux comportements des objets. Leurs efforts permettent de repérer trois grandes conceptions (plane, sphérique, boule, figure 11). La première recense des apprenants qui considèrent la Terre comme un plateau tout en intégrant partiellement la circularité (vie entre deux couches). La suivante rassemble ceux qui se représentent la Terre en deux hémisphères, l'un solide, l'autre gazeux-stellaire (vie intra-globe). La dernière regroupe ceux qui conçoivent un volume plein mais non gravitationnel (vie en surface). Dans chaque catégorie, le bas et le haut restent des directions absolues (verticalité).

Monde 1-2 (plan ⇒ disque)			Monde 2 (sphérique)			Monde 3 (boule non active)		
<i>clivé</i>	<i>bas abso.</i>	<i>haut/bas</i>	<i>plafond</i>	<i>bas abso.</i>	<i>bas abso.</i>	<i>couronne</i>	<i>bas</i>	<i>radial</i>
<i>entre 2</i>	<i>bas abso.</i>	<i>bas abso.</i>	<i>plafond</i>	<i>bas</i>	<i>bas abso.</i>	<i>+ petite</i>	<i>bas</i>	<i>bas abso.</i>

Figure 11 • Modèles co-présents et réponses caractéristiques

La règle d'interprétation, en l'absence de renseignements supplémentaires est la suivante : c'est l'indice du modèle le plus faible qui l'emporte. Deux « juges » procèdent au dépouillement.

Il convient maintenant que chacun, enseignant comme élève, tire profit du prélèvement et du repérage des dominantes (préoccupation n° 2 de cette initiative).

2. ET EN LES PRENANT RÉELLEMENT EN COMPTE

Il reste assez rare que le prélèvement des conceptions soit sérieusement exploité (conditions 4 à 8 de l'apprentissage allostérique, supra). Or,

cet abandon prive les élèves de bénéfices importants pour avancer (visualisation des divers schémas explicatifs, interactions verbo-conceptuelles, gain en abstraction, etc.) Commencer par rendre compte aux intéressés est fondamental. Cela informe des différences dans la compréhension des phénomènes (explications parfois divergentes mais toujours co-présentes) et spécifie dans la variété possible (typologie notamment réduite à trois grandes représentations). Nous allons montrer comment nous avons procédé en CLIS 1. Nous présenterons ensuite, au vu des obstacles mis au jour, nos premiers outils de remédiation. Ceux-ci achemineront alors vers des niveaux de formulation répondant à un recadrage (ajustement des ambitions à travers la définition d'objectifs conceptuels – et non plus de « purs » concepts).

2.1. Faire retour aux apprenants

Pour informer les élèves, le groupe « impliqué » a construit une fiche type (figure 12). La présentation retenue permet à chaque enseignant de restituer des données (diagnostics) et se veut transposable (biologie ↔ astronomie). Le titre choisi est : « *Au-delà des apparences* ». Il est à chaque fois suivi de deux images (photos) et d'un texte qui problématise l'information (même structure).



Figure 12 • Fiche « premier retour »

L'énoncé va insister sur la méconnaissance de l'objet étudié (figure 13). Il y a d'un côté ce qu'on entend et apprend, de l'autre ce que l'on comprend (dessins d'accompagnement à déchiffrer).

Les pièges de l'information	
<p>Au premier abord, le corps humain ne semble rien avoir de particulier. On sait, car on nous l'a répété, qu'il est fait d'os, de chair, et de sang. Pour le reste, on regarde des photos, on lit quelques textes et, en prenant un air sérieux, on répète :</p> <p>« Le corps humain comprend trois grandes parties. La tête et le tronc contiennent les organes essentiels de la vie. Les membres servent à manipuler et à se déplacer. »</p> 	<p>Au premier abord, la Terre n'a rien de vraiment particulier. On sait, car on nous l'a répété, que c'est notre planète, qu'elle est solide et ronde. Pour le reste, on regarde des photos, on lit quelques textes et, en prenant un air sérieux, on répète :</p> <p>« C'est un corps céleste qui tourne autour d'une étoile, le Soleil. Huit autres planètes avec pour la plupart des satellites font la même chose, notre système solaire. »</p> 
<p>Mais les images et les mots cachent souvent le fait que l'on ne comprend pas !</p>	<p>Mais les images et les mots cachent souvent le fait que l'on ne comprend pas !</p>

Figure 13 • Fiche « remise en cause »

La seconde partie du texte situe l'obstacle. Elle livre ensuite un profil général de la « croyance-classe » (figure 14).



Un complément d'information	
En fait, si tout le monde a déjà vu des images de l'intérieur d'un corps humain, nombreux restent ceux qui, dans leur tête, ne comprennent pas pour autant comment « ça marche ».	Si tout le monde a déjà vu des images d'une Terre ronde, nombreux restent ceux qui, dans leur tête, ne vivent pas pour autant sur une planète en forme de <i>boule</i> .
 <p><i>Presque tous les élèves de la classe savent que nous devons nous nourrir et que la nourriture va de la bouche aux intestins en passant par l'œsophage et l'estomac. Pourtant, rares sont ceux qui savent dessiner les organes au bon endroit et expliquer ce qui se passe.</i></p>	 <p><i>Parmi les élèves de la classe, alors que presque tous dessinent un rond pour représenter la Terre, plus de la moitié se disent que le sol où ils marchent est parfaitement plat. Ils pensent souvent que le ciel est étiré au dessus du sol ou en forme de couvercle arrondi.</i></p>
Bref, dire des choses justes sur la digestion ne signifie pas savoir vraiment ce que c'est...	Bref, tracer un rond peut dire que la Terre est plate (disque) ou creuse (sphère). Pourtant...

Figure 14 • Fiche « suggestion »

Ces fiches individuelles sont introduites par un ou deux élèves « synthétiseurs » qui les recontextualisent (renvoi aux prélèvements). La plus grande partie est communiquée à l'ensemble du public *via* les représentants lecteurs (quand il y en a). Il faut s'assurer que les contenus sont bien compris et laisser vivre les divers retentissements (mise en débat si possible).

L'enseignant prendra le relais afin de présenter les réponses anonymées des apprenants. Il recourt à des transparents sur rétroprojecteur. En voici quelques exemples (figures 15, 16, 17, 18).

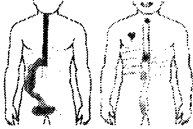
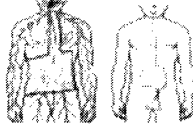
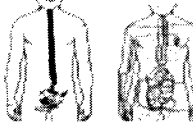
Les organes de la digestion		
 <p><i>Souvent des tuyaux</i></p>	 <p><i>Parfois des estomacs</i></p>	 <p><i>Rarement des intestins</i></p>

Figure 15 • Fiche réponses en dessin




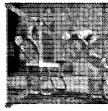
Les associations d'idées			
 <p><i>Manger</i></p>	 <p><i>Croiser les bras à table</i></p>	 <p><i>Être malade</i></p>	 <p><i>Ne pas se baigner</i></p>

Figure 16 • Fiche « réponses verbalisées »

En biologie comme en astronomie, on renvoie seulement ce qui s'est exprimé.

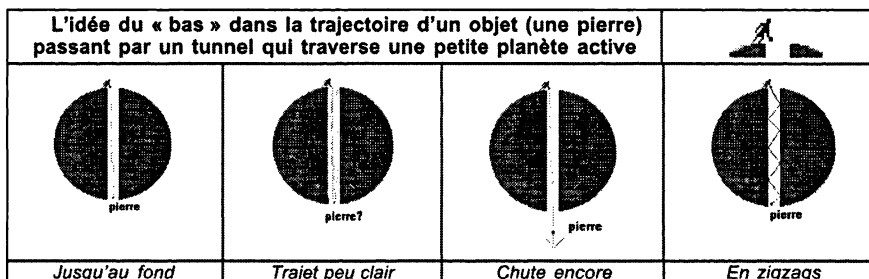


Figure 17 • Fiche retour « un tunnel »

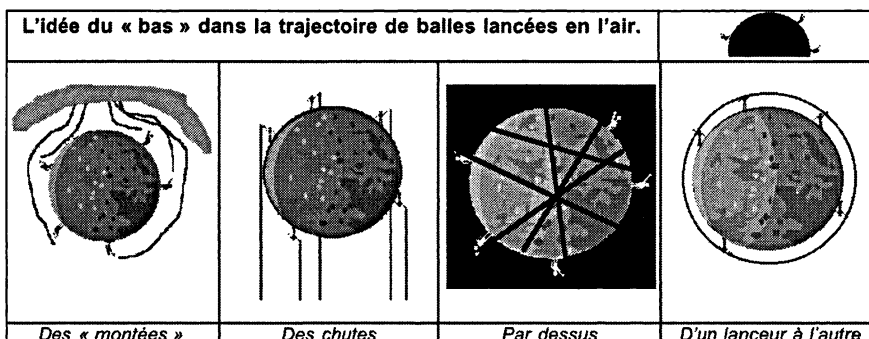


Figure 18 • Fiche retour « trajectoires »

On resserre ensuite dans chaque registre sur les trois conceptions majeures. Pour la digestion, ressortiront les idées de tuyaux avec ou sans poches, plus ou moins longs, et d'aliments qui vont ici ou là, ou partout, et ne sortent généralement nulle part (images génériques à l'appui). Pour le monde, seront introduits les modèles du disque, de la sphère et de la boule, ainsi que les composantes ciel/espace et direction « bas » (également illustrés).

Ce travail est préparatoire aux explications que vont individuellement reformuler les élèves dans les phases de confrontation (conflit socio-cognitif). L'enseignant dessinera pour chaque concept abordé une série identique de supports (silhouette asexuée pour la digestion, cercle central pour la Terre). Il demandera à chaque enfant de redessiner « en grand » et de commenter « pour que chacun comprenne comment il pense les choses ». Des interpellations nombreuses et parfois houleuses auront lieu. Le maître veille essentiellement à ce que tous les avis puissent se faire entendre. Les échanges doivent être perturbés quand la force de conviction prend trop le pas sur la raison. Un ou deux « reformulateurs » seront désignés pour relancer les débats à d'autres moments de la scolarité. Ces retours se font vite boussole pour l'action. Reste encore à « lutter contre » les freins.

2.2. Favoriser quelques franchissements d'obstacles

Au vu de ce que retourne la classe, peu de concepts peuvent être réellement retenus. Ils touchent principalement à la topographie digestive ainsi qu'à la physiologie et à l'activité terrestres (voir l'exemple en infra). De là un éclairage qui se voit limité. D'un côté, on sensibilise à la mastication et à l'excrétion (biologie), de l'autre, on s'attache aux stabilisations de forme et d'espace (astronomie) puis, ultérieurement, de pesanteur.

En biologie, plusieurs séances ont favorisé l'accès aux premiers éléments de réponse. Des observations concrètes (mâcher de la mie de pain, etc.) et quelques expériences chimiques sur des aliments (dégradation/changement) ont incité à prendre conscience de certaines transformations dans la bouche (avec rôle des dents, de la salive, de la langue). La dissection d'un lapin a aidé au repérage des différents organes et a familiarisé avec l'idée de système (pas de coupure entre les deux extrémités). Les contenus respectifs de l'intestin grêle (aliments liquéfiés) et du gros intestin (excréments) ont sensibilisé à la notion de déchets. Il restait encore à bousculer la fermeture des esprits (résistance) manifestée devant l'obligation d'excrétion. Le groupe « impliqué » a alors proposé une progression intitulée « *Pour vous aider à mieux comprendre le rôle de la digestion* ».

Deux faux jumeaux (Bernard et Nathalie) s'occupent d'un cobaye (« Magdo ») qui dévore sans vraiment grossir. La fiche n° 1 (« situation pour tous ») interpelle la surprise des enfants en développant une conception de cumul alimentaire sur une quinzaine de jours (figure 19).



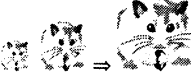
Problématisation avec une hypothèse qui ne tient pas		
		Si « Magdo » ne faisait que « rentrer » dans son corps de la nourriture $150g + 150g + 150g \dots + 150g = 2250g$ 
« Magdo » à son arrivée	15 jours après (+ 80 g)	Mais pas de méga « Magdo »

Figure 19 • Fiche « questionnement »

Le décalage du résultat « conservation pure » (gain de 2,5 kg) avec la réalité (masse augmentée de 80 g) interroge. Cela conduit à formuler un certain nombre de conjectures (transformation invisible, consommation excessive, etc.) On propose ensuite une expérimentation pour mieux comprendre l'idée « d'entrée-sortie » (figure 20). Il s'agit de mesurer ses propres variations pondérales durant 24 heures en prenant acte d'un apport quantifiable de nourriture.


Pour vous aider à	
	Nous mangeons tous les jours
Une balance.	Aujourd'hui, observons et mesurons.
Le à 11h30, je pèse avant le repas	<input type="text"/>
J'avale :	
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
..... ça pèse	<input type="text"/>
En tout ça pèse	<input type="text"/>
Le à 13h30, je pèse après le repas	<input type="text"/>
Le lendemain à 11h30, je pèse avant le repas	<input type="text"/>
Et pourtant, j'ai encore mangé et bu au dîner hier soir et au petit déjeuner ce matin.	
Date :	Prénom : Classe :

Figure 20 • Fiche d'observations individuelles

l'enseignant) communique au collectif les nombres obtenus (masse initiale, ration alimentaire, et masse post-collation). Un rapport est rapidement identifié : le gain lié au repas.

Une autre colonne complète ensuite les résultats avec le poids relevé environ trois heures plus tard. La différence donne lieu à un débat qui permet la formulation d'un certain nombre d'hypothèses (défaut lié à l'instrument balance, transpiration en récréation, passage aux toilettes, transformation en muscles, etc.) Les derniers relevés (lendemain de l'expérience) donnent naissance à une quatrième colonne. Le retour approché à la masse de la veille surprend les enfants (« *Pourtant Maître, on a mangé hier soir et ce matin !* »). C'est l'occasion d'échanger des idées, de reprendre les hypothèses émises antérieurement, de proposer d'autres activités.

Ce travail sur cobaye humain reviendra, en première étape, à distinguer la nourriture qui entre (consommée), celle qui est utilisée (absorbée), et celle qui est rejetée (excrétée). La dernière va permettre de revenir à la situation initiale (figure 21).

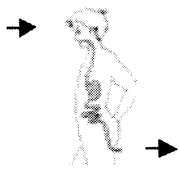
<p>Bernard et Nathalie avaient oublié que l'appareil servant à la digestion a deux L'un correspond à la et l'autre à l'.....</p> <p>Ils auraient du être plus « détectives » pendant le nettoyage de la cage...</p>	
<p>Une explication plus opératoire (idée d'indicateurs)</p>	

Figure 21 • Fiche tremplin

À 11h 30, chacun s'est pesé avant le repas pris en commun dans la salle de classe. Le poids de tous les aliments ingérés (liquide et solide) est ensuite noté (fiche ci-contre). Chaque résultat est ratifié par un partenaire (travail en binôme). Ce déjeuner en commun se termine vers 12h15. À 13h30, un autre relevé de la masse individuelle est effectué (ainsi qu'à 16h15, sur la suggestion d'un élève). Enfin, le lendemain, à 11h30, a lieu une dernière pesée pour chacun.

On procède à une première exploitation des données. Après avoir constaté les variations inter-individuelles de masse (corporelle), les enfants effectuent un calcul (somme pesante des aliments personnellement ingérés). Peu après, un tableau à double entrée (réalisé par

L'action se poursuivra avec une réflexion collective sur la possibilité d'énoncer clairement ce qui a été (re)découvert activement (les contenus devront suivre la diversité des conceptions). Un niveau de formulation est un énoncé devant correspondre à un seuil (dans l'abstraction) que l'on a atteint (figure 22). Il ne doit en aucune façon être confondu avec un niveau linguistique. Il constitue un « objectif conceptuel » (Giordan & de Vecchi, 1989). L'idée visée quant à la digestion mécanique se réduit volontairement ici (spécificité du public) à une trajectoire en entrée-sortie avec premier passage organique obligatoire et double évacuation.

Formulation pour l'obstacle « absence d'excrétion »		
Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
(prévoir un codage par dessins) <i>Une personne va aux toilettes régulièrement. Elle perd ainsi un peu de poids.</i>	<i>Une partie des aliments entrés par la bouche sera rejetée dehors. L'anus et le sexe sont deux sorties visibles.</i>	<i>La partie des aliments non digérés passe dans le gros intestin, avant d'être rejetée à l'extérieur par l'anus (matière solide) et par le sexe (liquide).</i>

Figure 22 • Fiche « structuration »

Des fiches de réinvestissement et de stabilisation (« situation pour soi ») consolideront les acquis. On insiste notamment sur une critique possible des illustrations proposées par les livres (figure 23).

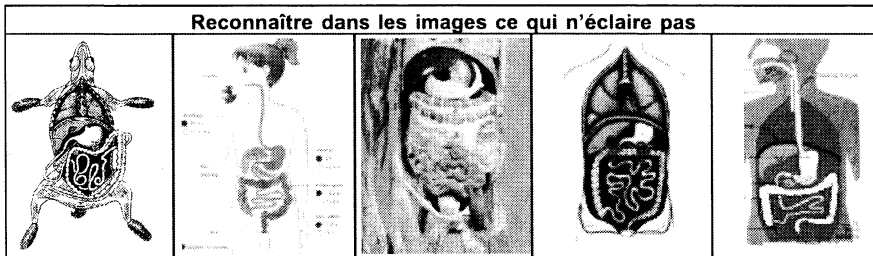


Figure 23 • Fiche « critiques »

Une communauté de fonctionnement (registre animal) est également privilégiée (figure 24).

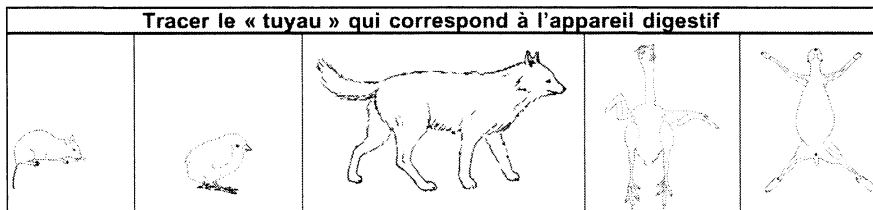


Figure 24 • Fiche « réinvestissements »

L'ensemble, à renfort de confrontations (entre pairs, avec des documents, etc.) et de quelques perturbations (introduites par le maître) conduira progressivement à de nouveaux niveaux de formulation (implication cette fois des « organes-poches », autre objectif conceptuel).

En astronomie, le principe adopté est le même (figure 25). La remédiation se fait parallèlement à des activités plus classiques (elles-mêmes informantes d'obstacles). On compte parmi celles-ci l'observation-relevé (ciel-météo, alternance jour/nuite, phases lunaires, course du Soleil) et des simulations (rondes, mini-planétarium, géorama, célescope). On propose également des constructions (cadran solaire, boussole, etc.), et de petits questionnaires sur séquences vidéo (émissions « Tous sur Orbite », « E = M6 », « Contes de l'univers », etc.). On recourt par ailleurs à la symbolique du ciel comme à l'imaginaire de l'espace (mythologie et constellations, comparatif des lectures d'une civilisation à l'autre, projections modernes). On établit enfin des liens avec le temps humain (noms des jours de l'année, signification d'un mois et d'une année, rites sociaux).




Quelques activités périphériques		
		
Codages météo du jour	Fabrication d'un hélioscope	Simulation au télescope

Figure 25 • Fiche « renforcements »

Les fiches spécifiques pour l'écueil de la rotondité passe par une observation (rapportée) suivie par une simulation (collective). La première exploite un argument ancien (la forme d'un navire au large, figure 26). Elle s'inscrit en continuité avec une étude sur l'apparition de la vie dans l'eau. Le point de départ est un constat de femmes de marins.


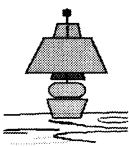



Lorsque les épouses regardent partir le navire				
				
Bateau rentré au port	Bateau sortant du port	Disparition: 1°) coque, 2°) voiles, 3°) mât		

Figure 26 • Fiche « observation rapportée »

On se sert de cette observation (si possible confortée par un film) pour provoquer la réflexion sur la forme de notre planète (à l'appui de la vision différente avec une Terre plate, figure 27).

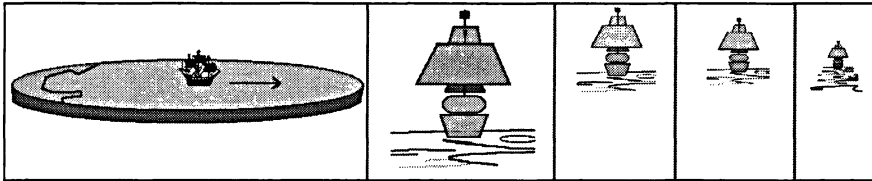


Figure 27 • Fiche « monde plat »

Le décalage (à rendre concret avec carton et modèle réduit) est ensuite lesté d'un vécu-boule (cette fois avec gros ballon de plage, bateau pliage et figurine, figure 28).

Par tâtonnements successifs, les élèves découvrent ce que l'on peut seulement voir du voilier (notion de champ de vision). Sur la fiche récapitulative, on structure cela en dessinant en pointillés ce que les yeux saisissent. On revient autant de fois que nécessaire aux manipulations à plus petite échelle.

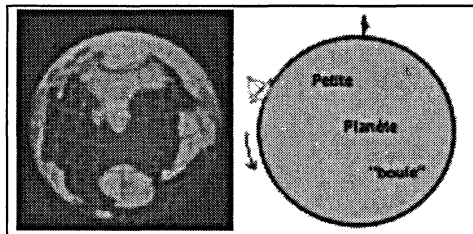


Figure 28 • Fiche récapitulative

Ce que les femmes de marins ont remarqué (disparition morceau par morceau) s'explique donc en ramenant à de plus grandes proportions (on peut jouer un temps sur la taille du ballon). Cette responsabilité de la forme planétaire va se confirmer avec une autre observation (figure 29).

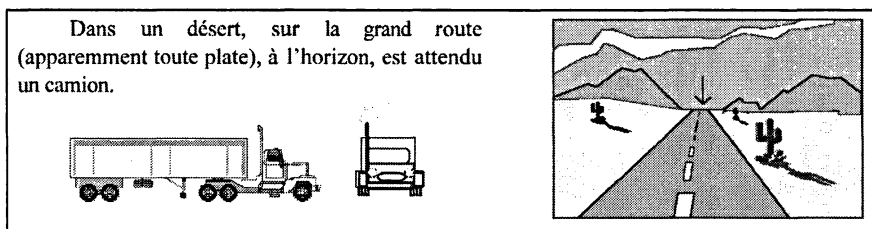


Figure 29 • Fiche anticipation

Il convient (« situation pour soi ») de réfléchir et de dire ce qui se verra chronologiquement (figure 31). Un détour par la situation maquette (plateau, ballon, véhicule en modèle réduit) est autorisé.

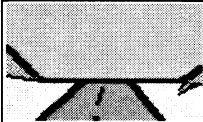
			
En premier	Juste après	En troisième	En quatrième

Figure 30 • Fiche « ordre d'apparition »

On fera ensuite varier la forme des objets (navire et camion) puis on alternera le sens du déplacement (départ-arrivée, disparition-apparition), voire la position du sujet (assis, allongé). On reprendra les deux cas de figure (en synthèse notions-images) pour relancer sur de nouveaux. Le lien avec l'espace peut s'envisager avec la perception d'une étoile ou d'une constellation à différents endroits de l'hémisphère (actuellement à l'étude). Le concept de gravitation doit également donner lieu à une sensibilisation concrète et évolutive (en cours de réalisation).

Là encore, l'action se poursuit avec une réflexion collective sur la possibilité d'énoncer clairement ce qui a été (re)découvert activement (figure 31). Nous distinguons cette fois deux étapes dans notre « objectif conceptuel » (planète boule en mouvement dans un système étoile). On remarquera que ce dernier, contrairement à ce qui se passait avec la digestion, finit par rejoindre les concepts approchés (forme et espace).

Formulation pour l'obstacle « plateau planétaire »	
Niveau 1	Niveau 2
<p>(prévoir un codage par dessins)</p> <p><i>Presque tous les jours, on voit le soleil se lever, se déplacer dans le ciel, redescendre et disparaître en fin de journée.</i></p> <p><i>Notre monde est couvert de montagnes, de plaines, de plateaux et de beaucoup d'eau.</i></p> <p><i>Les étoiles sont visibles la nuit mais pas le jour.</i></p> <p>Référence : vécu quotidien approche du concept de temps, de relief, de mouvement apparent</p>	<p><i>La Terre est ronde, même si on a l'impression qu'elle est plate. C'est une boule et on vit dessus.</i></p> <p><i>Elle fait chaque jour un tour sur elle-même (rotation), même si on a l'impression que la nuit tombe et que le jour se lève.</i></p> <p><i>C'est une planète qui appartient au système solaire ; elle tourne autour du Soleil en un an (révolution), même si on a l'impression que c'est lui qui bouge le jour et les étoiles la nuit.</i></p> <p>Référence : système solaire élargissement du concept d'espace et de forme, intégration de la relativité d'un phénomène</p>
(RUPTURE (vers 10-11 ans)	

Figure 31 • Fiche formulation

Les instruments et démarches étant explicités, voyons quels effets sont mesurables (préoccupation n° 3 de l'initiative).

3. DES RÉSULTATS ENCOURAGEANTS

Cette modification des procédures métamorphose la dynamique de la classe, notamment les attitudes des enfants, plus confiants, davantage

présents. Reste qu'une expérience de cette nature, pour contribuer au changement dans les pratiques, doit aussi convaincre quantitativement. Or, des bénéfiques peuvent être ici évalués, et ce au niveau des conceptions interpellées (biologie et astronomie). Il suffit de comparer les résultats obtenus par les deux groupes d'enseignants (expérimental-« impliqué » et témoin-« intéressé »). À cet effet, les productions du public CLIS 1 sont prélevées à deux périodes de l'année (octobre et fin mai, sur mêmes supports : fiches « diagnostic », voir supra 1).

Nous présentons l'évolution chiffrée des profils de classes dans les deux équipes constituées, en commençant par le concept de digestion.

3.1. Des écarts en biologie

Rappelons que les données recueillies ont permis de distinguer trois conceptions majeures (localisation, diffusion, organique). Cette typologie, différente de la classification en classes dites « ordinaires » (présence d'excrétion et chimie à l'œuvre), obtient sur l'année des fréquences qui varient diversement pour chacun des trois items. Nous commençons avec le groupe témoin ou « intéressé », de 41 apprenants (tableaux 1 à 4).

Phénomène d'excrétion

Enseignants	Octobre					Fin mai				
	C.	Sy	Sé	M.-L.	A.	C.	Sy	Sé	M.-L.	A.
Ignorance	100	60	85	67	33	100	30	55	50	40
Moyenne	69					55				

Tableau 1 • Évolution des conceptions « excrétion » en pourcentages

On constate que la méconnaissance tend à diminuer au fil de l'année scolaire (à l'exception de la 1^{re} classe).

Représentation graphique des organes

Enseignants	Octobre						Fin mai					
	C.	Sy	Sé	M.	A.		C.	Sy	Sé	M.	A.	
Bouche	100	80	57	83	100	84	16	50	100	70	90	65
Œsophage	67	60	29	100	67	64	83	80	55	100	75	79
Estomac	0	20	14	33	50	23	33	40	22	42	55	38
Intestin	0	30	0	33	0	13	0	20	33	40	23	23
	Moy						Moy					

Tableau 2 • Évolution des conceptions « organes » en pourcentages

En dépit de la grande hétérogénéité des fréquences, on remarque une réduction concernant le premier élément au profit des trois suivants.

Notion de système (octobre puis fin mai)

	Localisation	28,5	14,5	↘
Répartition classes	Diffusion	20	3,5	↓
	Organique	21,5	82	↗

Tableau 3 • **Évolution des conceptions « système » en pourcentages**

Répartition dans la trajectoire organique (octobre puis fin mai)




 Tuyau	 T. + Poche	 T. + P. + Excrétion
14,5	32	5
36	37	9

Tableau 4 • **Évolution des conceptions « trajet organique » en pourcentages**

Il ressort que la conception de type organique augmente pendant que les deux autres diminuent. Elle se développe tout particulièrement en représentation « tuyau » (plus du double).

Passons cette fois aux résultats obtenus par le groupe expérimental (ou « impliqué », 41 apprenants), en les communiquant selon le même déroulement (tableaux 5 à 8).

Phénomène d'excrétion

Enseignants	Octobre					Fin mai				
	A.	F.	P.	C.	M.	A.	F.	P.	C.	M.
Ignorance	45	60	70	83	50	20	20	30	0	28
Moyenne	66					20				

Tableau 5 • **Évolution des conceptions « excrétion » en pourcentages**

On constate que la méconnaissance diminue fortement au fil de l'année scolaire dans toutes les classes (particulièrement chez C.).

Représentation graphique des organes

Enseignants	Octobre						Fin mai						
	A.	F.	P.	C.	M.		A.	F.	P.	C.	M.		
Bouche	78	80	50	83	100	78	80	70	80	84	100	83	
Œsophage	67	50	40	100	75	66	100	80	70	100	100	90	
Estomac	23	40	20	100	50	46	60	80	80	100	71	78	
Intestin	0	20	20	0	0	8	60	90	50	100	71	74	
	Moy												Moy

Tableau 6 • **Évolution des conceptions « organes » en pourcentages**

En dépit de l'hétérogénéité des fréquences, on remarque une augmentation générale, peu significative avec la composante « bouche » mais manifeste avec la composante « intestin ».

Notion de système (octobre puis fin mai)

	Localisation	28	14	↘
Répartition classes	Diffusion	20	3	↓
	Organique	51	82	↑

Tableau 7 • **Évolution des conceptions « système » en pourcentages**

Caractéristiques de la trajectoire organique (octobre puis fin mai)




		
Tuyau	T. + Poche	T. + P. + Excrétion
10	33	8
12	14	56

Tableau 8 • **Évolution des conceptions « trajet organique » en pourcentages**

Il ressort que la conception de type organique augmente pendant que les deux autres diminuent. Cette fois elle se développe particulièrement en représentation « excrétion ».

Bilan 1

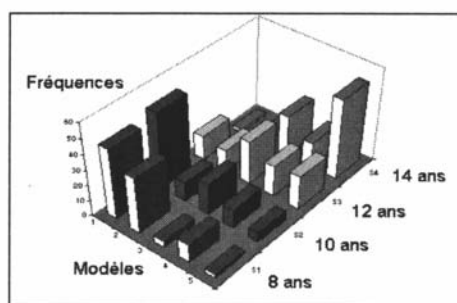
On voit donc que les profils des groupes sont au départ assez similaires. En revanche, les évolutions sur 8 mois montrent une différence indé-

niable. Avec le groupe « impliqué » le phénomène de l'excrétion, lequel a fait l'objet d'un travail de remédiation (tuyau à deux bouts), est intégré par un élève sur deux. Cela retentit favorablement sur l'identification et la compréhension du rôle de trois organes (estomac et intestins).

3.2. Des écarts en astronomie

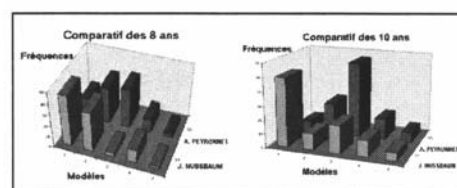
Rappelons que les données recueillies (prélèvements) ont permis de distinguer trois conceptions majeures (plan-disque, sphère clivée, boule non gravitationnelle). Cette typologie, qui est différente de celle identifiée en classes de type ordinaire (graphes 1 et 2), obtient également sur l'année des fréquences qui varient diversement (graphes 3, 4, 5 et 6). Ces premiers résultats autorisent à mieux caractériser le public CLIS 1.

Selon J. Nussbaum (1991), en classe « ordinaire » on trouve cinq modèles (dont deux avec idée de gravité). Ces derniers montrent un déplacement du modèle 1 vers le n° 3 vers 10 ans, lequel se confirme à 12 ans (avec croissance du nombre de représentants en n° 4 et 5). Deux années plus tard, la conception de type « savant » (boule barycentrée) domine.



Graphe 1 • La typologie ordinaire selon J. Nussbaum

A. Peyronnet (1993, 1998) confirme la présence des cinq modèles de monde chez les enfants de 8 et 10 ans. Les deux dernières conceptions se retrouvent même à des fréquences comparables (12 % en n° 4 et 3 % en n° 5). En revanche, au vu des résultats, le primat (dominant) se déplace pour les plus jeunes en modèles 2 et 3 puis, pour les autres, en type n° 3.

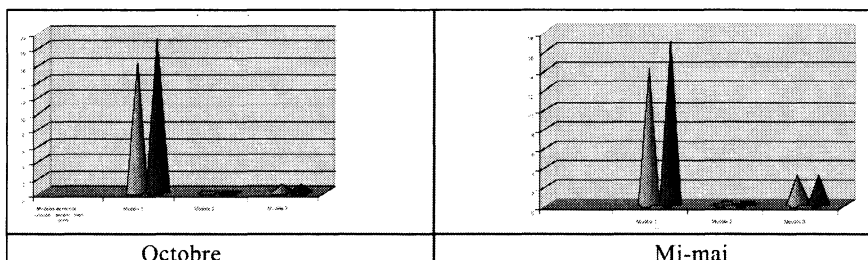


Graphe 2 • Le désaccord de A. Peyronnet

Ces études, même avec leurs contrastes, permettent de ratifier des différences. Chez une population de classes d'intégration, on ne retrouve jamais les modèles n°4 et 5 pas plus qu'une dominante en type 3, quelle que soit d'ailleurs la classe d'âge.

Ces distances s'affirment dans le comparatif de notre expérience. Nous commençons, comme précédemment avec le groupe témoin.

Modèles présents pour 2 classes d'âge (en gris clair 8-9-10 ans et en gris foncé 11-12 ans) [groupe témoin]

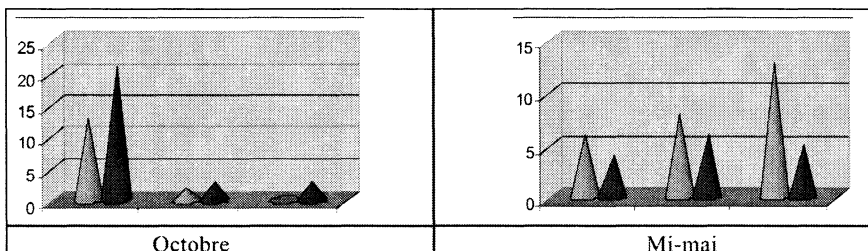


Graph 3 • Typologie initiale (groupe témoin)

Graph 4 • Typologie initiale (groupe témoin)

Le modèle 1 version plan-disque est dominant, le suivant inexistant, le troisième peu représenté. Il n'y a guère de changement entre les deux périodes, si ce n'est le glissement de quatre élèves (deux pour chaque classe d'âge) de la conception dite 1-2 vers la n° 3.

Modèles présents pour 2 classes d'âge (en gris clair 8-9-10 ans et en gris foncé 11-12 ans) [groupe expérimental]



Graph 5 • Typologie initiale (groupe expé.)

Graph 6 • Typologie initiale (groupe expé.)

Le modèle 1 version plan-disque est d'abord dominant puis cède la place dans les deux classes d'âge au profit des deux suivants. On note que les plus jeunes passent majoritairement en modèle de type 2 et que les plus anciens font de même en conception 3.

Bilan 2

On voit que les profils des groupes sont au départ encore assez similaires. Comme en biologie, les évolutions sur 8 mois montrent une différence significative. Avec le groupe « impliqué » le concept de monde, lequel a fait l'objet d'un travail de remédiation (rotundité), est transformé chez trois élèves

sur quatre (en sphère et boule). Cela retentit sur la nature de l'espace (tout autour et non plus en plafond hémisphérique).

CONCLUSION

Les enfants scolarisés en CLIS 1 ne doivent plus être écartés de la rationalité techno-scientifique. Il est aberrant de leur proposer des connaissances à seulement mémoriser ou des activités sporadiques sur des questions décousues. Être en grande difficulté d'apprentissage ne doit pas confiner dans le concret, en interdisant *a priori* tout accès à l'abstraction. Ce que beaucoup croient déterminé par l'étiologie peut évoluer grâce à une pédagogie du passage. Le modèle allostérique de l'apprendre peut aider à aller dans ce sens. Il modifie la posture enseignante en insistant sur l'importance d'un environnement stimulant pour l'élève.

L'expérience conduite dans le Puy-de-Dôme, « *Faire aussi des sciences en CLIS* », s'inspire de cette approche volontairement pragmatique. Elle obéit à cinq préoccupations majeures : rencontrer l'univers des têtes (pensées enfantines), caractériser les conceptions de ce public, définir des objectifs conceptuels adaptés, accompagner l'appropriation de nouvelles connaissances, évaluer l'action. Elle rappelle qu'il faut d'abord répondre aux interrogations des apprenants pour les voir produire des significations plus efficaces. Elle montre qu'après un certain nombre d'ajustements et l'élaboration d'un matériel adapté, un public « non ordinaire » (scolarisé en structure spécialisée) réussit aussi à faire évoluer ses représentations. Les résultats obtenus dans l'approche des concepts de digestion et de monde en témoignent (évolution des niveaux de formulation). Ils traduisent une avancée en décentration et compréhension (recul significatif des obstacles « tuyau fermé » et « Terre-plate »).

Cette faisabilité devrait encourager à plus d'actions et à davantage d'interrogations. Ainsi, on doit encore se demander comment aménager des passerelles différenciées vers les autres dimensions de la mécanique digestive (fragmentation, péristaltisme, etc.) Cela réclame là encore de faire preuve d'inventivité et de bien cibler les attentes. Il faut également examiner parmi les autres concepts en biologie et en astronomie lesquels sont susceptibles d'accrocher ce public. On pense notamment à ceux d'évolution humaine, de reproduction, de circulation sanguine puis à ceux de gravitation, d'univers, d'espace temps. On est enfin tenu de se préoccuper des ouvertures possibles avec d'autres disciplines scientifiques. Ici une initiative interpellant la chimie est déjà engagée par notre équipe, les premiers résultats sont plus qu'encourageants (programme parallèle « chimie contre magie », Martinet & Tressol, 2003).

Peut-être est-il temps de se rappeler que pédagogie et didactique ne prennent tout leur sens que dans la résistance du public auquel on imagine trop souvent s'être adapté.

« L'Indéterminé, le toujours ouvert commandent de refuser les définitions et les dualismes simplificateurs, le normal et l'anormal, le doué et le "nul"... Toute catégorisation fait écran à l'enfant réel, interdisant le processus de personnalisation. »

M. DEVELAY, C. GARDOU (2001, p. 22)

BIBLIOGRAPHIE


- ALMANY C. & SARRATE J. (1986). Un taller de astronomia. *Cuadernos de Pedagogia*, n° 136, pp. 11-14.
- BAXTER J. (1989). Children's understanding of familiar astronomical events. *International Journal of Science Education*, n° 11, pp. 502-513.
- BULLETIN OFFICIEL, ADAPTATION ET INTÉGRATION SCOLAIRES (2002). *Les dispositifs de l'adaptation et de l'intégration scolaires dans le 1^{er} degré*, n° 19 du 09-05-2002. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- CLÉMENT P. (1991). Sur la persistance d'une conception : la tuyauterie continue digestion-excrétion. *Aster*, n° 13. pp. 133-155.
- DEVELAY M. & GARDOU C. (2001). Ce que les situations de handicap, l'adaptation et l'intégration scolaires "disent" aux sciences de l'éducation. *Revue française de Pédagogie*, n° 134, pp. 15-24.
- DUMAS J.E. (2003). *Psychopathologie de l'enfant et de l'adolescent*. Bruxelles, De Boeck.
- ESTALELLA R. (1986). *El mundo de las estrellas*. Barcelona, Onda, La Mirilla.
- GARDOU C. (1999a). *Connaître le handicap, reconnaître la personne*. Toulouse, Éditions Érès.
- GARDOU C. (1999b). Quelle intégration pour le troisième millénaire. *Psychologie & Éducation*, n° 38, pp. 29-38.
- GIORDAN A. (1995). *Comme un poisson rouge dans l'homme*. Paris, Payot.
- GIORDAN A. (1998). *Apprendre*. Paris, Belin.
- GIORDAN A. & De VECCHI G. (1989). *L'enseignement scientifique : comment faire pour que ça marche ?* Toulouse, Z'éditions.
- GIORDAN A. & De VECCHI G. (1987). *Les origines du savoir*. Paris, Delachaux et Niestlé.
- GUYÉNOT É. (1941). *Les Sciences de la vie aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris, Albin Michel.
- MARTINET P. & TRESSOL J.-F. (2003). Chimie contre magie : une entrée pour construire la pensée. Expérimentation et construction des concepts. Les sciences de l'école primaire à l'université. *Résumé des communications au Colloque international sur l'enseignement des sciences*, n° 26, p. 54.
- NUSSBAUM J. (1990, 1991). La perception par les élèves des concepts astronomiques. *Les Cahiers Clairaut*, n° 52 à 55.
- PEYRONNET A. (1993). *Raison, Science, Éducation, l'impératif d'une mutation*. Thèse de doctorat, université Lumière-Lyon 2.
- PEYRONNET A. (1998). *Les conceptions des apprenants en astronomie au cycle 3*. Non publié.
- ROLANDO J.-M. (1995). *Des méthodes pour l'astronomie*. Annecy, CDDP de Haute-Savoie.

ROLLAND A. & MARZIN P. (1996). Étude des critères du concept de vie et identification d'obstacles épistémologiques chez des élèves de sixième. *Didaskalia*, n° 9, pp. 57-82.

SAUVAGEOT-SKIBINE M. (1991). La digestion au collège : transformation physique ou chimique ? *Aster*, n° 13, pp. 93-100.

VOSNIADOU S. & BREWER W.F. (1992). Mental models of the earth : A study of conceptual change in childhood. *Cognitive psychology*, n° 24, pp. 535-585.

Cet article a été reçu le 7/01/2003 et accepté le 12/02/20004.



Mise en place de situations problèmes pour l'apprentissage de la stœchiométrie en classe de seconde : compte rendu d'innovation

A problems situations for the approach of stœchiometry with fifth form's groups : report of innovation

André LAUGIER, Alain DUMON

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

Résumé

L'objet de la recherche consiste à élucider ce qui entre en jeu lors d'un processus d'apprentissage où les élèves sont engagés dans une démarche de résolution de problèmes impliquant l'utilisation de l'équation de réaction et du concept de mole pour établir un bilan de matière. Une série de situations relatives à l'étude de la précipitation de l'hydroxyde de cuivre ont été élaborées en référence à la théorie des situations didactiques. Nous avons observé une très grande résistance des élèves à circuler entre les registres macroscopique, nanoscopique et symbolique pour résoudre les problèmes. Une série

d'obstacles qualifiés d'épistémologique, de sens commun, didactique et mathématique ont été mis en évidence.

Mots clés : *stœchiométrie, mole, équation de réaction, situation problème, obstacle.*

Abstract

The object of the research consists of elucidating what comes into play when pupils undertake to solve a problem that implies the use of the equation of reaction and of the concept of mole to establish a balance sheet of matter. A series of situations relating to the study of the precipitation of copper hydroxide have been developed in reference to the theory of didactic situations. At pupils' level we have witnessed a very strong reluctance to contemplate the varied ranges – macroscopic, nanoscopic or symbolic – to solve the problems. A series of obstacles that are described as epistemological, common sense, didactic and mathematical have been demonstrandum.

Key-Words : *stoichiometry, mole, equation of reaction, problem-situation, obstacle.*

INTRODUCTION

À l'issue de la classe de seconde (16 ans), face à une transformation de la matière, un élève doit savoir reconnaître une transformation chimique, quels sont les concepts qui l'organisent, comment il est possible de représenter un tel phénomène, quel langage permet de communiquer des connaissances à son sujet, comment l'utiliser pour réaliser un bilan de matière. Derrière les objectifs assignés à l'enseignement de la chimie, c'est toute l'activité des philosophes et des scientifiques depuis deux mille ans, autour de la matière et de ses transformations, qui se trouve concernée (Laugier & Dumon, 2001).

En effet ce n'est que vers la fin du premier quart du XX^e siècle que le niveau de formulation du modèle de la transformation chimique tel qu'il est enseigné aux élèves s'est stabilisé (Dumon & Laugier, 2004) ; à savoir que :

- **dans le registre macroscopique**, la transformation chimique est un processus de réorganisation des atomes des substances de départ par lequel se forment de nouvelles substances. Cette transformation, qui se produit entre des collections de particules, est modélisée à l'aide d'une équation de réaction respectant la conservation des éléments. Cette équation permet d'effectuer un bilan en masse en utilisant la variable avancement ;

- **dans le registre nanoscopique**, la transformation chimique est un processus qui fait intervenir les électrons des couches de valence des atomes ;

atomes unis par des liaisons covalentes au sein de molécules ou sous forme d'ions. Durant la réorganisation des atomes, des liaisons se rompent d'autres se forment. Les atomes sont constitués de particules subatomiques. Ils sont représentés par le symbole de l'élément correspondant, son numéro atomique, un nombre de masse, et possèdent une certaine structure électronique. Le nombre de liaisons (ou la charge des ions) qui peuvent être formées par un atome est lié à cette structure. La mole est l'outil qui permet de passer de la description nanoscopique de la réaction chimique à sa description macroscopique.

Barlet & Plouin (1994) qualifient l'équation de réaction de concept intégrateur et polysémique. Intégrateur en ce sens qu'il permet de rendre compte de l'observation expérimentale à l'échelle d'une très grande population d'entités chimiques mais qu'il ne prend sens que grâce au recours à l'échelle atomique ou moléculaire. Ce passage de l'observation à la modélisation nécessite la maîtrise de concepts du registre nanoscopique (atome, élément, molécule, ion, masses atomiques et moléculaires), du registre macroscopique (espèces chimiques, corps simples, corps composés, masses molaires), du registre symbolique (symboles des éléments, formules des espèces chimiques, coefficients stœchiométriques) et enfin de l'opérateur qui permet de « *faire le transfert de l'individu chimique non observable à une collection d'individus chimiques observables* » (Barlet & Plouin, 1994, p. 31). Polysémique, parce que l'équation chimique « *présente des significations multiples, elle prend appui sur de l'explicite, elle suggère le 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* » (Barlet & Plouin, 1994, p. 46).

C'est donc un concept complexe dont la maîtrise nécessite une forte capacité d'abstraction. Il serait illusoire de croire, qu'alors que les scientifiques ont mis des siècles à le construire, les élèves seraient capables de l'utiliser pour l'établissement de bilans en masse (compétence attendue en fin de seconde) sans rencontrer de problèmes. Nous formulons l'hypothèse que c'est la difficulté rencontrée par les élèves dans la mise en relation de la phénoménologie macroscopique observée avec une phénoménologie nanoscopique imaginée qui ne leur permet pas d'utiliser correctement le registre symbolique pour rendre compte de la transformation chimique (Laugier & Dumon, 2000).

De nombreux chercheurs se sont intéressés aux conceptions que se font les élèves des transformations chimiques de la matière et aux difficultés qu'ils rencontrent dans les différents registres d'appréhension (macroscopique, nanoscopique, symbolique). Leurs travaux ont été analysés par différents auteurs (Fillon, 1997 ; Barker, 2000 ; Laugier & Dumon, 2000) et nous avons rassemblé dans le tableau 1 leurs principales conclusions. Seules seront résumées ici les difficultés rencontrées au niveau de l'équation bilan (pour un état des lieux plus détaillé cf. Furio *et al.*, 2002).

Dans le registre symbolique il y a à la fois des concepts qui renvoient exclusivement au registre macroscopique (masse, volume, nom), au registre nanoscopique (représentation d'un atome, d'une molécule, d'un ion) et aux deux registres (symbole de l'élément ou de la particule, formule). C'est par le registre symbolique que se fait le lien entre les registres macroscopique et nanoscopique. Yaroch (1985) a mis en évidence que sur 14 étudiants qui arrivaient à équilibrer¹ correctement une équation (du type $N_2 + H_2 \rightarrow NH_3$), 9 ne réussissaient pas à faire le lien entre ces deux registres. Dans le niveau le plus élevé de compréhension l'étudiant perçoit les différentes significations des symboles chimiques et des coefficients numériques alors que dans le niveau le plus bas il s'agit d'une simple manipulation mathématique de signes. Ce décalage entre réussir à équilibrer une équation de réaction et comprendre sa signification dans les registres macroscopique et nanoscopique a été largement confirmé par d'autres recherches comme celles de Nurrenbern & Pickering (1987), Savoy & Steeples (1994) ou Huddle & Pillay (1996). Dans le registre symbolique le concept de mole permet de lire une équation de réaction dans les deux registres. Une étude suédoise (Tulberg *et al.*, 1994) montre que la majorité des étudiants ne fait pas la distinction entre la « masse molaire » et la « masse atomique » et conçoit la mole comme un nombre de particules et pas comme une quantité de matière. Quand le mot « quantité » est utilisé à propos d'une équation chimique les étudiants le comprennent comme un synonyme soit du nombre de moles, soit de la masse molaire, soit du volume. Ces confusions, auxquelles s'ajoutent des difficultés à manier les nombres, sont à l'origine des erreurs des élèves lorsqu'il s'agit de lier le rapport des masses des différents éléments à la formule du composé (Schmidt, 1990).

L'objet de la recherche consiste à élucider ce qui entre en jeu lors d'un processus d'apprentissage où les élèves sont engagés dans une démarche de résolution de problèmes impliquant l'utilisation de l'équation de réaction et du concept de mole pour établir un bilan de matière. Il convient de préciser que les élèves étaient familiarisés avec le type d'activité proposé (le travail par situations problèmes) mais que l'établissement d'un bilan en quantité de matière n'avait pas encore été objet d'apprentissage.

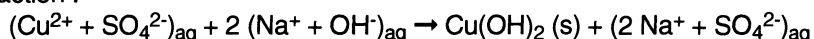
1. ÉLABORATION DES SITUATIONS PROBLÈMES

Nous sommes partis de l'hypothèse que « *le passage à un enseignement scientifique ne peut se faire que par une problématisation (établissement des raisons) qui se réalise, en particulier, par la caractérisation, la mise en tension critique de ce qui relève du registre empirique et de ce qui*

(1) Expression remplacée dans les actuels programme de seconde par : « *ajuster les nombres stœchiométriques* ».

appartient au registre des modèles » (Orange, 2003, p. 63). Nous avons donc choisi de faire affronter par les élèves le nœud d'obstacles précédemment identifié à travers des situations problèmes. Ces situations seront élaborées en tenant compte des lignes directrices proposées par Robardet (2001) en référence à la théorie des situations didactiques de Brousseau (1998).

Une des situations expérimentales souvent proposées pour l'étude de la stœchiométrie d'une réaction chimique est celle de la précipitation de l'hydroxyde de cuivre (II) à partir d'une solution de sulfate de cuivre (II) et d'une solution d'hydroxyde de sodium. La question à laquelle les élèves devront répondre est la suivante : « **Comment faire lorsqu'on mélange les deux solutions pour qu'il ne reste plus d'ions Cu^{2+} ou d'ions OH^- en solution ?** » Pour répondre, les élèves doivent savoir écrire l'équation de réaction :



et l'exploiter en exprimant les proportions dans lesquelles doit s'effectuer le mélange en termes de quantité de matière : $n(\text{Cu}^{2+}) / n(\text{OH}^-) = \frac{1}{2}$. Tout raisonnement reposant uniquement sur les masses des substances ou les volumes des solutions ne peut conduire à la réponse.

Compte tenu des nombreuses difficultés qu'ils sont susceptibles de rencontrer, la recherche de la réponse à la question a été organisée en deux étapes. La première étape est destinée à familiariser les élèves avec la transformation chimique étudiée. Elle doit permettre une adaptation progressive au milieu (au sens de Brousseau) facteur de difficultés, de déséquilibres, pour conduire à la construction du problème. Elle a pour but d'associer à l'évolution des repères dans le registre empirique les constructions dans le registre des modèles prévues par les instructions officielles :

- à la transformation chimique d'un système est associée une réaction chimique qui rend compte macroscopiquement de l'évolution du système et qui donne lieu à une écriture symbolique appelée équation ;
- les nombres stœchiométriques de l'équation s'écrivent en respectant les lois de conservation des éléments et des charges ;
- une transformation chimique ne nécessite pas que les réactifs soient dans des proportions particulières dans l'état initial.

La deuxième étape, intervenant après l'introduction du concept de mole lors d'une séquence d'enseignement classique, concerne la résolution du problème proprement dite. Les élèves n'ayant pas encore abordé les réactions chimiques d'un point de vue quantitatif, nous cherchons moins à les amener à trouver la bonne réponse à la question posée qu'à multiplier les interactions entre idées explicatives et/ou prédictives et résultats empiriques afin qu'ils :

- s'approprient l'idée que lors d'une transformation chimique les réactifs réagissent dans les proportions indiquées par les nombres stœchiométriques,
- réalisent que seule l'utilisation de la grandeur quantité de matière permet de répondre à la question.

	Obstacles perceptifs	Obstacles mécanistes	Non maîtrise de concepts	Non maîtrise de raisonnements
Registre macroscopique	<ul style="list-style-type: none"> Transformation chimique perçue en termes d'évènement (flamme, changement de couleur, précipité, dégagement de gaz, etc.) et non de transformation. Considérer comme physique tout ce qui se transforme "naturellement", et comme chimique tout ce qui est provoqué par l'homme. L'idée de conservation est directement liée à la perception. Lorsqu'il n'y a plus d'évidence perceptive (gaz, couleur), la substance est ignorée, inversement quand l'évidence perceptive est forte (solide noir), la substance est inventée (C). Une substance peut changer de propriétés, sans changer d'identité. 	<ul style="list-style-type: none"> Matière perçue comme un milieu continu. Substantialisation des phénomènes accordant plus d'importance à ce qui change qu'à ce qui se conserve. Les propriétés macroscopiques des substances s'expliquent par les propriétés des particules dans le registre nanoscopique. 	<ul style="list-style-type: none"> Confusion mélange/ corps composé ; corps purs/ corps simples ; la notion d'espace chimique n'est pas comprise. Confusion masse/ densité. La prise en compte de la conservation de la masse dépend du contexte. Les processus de dissolution, de précipitation. Le fait que les transformations impliquent un grand nombre de particules. 	<ul style="list-style-type: none"> Confusion entre monde réel et monde des modèles. Incapacité à utiliser les modèles du registre nanoscopique pour interpréter les phénomènes du registre macroscopique. Raisonnement linéaire causal en termes d'agent et de patient (centration sur l'un des réactifs) et non en termes d'interaction. Généralisation abusive à partir de réactions prototypiques ou considération que tout ce qui se mélange conduit à une réaction. Une transformation chimique est un processus simple représenté par une équation $[H_2O(l) \rightarrow H_2O(g)]$.
Registre nanoscopique		<ul style="list-style-type: none"> La particule représentative de la substance à l'échelle nanoscopique possède tous les attributs de cette substance (dégagement de gaz ou d'eau en particules déjà présentes, dans la substance initiale). Description du registre nanoscopique à partir de l'observation macroscopique L'atome de cuivre est rouge). 	<ul style="list-style-type: none"> Les concepts de molécule, d'élément, d'atome, d'ion. La conservation des atomes, leur réorganisation. Modèle cinétique de la matière. Liaisons inter ou intra moléculaires. Masse atomique et masse moléculaire. 	
Registre symbolique	<ul style="list-style-type: none"> L'équation chimique se lit toujours de gauche à droite : à gauche l'état initial, à droite, l'état final. Une réaction chimique est toujours totale. Non prise en compte du réactif limitant. 	<ul style="list-style-type: none"> Les molécules des corps composés se forment par assemblément, mélange des corps simples ($CO_2 = C$ et O_2). 	<ul style="list-style-type: none"> Les indices relatifs aux éléments dans les formules ne sont pas représentatifs du rapport selon lequel les éléments se combinent. Non prise en compte des proportions définies car non maîtrise de la notion de « valence ». Confusion masse moléculaire / masse molaire. Confusion nombres stoechiométriques et nombres de moles. La mole est un nombre de particules ou une masse. La quantité de matière est une masse ou un volume. 	<ul style="list-style-type: none"> Recherche de symétrie (monoxyde de cuivre + carbone \rightarrow monoxyde de carbone + cuivre ou $CuO + C \rightarrow CO + Cu$). Difficultés dans le traitement mathématique ou la manipulation des nombres ($n_1/m_1 = n_2/n_2$ ou M_1/M_1 au lieu de n_1M_1/n_2M_2). Utilisation d'algorithmes mémorisés dans un contexte et non appropriés dans la situation nouvelle.

Tableau 1 • Difficultés et obstacles à la compréhension de la transformation chimique

Le déroulement des activités au cours des deux étapes sera organisé en respectant des phases **d'action** permettant à l'élève, au cours d'interactions avec les autres élèves du groupe de travail et de l'expérience à réaliser, « *de se construire une représentation de la situation qui lui sert de modèle pour prendre ses décisions* » (Brousseau, 1998, p. 33) ; des phases de **formulation** conduisant à une mise au point d'un langage commun à tous les membres du groupe ; de **validation** par confrontation des propositions du groupe à l'opinion des autres élèves et/ou à l'expérience. Chaque situation est introduite par une question et doit déboucher sur une nouvelle question objet de la situation suivante.

L'étude a été menée en situation de classe réelle. Durant le temps didactique imparti au déroulement de ces situations (2 séances de TP de 1h30) les deux enseignantes des deux classes observées avaient donc le devoir d'enseigner « quelque chose » à leurs élèves. Ces moments où l'enseignant fait reconnaître aux élèves la valeur d'une procédure, d'une formulation, ayant un rapport important avec la connaissance visée, sont appelés par Brousseau : phases d'institutionnalisation. L'analyse *a priori* des deux étapes est présentée dans les tableaux 2 et 3.

Comme il serait illusoire de croire que les élèves sont capables de construire seuls des concepts ou modèles que les chimistes ont mis des siècles à établir, il convient d'insister sur l'importance des **guidages** au cours de ces activités. Ils consistent « *à suggérer aux élèves des procédures proches de ce qu'ils savent faire et les orienter vers les procédures savantes* » (Lemeignan & Weil-Barais, 1988, p. 133).

2. LES RÉSULTATS DE L'OBSERVATION DE LA PREMIÈRE SÉANCE DE TP

2.1. La prévision de ce qui se passe

La réaction de précipitation de l'hydroxyde de cuivre a été choisie car les élèves l'ont déjà rencontrée depuis le début de l'année. Dans la première partie de la séquence expérimentale tous les élèves disposent des mêmes solutions de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de sodium. L'analyse des prévisions écrites montre que la quasi-totalité des élèves prévoit la formation d'un précipité. Mais, sur les 52 élèves présents dans les deux classes :

- 16 se contentent d'annoncer la formation d'un précipité sans autre précision : « *Il va sans doute y avoir un précipité. On va le traduire par un schéma exprimant les manipulations ainsi que les résultats* » ;
- 16 précisent qu'il s'agit de la formation d'un précipité d'hydroxyde de cuivre : « *Le mélange des 2 solutions va former un précipité d'hydroxyde de cuivre. Le précipité sera bleu. $(\text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}) \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2 \text{OH}^-$* » ;

Présentation de la situation (consignes et questions posées)	Savoir-faire dans le domaine expérimental	Connaissances à mettre en œuvre ou à institutionnaliser
<p>Aujourd'hui on va regarder ce qui se passe dans une réaction chimique quand on met en présence deux corps qui réagissent entre eux. Vous allez verser dans un bêcher une solution de sulfate de cuivre et une solution d'hydroxyde de sodium (dans l'ordre et dans les proportions que vous souhaitez). Que va-t-il se passer ? Comment pourriez-vous le représenter ?</p> <p>Travail individuel, par écrit : phase d'action. Discussion collective : phase de formulation. D'après vous restera-t-il des ions cuivre (II) ou hydroxyde en solution ?</p> <p>Travail individuel, par écrit : phase d'action. Travail collectif : phase de formulation. Réalisation de l'expérience, travail en groupes de 4 : phase de validation D'après vous, restera-t-il des ions cuivre (II) ou hydroxyde dans la solution ? Réponse justifiée par écrit. Discussion collective et formulation du premier problème : Vous allez réfléchir aux expériences que vous devez faire pour répondre à cette question.</p> <p>Résolution du premier problème : - phases d'action, de formulation, de validation implicite par réalisation d'expériences en groupe de 4 ; - discussion collective pour élaborer un protocole pertinent ; Phase de validation explicite et d'institutionnalisation.</p> <p>- Mise en œuvre du protocole.</p>	<p>Verser lentement les deux solutions dans un bêcher.</p> <p>Réaliser une filtration. - Séparer une solution en deux parties. - Mettre en œuvre un test de présence d'ions</p> <p>Mesurer des volumes précis de solutions.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Associer les noms, sulfate de cuivre, hydroxyde de sodium, ion cuivre II et ion hydroxyde, hydroxyde de cuivre, sulfate de sodium, aux formules correspondantes. Prédire la formation d'un précipité d'hydroxyde de cuivre (Situation déjà abordée dans un autre contexte). - Représenter cette réaction chimique en utilisant le langage et/ou le symbolisme chimique adapté. - Écriture de l'équation de réaction. - Prédire s'il restera des ions cuivre II ou hydroxyde en argumentant. - Associer les différentes couleurs à la présence de substances différentes (incolorer pour l'hydroxyde de sodium et les ions hydroxyde, solution bleue des ions cuivre II, précipité bleu pâle d'hydroxyde de cuivre). - À partir de la coloration de la solution surmeublée, prévoir s'il reste des ions cuivre (II), prévoir s'il reste des ions hydroxyde. - Envisager la mise en œuvre de tests de reconnaissance des ions. - Imaginer deux moyens pour tester la présence d'ions Cu^{2+} et OH^-. Imaginer la suite des opérations à effectuer (filtrer, faire deux parts du filtrat, mettre en œuvre les deux tests retenus, conclure). - La réaction entre les ions Cu^{2+} et OH^- peut être utilisée comme test réciproque : si en ajoutant des ions Cu^{2+} un précipité se forme alors il reste des ions OH^- dans la solution sinon il n'y en a pas ; même chose pour les ions OH^-. - Pendant le test, associer les différentes couleurs à la présence de substances différentes (incolorer pour l'hydroxyde de sodium et les ions hydroxyde, solution bleue des ions cuivre II, précipité bleu pâle d'hydroxyde de cuivre), associer la filtration à la séparation des produits de la réaction. - Conceptualiser que, dans une réaction chimique totale entre deux réactifs, si les conditions sont quelconques, après réaction il reste un des deux réactifs. - Chercher les conditions pour qu'il ne reste aucun des deux ions dans la solution en utilisant l'équation de réaction qui nous informe sur les proportions dans lesquelles les ions des réactifs s'associent dans la réaction chimique. - Pour qu'il ne reste aucun des deux ions Cu^{2+} et OH^-, il faut connaître la quantité de matière de chacune de ces deux espèces dans les réactifs. - Deux fois plus d'ions hydroxyde signifie une quantité de matière deux fois plus grande et non un volume deux fois plus important de solution.
<p>Formulation du nouveau problème : Comment faire pour qu'il ne reste plus aucun des deux ions en solution ?</p> <p>- Par groupe de 4, élaborer un protocole et le mettre en œuvre : phases d'action, de formulation de validation implicite. Discussion collective pour faire le bilan des protocoles ; phase de validation explicite et d'institutionnalisation</p>		

Tableau 2 • Analyse a priori de la première séance de TP

Présentation de la situation (consignes et questions posées)	Savoir-faire dans le domaine expérimental	Connaissances à mettre en œuvre ou à institutionnaliser
<p>Présentation et formulation du second problème :</p> <ul style="list-style-type: none"> - discussion collective sur les conclusions de la séance précédente : - vous disposez de cristaux de sulfate de cuivre pentahydraté ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) et de cristaux d'hydroxyde de sodium (NaOH). C'est vous qui allez préparer les solutions à mélanger pour qu'il ne reste aucun des deux ions hydroxyde ou cuivre (II), dans la solution finale. Comment allez-vous procéder ? <p>Résolution du second problème.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Par groupe de 4 élaborer un protocole et le mettre en œuvre : phases d'action, de formulation de validation implicite. - Il est exigé la production et la rédaction d'un protocole complet même si celui-ci n'est pas correct. - Les masses atomiques ne sont fournies qu'à la demande des élèves - Guider les élèves pour que les masses envisagées se situent dans une fourchette raisonnable pour la pesée, même si elles ne sont pas correctes. - Intervenir, à la demande des élèves, pour débloquer la situation si nécessaire. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesurer des masses de réactifs à l'état solide. - Préparer les solutions à partir de ces solides. - Réaliser une filtration. - Séparer une solution en deux parties. - Mettre en œuvre un test de présence d'ions. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rappel de l'équation de réaction. - Il faut connaître la quantité de matière des ions présents dans les solutions des réactifs de départ, afin de prévoir s'il en restera dans la solution finale. Dans le cas contraire il reste une des deux espèces d'ions dans la solution. - L'équation de réaction indique que ces ions Cu^{2+} et OH^- doivent être dans la proportion de 2 ions hydroxyde pour 1 ion cuivre II. - Préparer à partir des réactifs en poudre, les solutions d'hydroxyde de sodium et de sulfate de cuivre. La solution d'hydroxyde de sodium doit contenir deux fois plus d'ions OH^- que d'ions Cu^{2+} présents dans la solution de sulfate de cuivre. - Pour cela, calculer la masse molaire de l'hydroxyde de sodium et du sulfate de cuivre pentahydraté, à partir des masses molaires atomiques des éléments constitutifs. Calculer les masses de réactifs nécessaires à partir des masses molaires et des quantités de matière. - Conceptualiser que la mole permet de lire à l'échelle macroscopique une équation de réaction écrite à l'échelle nanoscopique. Les coefficients devant les formules des corps qui réagissent, permettant de connaître les quantités de matière nécessaires. - Tester la présence d'ions Cu^{2+} et OH^- à l'aide de la réaction entre les ions Cu^{2+} et OH^-. - Mettre en place les opérations à effectuer : filtrer, faire deux parts du filtrat, mettre en œuvre les deux tests retenus, conclure.

Tableau 3 • Analyse a priori de la deuxième séance de TP

- 18 prévoient la formation d'un précipité de sulfate de sodium : « *Le sulfate va réagir avec le sodium pour former un précipité blanc de sulfate de sodium* ». Nous pensons qu'il s'agit ici d'une confusion avec le test des ions sulfate, vu en début d'année ;
- 2 n'ont pas répondu.

La discussion collective qui a eu lieu dans chacune des classes a confirmé l'incapacité des élèves à reproduire les connaissances liées à cette réaction (noms des produits, formules des réactifs et des produits). L'enseignante doit faire rappeler cette réaction par un élève.

2.2. L'écriture de la réaction

- En ce qui concerne la représentation de la réaction chimique, aucun élève n'écrit la réaction avec les noms des quatre corps. Pourtant, depuis plusieurs mois (TP sur le cycle du cuivre), cette représentation d'une réaction chimique, avec les noms des produits et des réactifs, est utilisée systématiquement dans les deux classes. Cependant les élèves continuent de privilégier la représentation avec un schéma descriptif du dispositif expérimental.

- Parmi les 52 élèves, 24 essaient d'écrire l'équation de réaction avec les formules mais il n'y en a que 8 qui le font correctement ; les autres, soit ne connaissent pas les formules correctes pour les produits ou les réactifs, soit n'arrivent pas à équilibrer la réaction.

L'utilisation de l'équation de réaction n'est donc pas encore pour les élèves, en ce milieu d'année (mi-février), un outil pertinent pour représenter une transformation chimique et prévoir les transformations possibles. De plus, ils éprouvent de grandes difficultés pour son écriture. Ils s'interrogent sur la position des parenthèses, les ions qui interviennent sont cités mais les proportions sont erronées. Ils écrivent CuOH pour l'hydroxyde de cuivre et ne comprennent pas pourquoi, alors que l'on a toujours des ions cuivre (II), on doit écrire $\text{Cu}(\text{OH})_2$ pour l'hydroxyde, CuSO_4 pour le sulfate solide et $(\text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-})$ pour le sulfate en solution. Ils ont du mal à distinguer les ions qui interviennent dans la transformation de ceux, souvent appelés « spectateurs », que l'on retrouve aussi bien dans les réactifs que dans les produits de la réaction. La question qu'ils se posent est : « *y a-t-il formation d'une espèce chimique nouvelle dans la mesure où dans l'hydroxyde de cuivre on retrouve les mêmes ions que dans les solutions de départ ?* »

2.3. La prévision sur la présence d'ions dans la solution finale

Après que l'équation de réaction ait été écrite au tableau, la majorité des élèves (38) pense qu'il ne restera pas d'ions hydroxyde ou cuivre II car : « *C'est un précipité constitué à partir de ces deux entités, ils seront tous les*

deux dans le précipité et non dans la solution ». Ils auraient été sans doute plus nombreux encore si les enseignantes, sur la fiche de prévisions écrites, n'avaient précisé que la question portait sur la présence d'ions **dans la solution**. Car, parmi ceux qui pensent qu'il restera des ions cuivre II ou hydroxyde, plusieurs le justifient en disant que ces ions existent toujours puisqu'ils sont dans le précipité : « *Ils sont coincés dans le précipité* ».

Pour répondre à la question, quelques élèves (8 en tout), essaient d'utiliser l'équation de réaction. Ils pensent qu'elle représente effectivement ce qui se passe dans le tube à essais, mais elle ne tient pas compte des proportions dans lesquelles les réactifs sont mis en présence. L'équation n'est pas le bilan de ce qui se passe. Cette représentation erronée conduit un groupe à écrire : « *Non, il ne restera aucun des deux car l'équation bilan de la prévision serait faussée.* »

Cette idée se retrouvera au cours de la discussion : « *De toutes façons s'il restait des réactifs à la fin, on devrait les voir dans la partie droite de l'équation de réaction* ».

2.4. La modification de la prévision en fonction de l'observation

Quelques élèves (12/52) persistent à penser que tous les ions sont dans le précipité : cette opinion est renforcée lorsque la quantité de précipité est importante et que les ions hydroxyde ont été versés en excès rendant la solution incolore (9 élèves sur les 12 précédents).

Mais, après l'observation du bécher dans lequel ont été versées les deux solutions, plusieurs élèves expriment des doutes. Si la solution est bleue ils reconnaissent la présence de l'ion cuivre II. C'est le cas pour les 30 élèves qui avaient versé un excès de sulfate de cuivre. Aucun des élèves ayant constaté la présence d'ions cuivre II, ne s'interroge sur la présence éventuelle d'ions hydroxyde dans la solution.

Lorsque celle-ci est incolore (24 élèves), ils écartent la présence d'ions cuivre II mais 15 d'entre eux s'interrogent sur la présence d'ions hydroxyde : « *on n'en est pas sûr car l'observation de l'expérience montre qu'il reste une solution incolore sur la phase supérieure au précipité* ».

Il est intéressant de noter que, parmi ceux qui expriment des doutes, il y en a 12 qui pensent que la présence ou l'absence d'un des deux ions dépend des proportions dans lesquelles ils ont été mis en présence : « *Il restera de l'hydroxyde ou des ions cuivre suivant les proportions de chacun car si l'on met plus d'hydroxyde que de cuivre il en restera qui n'aura pas réagi. Idem pour l'autre* ».

Cette idée se précisera lors de la discussion au sein des 2 classes. Les expressions de « *quantités de départ* », « *proportions* », « *réactif en*

excès » sont utilisées par les élèves. Au cours de cette discussion autour des béchers, face aux résultats des expériences des différents groupes, plusieurs élèves se demandent pourquoi, « *alors qu'on a fait la même chose* », les résultats des expériences peuvent être différents. Ils commencent à concevoir que c'est justement cette différence qui fait l'objet de la discussion. Mais une interrogation subsiste : comment des résultats différents peuvent-ils être représentés par la même équation de réaction ? Cette difficulté des élèves souligne l'ambiguïté du statut de l'équation de réaction qui correspond à une modélisation de la transformation chimique.

2.5. L'élaboration et la mise en œuvre du protocole expérimental pour savoir s'il reste des ions Cu^{2+} ou OH^- dans la solution

La première difficulté que rencontrent les élèves est le besoin de reproduire quelque chose de connu (les tests de présence d'ions). Pour les ions cuivre II, pas de problème, il s'agit d'un test par les ions hydroxyde estampillé comme tel, et que les élèves retrouvent facilement. Mais pour tester les ions hydroxyde, il leur paraît bizarre de devoir inventer un test qui ne figure pas en tant que tel dans le livre ou dans le cahier. Ils vont rejeter l'idée, même si elle répond au problème posé, uniquement parce que ce n'est pas dans le cours.

La seconde difficulté, liée à la précédente, provient de ce que depuis les premiers contacts des élèves avec la chimie les tests leurs sont présentés comme « des tests **de** quelque chose ». L'idée de tester les ions hydroxyde par les ions cuivre leur est difficile à concevoir. Pour les élèves, l'ion OH^- est le réactif de l'ion Cu^{2+} , ce n'est pas un ion dont on cherche la présence ou qui peut servir à tester la présence d'autre chose. C'est la manifestation de l'obstacle selon lequel il y a un des réactifs qui agit sur l'autre. La résistance de cet obstacle peut s'expliquer par l'enseignement de la chimie qui présente les substances par leur fonction (l'eau de chaux, la liqueur de Fehling, sont estampillées réactifs de quelque chose).

Ce statut particulier du réactif se retrouve dans la façon dont les élèves manipulent. Si un test est négatif ils vont ajouter dans la solution un autre réactif pour faire un nouveau test, sans se poser la question d'éventuelles interactions. Le réactif a un statut à part, ce n'est pas une substance susceptible d'avoir d'autres actions que le test pour lequel elle est généralement connue et employée.

Il s'agit là de difficultés qui empêchent les élèves de réussir rapidement. Mais, lorsque au cours des discussions entre les groupes, un groupe explique comment il a fait pour tester les ions OH^- par les ions cuivre II, cette méthode est adoptée par tous, comme une méthode astucieuse que l'on s'en veut de ne pas avoir trouvé seul.

2.6. L'élaboration et la mise en œuvre d'un protocole pour qu'il ne reste ni ions Cu^{2+} ni ions OH^- après réaction

2.6.1. Les raisonnements spontanés se font en volume, dans le registre macroscopique

S'il reste des ions OH^- ou Cu^{2+} les élèves se doutent que « *c'est une histoire de proportions* », mais ils ne se tournent pas pour autant vers l'équation de réaction. Leur première idée fait appel à ce qui leur paraît être une question de bon sens, « *on n'a pas pris les bons volumes* ». Si on veut « *que ça tombe juste* » il faut « **faire moitié-moitié** », « *parce qu'avec des volumes égaux ça doit tomber juste* ». Ce type de raisonnement se retrouve dans les deux classes observées. Il réapparaîtra plusieurs fois au cours de la séquence et ne pourra être abandonné. Nous le nommerons **obstacle de sens commun** dans la suite de cette étude.

Ayant réalisé le mélange dans ces proportions-là, ces élèves se rendent compte qu'il reste des ions hydroxyde. Reprenant leur réflexion ils continuent à raisonner au niveau macroscopique, c'est-à-dire en volume, et proposent deux volumes de sulfate de cuivre et un volume d'hydroxyde de sodium. Maintenant il reste des ions cuivre II. À ce moment-là certains se découragent « *il y a une infinité de possibilités, on ne va pas y arriver !* », d'autres s'acharnent et proposent de travailler par approximations successives en rajoutant des fractions connues de volumes d'une des deux solutions.

2.6.2. Une prise de conscience difficile de l'existence d'un niveau nanoscopique

Lors de la discussion entre les élèves commence à être exprimée l'idée « *qu'on ne peut pas y arriver car on ne sait pas combien il y a d'ions au départ* ». C'est la première étape dans la résolution du problème. Comme les élèves ne pensent pas à utiliser l'équation de réaction, et tentent toujours de raisonner en volume, c'est l'enseignante qui leur indique cette direction de recherche.

Mais leur lecture de cette équation n'est pas celle attendue par les enseignantes. Les élèves perçoivent bien que la signification du coefficient 2 devant NaOH est importante, mais ils croient qu'il faut « *mettre deux fois plus de soude que de sulfate de cuivre* ». La discussion tourne alors autour de la signification de ce « *deux fois plus* » :

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

- dans l'autre classe, un groupe propose une lecture en masse : il suffirait de prendre une masse d'hydroxyde de sodium deux fois plus importante que celle de sulfate de cuivre. Comme l'enseignante désigne à nouveau l'équation de réaction, un élève affirme alors « *c'est normal qu'il reste des ions hydroxyde parce qu'au départ il y en a deux fois plus* ». Ce constat conduit à l'abandon du raisonnement en masse et ramène les élèves face à l'obstacle de sens commun : « *il faut en mettre autant des deux* ».

En s'interrogeant sur la signification de ce « autant » les élèves restent toujours au niveau macroscopique : « *la même quantité* », « *la même masse* », « *le même volume* ». Ils se révèlent incapables de raisonner autrement que dans ce registre. **L'obstacle épistémologique**, qui consiste à penser que « *comme la transformation chimique ne me montre pas ce qui se passe au niveau nanoscopique, alors je ne peux pas réussir à utiliser ce niveau nanoscopique qui m'est inaccessible* » (Laugier & Dumon, 2003, p. 90), résiste.

2.6.3. Des tentatives de franchissement de l'obstacle se développent

Souhaitant débloquer la situation, l'enseignante insiste encore sur la signification des coefficients de l'équation de réaction. Au cours de la discussion, des élèves, sensibles à cette insistance, formulent des propositions plus précises dans le registre nanoscopique :

- « *Ce qui compte c'est les ions. Tu mets deux OH pour un Cu* »,
- « *Ben oui, en fait il faudrait mettre deux fois plus de OH* »,
- « *Mais comment ce serait possible ?* »,
- « *Ben suivant la quantité d'ions qu'il y aurait dans la solution* »,
- « *Oui il faudrait savoir comment ils sont concentrés au départ, pour pouvoir prendre deux fois plus de OH que de Cu* ».

À ce point de la discussion, le nouveau problème est « *comment compter les ions contenus dans chacune des deux solutions ?* »

Les modalités de ce calcul ainsi que celles des opérations à effectuer ne peuvent pas encore être clairement formulées. Ce sera l'objet de la prochaine séance.

3. ANALYSE DES STRATÉGIES UTILISÉES POUR LA RÉOLUTION DU NOUVEAU PROBLÈME

3.1. La présentation et la formulation du problème

Dans les deux classes observées, dès le début de la séance, les élèves réussissent à écrire l'équation de réaction mais ils raisonnent à nou-

veau en volume ou en masse. Les enseignantes doivent intervenir pour privilégier parmi les propositions celles qui font intervenir les quantités de matière à mettre en présence.

3.1.1. Une lecture erronée de l'équation de réaction

Plusieurs élèves affirment que « *d'après l'équation de réaction il faut prendre deux fois plus de sulfate de cuivre que d'hydroxyde de sodium* ». En effet, quand les enseignantes désignent par n la quantité de matière de sulfate de cuivre et donc par $2n$ celle d'hydroxyde de sodium, les élèves se trompent sur la signification de n . Pour eux, puisque n moles de sulfate de cuivre correspondent à $2n$ moles d'hydroxyde de sodium, cela signifie que le n du sulfate de cuivre est deux fois plus grand que le n de l'hydroxyde de sodium. Comme le dit l'un d'eux : « *Cu est deux fois plus grand que OH puisqu'il suffit d'un Cu pour deux OH* ».

Face à cette difficulté à relier les nombres stœchiométriques à la proportion selon laquelle réagissent les réactifs, que nous dénommerons pour simplifier par la suite **obstacle mathématique**² les enseignantes utilisent une stratégie de contournement. Au cours de la discussion qui suit, elles profitent des avis contraires qui sont exprimés majoritairement, pour affirmer que « *la quantité de matière des ions Cu^{2+} est deux fois plus petite que celle des ions OH^-* ».

3.1.2. Le passage macroscopique → nanoscopique n'est toujours pas réalisé

Croyant le problème résolu, les enseignantes indiquent aux élèves « *Aujourd'hui c'est vous qui allez préparer les deux solutions. Je vous donne l'hydroxyde de sodium en cristaux et le sulfate de cuivre pentahydraté en cristaux lui aussi* ».

Mais les propositions des élèves montrent que la circulation entre les deux registres pour interpréter le « *deux fois plus* » représente toujours un obstacle non franchi :

- « *Ben on en met une unité de ça (l'élève montre les cristaux de sulfate de cuivre) et deux de ça (l'élève montre le flacon de pastilles d'hydroxyde de sodium)* »,
- (l'enseignante) : « *Ah ! Mais qu'est ce que c'est une unité ?* »,
- « *Ben n'importe laquelle quoi, une cuillère, un pot de yaourt,...* »

(2) Après enseignement 18 % des élèves de ces deux classes auront conservé cette représentation des nombres stœchiométriques. D'après les enseignants avec lesquels nous avons travaillé cette lecture de l'équation de réaction se retrouve encore en terminale S.

Cette incapacité à considérer une réaction chimique autrement que dans le registre macroscopique est la manifestation de l'obstacle épistémologique déjà mentionné. Mais si l'obstacle est présent ce n'est pas dans les mêmes conditions que dans l'histoire de la chimie. Pour les élèves le refus d'utiliser le registre nanoscopique semble largement inconscient, jusqu'à présent ils ont toujours réussi ce qui leur était demandé en restant au niveau macroscopique, et ils ne comprennent pas pourquoi aujourd'hui ça ne marche plus. Chez les « équivalentistes » le refus d'utiliser ce registre correspondait à un choix épistémologique.

Les enseignantes, souhaitant lancer le travail en petits groupes, s'appuient à nouveau sur une proposition faisant référence aux quantités de matière pour reformuler le problème et essayer de remettre en chantier le concept de mole qui n'est pas encore opératoire : « *quelle quantité de réactifs devrez-vous prendre pour fabriquer vos solutions afin de ne plus avoir d'ions Cu^{2+} et d'ion OH^- en solution à la fin de la réaction ?* » Puis, elles invitent les élèves, par groupes de quatre, à élaborer le protocole correspondant.

3.2. La résolution du problème

Nous allons analyser les stratégies suivies par 6 groupes d'élèves d'une même classe, pour repérer les difficultés récurrentes rencontrées.

3.2.1. Stratégie du groupe 1

Les élèves s'appuient sur l'équation de réaction pour affirmer « *il faut deux fois plus d'hydroxyde que de cuivre* ». Dans un premier temps ils concluent que « *il faut deux fois plus de soude que de sulfate de cuivre* ». Ensuite, ils raisonnent bien avec les moles, mais lorsqu'il s'agit de calculer les masses molaires, ils prennent en considération celles des ions cuivre II (63,5 g) et hydroxyde (17 g) en oubliant les autres ions présents. La fréquence élevée de cette erreur et sa résistance au cours de la séquence nous conduisent à formuler l'existence d'un **obstacle de nature didactique**. Cette erreur ne se manifeste que chez les élèves dont l'enseignante, suivant les recommandations officielles, a utilisé en classe l'équation réduite ($\text{Cu}^{2+}_{\text{aq}} + 2 \text{OH}^-_{\text{aq}} \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2$).

Alors que ces élèves ont correctement raisonné avec les moles, l'obstacle épistémologique réapparaît très vite et les empêche de continuer : « *Oh mais ça va pas ! Le cuivre c'est très lourd, ça fait pas la moitié de la soude !* » Ce qui les gêne c'est le rapport des masses : deux fois plus d'ions hydroxyde que d'ions cuivre II devrait se traduire par une masse d'hydroxyde double de celle des ions cuivre II.

En ce qui concerne l'obstacle didactique, l'intervention de l'enseignante amène les élèves à subodorer que « *le sulfate ça doit peser* ». Mais,

après le départ de l'enseignante, ils se tournent, pour confirmation, vers un groupe qui a réussi et expriment leur incompréhension : « *Mais pourquoi tu comptes ce qui ne réagit pas. Ce qui sert pas, nous on le compte pas* ». Malgré les explications d'un des élèves de ce groupe ils ne sont pas convaincus, cet obstacle didactique est contourné mais non franchi. « *Je comprends pas comment ils font, mais ils trouvent pareil que les autres, ça doit être ça* ».

3.2.2. Stratégie du groupe 2

Leur idée de départ est « *On prend une quantité de cuivre et on prend deux fois plus de OH* ». Leur critère de choix est que « *si c'est dans les proportions stœchiométriques on a pas besoin de le refaire* ». Les élèves ignorant l'équation de réaction écrite au tableau, l'obstacle didactique les amène à se focaliser sur l'équation réduite. Un élève rappelle qu'il s'agit de l'action du sulfate de cuivre sur la soude et s'étonne de ne pas tenir compte de tous les ions. Mais le camarade qui mène la réflexion du groupe répond « *Oui mais les autres ils ne réagissent pas alors on les met pas ! Il faut juste que tu mettes $\text{Cu}^{2+} + 2 \text{OH}$ égale $\text{Cu}(\text{OH})_2$* ».

Puis les élèves abordent ensuite l'étape suivante : la détermination des nombres de moles nécessaires. Mais le recours à l'équation de réaction est fragile. Abandonnant l'équation réduite qu'ils viennent d'écrire et l'obstacle didactique, ils butent sur l'obstacle de sens commun déjà décrit. Sans justification autre que « *moitié/moitié ça doit aller* », ils partent d'une masse arbitrairement choisie de 5 g pour chacun des deux réactifs et calculent les quantités de matière ($5/63,5 = 7,8 \times 10^{-2}$ mole pour le cuivre et $5/17 = 2,9 \times 10^{-1}$ mole pour les ions hydroxyde).

Ils se rendent compte que ces nombres ne correspondent pas à ce qui est attendu : « *Là déjà t'as quatre fois plus de cuivre, alors que normalement il en faut deux fois moins* ».

Conscients de cette incohérence, leur réaction n'est pas de remettre en cause le raisonnement mais d'adapter le résultat. À plusieurs reprises ils déclarent que « *il faut s'arranger* » (En fait, ce type de comportement, qui consiste à considérer des résultats en contradiction avec les hypothèses non comme des réfutations de ces dernières mais comme des anomalies avec lesquelles il va falloir composer, n'est pas inconnu des scientifiques eux-mêmes). À plusieurs reprises ils déclarent que « *il faut s'arranger* ».

À la suite d'une intervention de l'enseignante, ils essaient de prendre en compte l'ensemble des ions présents dans les réactifs à peser mais ne remettent pas en cause leur choix initial qui consiste à partir des mêmes masses pour les deux réactifs. **L'enseignante devra reprendre avec eux l'ensemble du raisonnement.**

3.2.3. Stratégie du groupe 3

Dès le début, ce groupe-là s'appuie sur l'équation de réaction et raisonne en quantité de matière en choisissant tout à fait arbitrairement les nombres de moles : « *Bon alors vous avez vu, il faut prendre deux valeurs proportionnelles. On va prendre $2 \cdot 10^{-2}$ mole de sulfate de cuivre et $4 \cdot 10^{-2}$ mole d'hydroxyde de sodium* ». Pour l'élève qui conduit la réflexion ce raisonnement en moles est naturel, il n'hésite pas et dans le groupe personne ne conteste ce choix.

Il en est de même lors du passage aux masses de réactifs à partir des masses molaires. Ils commettent eux aussi une erreur en oubliant le sodium dans le calcul de la masse molaire de l'hydroxyde de sodium, mais ce n'est qu'une étourderie qui sera très vite réparée.

Comme la quantité de matière prise au départ était trop faible ils obtiennent des masses de réactifs à peser trop petites (4,99 g et 1,6 g). Ils n'ont pas de difficultés pour les multiplier toutes les deux par un même nombre afin de rentrer dans la fourchette proposée par l'enseignante.

3.2.4. Stratégie du groupe 4

Dans ce groupe, la discussion est menée par un leader qui, comme dans le groupe 2, tire une partie de son autorité de sa virtuosité à manier la calculette. Butant sur l'obstacle de sens commun, ils partent d'une même masse de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de sodium et calculent les nombres de moles correspondants. L'obstacle didactique les amène à faire la même erreur que les groupes précédents : ils ne raisonnent qu'avec les masses molaires de l'ion cuivre II et de l'ion hydroxyde. Comme l'enseignante n'est pas intervenue cette erreur ne sera pas corrigée.

Ils utilisent l'équation de réaction, en déduisent qu'il faut deux fois plus d'ions OH^- que d'ions Cu^{2+} , mais cherchent en vain « *le coefficient multiplicateur* », opérateur mystérieux qui leur permettrait d'obtenir ce résultat à partir du choix initial de deux masses identiques de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de sodium.

Ils enchaînent les calculs sans vraiment réfléchir ni à la nature des grandeurs qui interviennent ni à l'origine des nombres qu'ils manipulent. **Ils n'aboutiront pas** et attendront l'intervention de l'enseignante.

3.2.5. Stratégie du groupe 5

- Ils commencent leur raisonnement en s'appuyant sur les volumes :
- « *Il nous faut le volume, puisqu'il faut deux fois plus de OH^- que d'ion Cu donc $V_{\text{OH}} = \frac{1}{2} V_{\text{Cu}}$* »,
 - « *Attends, c'est $\frac{1}{2}$ ou 2 fois plus ?* »

Nous remarquons une nouvelle fois l'erreur causée par le non-franchissement de l'obstacle mathématique lors de la lecture de l'équation de réaction : $V_{OH} = \frac{1}{2} V_{Cu}$ doit-il se lire, le volume d'hydroxyde de sodium est le double de celui du sulfate de cuivre, ou bien le volume d'hydroxyde de sodium est la moitié de celui du sulfate de cuivre ? Confronté à cet obstacle un élève décide de le contourner :

- « Euh ... ça fait rien. On a la masse, c'est mieux avec la masse ».

S'ils finissent par calculer les masses molaires c'est presque par hasard, après qu'un des membres du groupe ait découvert la formule dans son cahier. Mais lorsqu'il s'agit de passer des quantités de matière, à la masse en grammes à peser, c'est-à-dire calculer la masse molaire, la proposition d'un membre du groupe « *Bon alors on calcule carrément NaOH* » permettrait de franchir l'obstacle didactique de cette séance. Mais celui qui, depuis le début, mène la réflexion dans le groupe, l'interrompt vivement :

- « *Mais non Na on s'en fiche !* »

Et l'élève qui était pourtant sur la bonne voie, s'incline :

- « *Ah oui, c'est un ion spectateur !* »

- « *Alors ça fait $mOH = 16 + 1 = 17 \text{ g}$ et $mCu = 63,5 \text{ g}$ ».*

Là aussi, comme avec le groupe 2, un élève butant sur l'obstacle épistémologique s'étonne que la masse de l'hydroxyde de sodium ne soit pas le double de celle du sulfate de cuivre. « *Moi je ne comprends pas. 34 c'est pas deux fois 63,5 !* »

Dans le groupe, face à cette manifestation de l'obstacle, personne ne peut lever ce qui apparaît comme une contradiction rédhibitoire. Malgré l'aide de l'enseignante qui, lors d'un passage, les incite à prendre en compte l'ensemble des ions présents, les élèves ne réussissent pas à élaborer un protocole correct.

Une élève du groupe, face à leur page griffonnée de calculs en tous sens, résume bien leur désenchantement :

- « *On est content, on a des chiffres partout* ».

Ce groupe est **perdu dans le labyrinthe des obstacles**.

3.2.6 Stratégie du groupe 6

Ce groupe commence spontanément par calculer les masses molaires de l'hydroxyde de sodium et du sulfate. Bien qu'ayant commencé leur raisonnement en tenant compte de la masse des cinq moles d'eau, ils oublient ensuite de la prendre en considération. L'erreur sera vite réparée suite à l'intervention de l'enseignante. Le début de leur raisonnement peut laisser croire que les différents obstacles que nous avons décrits ont été franchis. Il n'en est rien, la suite de leur travail montre que simplement ces obstacles n'avaient pas encore été rencontrés.

Un membre du groupe reformule la consigne initiale :

- « *On veut à la fin une solution neutre parce qu'à la fin il ne doit plus y avoir de Cu^{2+} et de OH^-* ».

En réponse, l'un d'eux propose : « *Et bien alors il faut en prendre autant de chaque* ».

Cette idée récurrente que moitié-moitié ça doit aller, manifestation de l'obstacle de sens commun, ne peut être franchie malgré une élève qui s'interroge :

- « *Je sais pas si c'est le même poids ?* »,
- « *Mais si, ça fait la même masse. Les molécules elles vont toutes se mettre ensemble* ».

La courte intervention de l'enseignante, souhaitant leur faire corriger la masse molaire du sulfate de cuivre pentahydraté, sera suffisante pour que ces élèves oublient leur raisonnement initial avec les masses molaires. Face à l'obstacle épistémologique ils reviennent à une lecture macroscopique en masse des coefficients de l'équation de réaction :

« *Bon alors on va prendre 5 g de sulfate de cuivre par exemple, et alors il faudra 10 g d'hydroxyde de sodium* ».

Seuls ils ne pourront le franchir. L'enseignante devra une nouvelle fois intervenir pour les ramener à un raisonnement avec les masses molaires.

4. DISCUSSIONS

4.1. Discussions relatives à la première séance de TP

Au début de la séance les élèves n'ont aucun souvenir de la transformation chimique déjà rencontrée, réalisée et représentée à deux reprises depuis le début de l'année. Jusqu'à présent, l'écriture symbolique d'une réaction chimique sous forme d'une équation de réaction a été un objet d'enseignement. Ici son écriture n'était pas explicitement demandée et il apparaît que ce n'est pas encore un outil que les élèves utilisent spontanément quand ils doivent représenter ce qui se passe dans une transformation chimique.

Lorsqu'il s'agit de tirer des conclusions de l'observation du réel, elles ne sont correctement réalisées que lorsqu'il y a une évidence perceptive : la couleur bleue caractéristique de la substance (ions cuivre II en solution) est immédiatement repérée. La tâche est d'autant plus difficile que le test permettant cette exploration (test des ions OH^- par les ions Cu^{2+}) n'est pas connu en tant que tel. Ce qui devait être une mobilisation de savoir-faire acquis (test réciproque) se révèle être en fait une conceptualisation. Le test doit changer de statut et devenir une réaction chimique pour fonctionner dans les deux sens.

L'activité de résolution du premier problème est dans l'ensemble correctement réalisée par les élèves en ce qui concerne l'élaboration du protocole expérimental lui-même (filtrer, faire deux parts, etc.) La difficulté se situe,

comme nous l'avons signalé, au niveau du test des ions hydroxyde. Les élèves ont tendance à changer la nature du problème pour l'adapter à ce qu'ils savent faire. Ils essaient de passer d'une situation de résolution de problèmes à une situation d'application de connaissances. Lorsque cette difficulté est franchie, la mise en œuvre du test réciproque devient concevable par les élèves.

L'activité de formulation du nouveau problème passe par la mobilisation de connaissances sur l'équation de réaction. Or, comme dans la résolution du premier problème, cette mobilisation ne peut être effectuée et va être remplacée par une activité de conceptualisation nécessairement plus difficile. L'analyse de la discussion dans la classe montre que, lorsqu'ils abordent cette séquence d'enseignement, les élèves ne savent pas utiliser l'équation de réaction pour obtenir des informations sur les proportions dans lesquelles les réactifs entrent en combinaison.

Ignorant les coefficients placés devant les formules ils se heurtent à l'**obstacle** que nous avons qualifié de **sens commun** (mettre les réactifs en présence dans la proportion moitié/moitié). Cet obstacle resurgira plusieurs fois dans la seconde séance de TP. Lorsque le guidage de l'enseignante les amène à considérer ces coefficients, ils les lisent dans le registre macroscopique en termes de volume ou de masse et n'arrivent pas à changer de registre. Cet **obstacle** de nature **épistémologique** se manifestera dans le second TP. Il résiste d'autant plus que jusqu'à présent dans l'enseignement de chimie, pour effectuer les manipulations, les informations nécessaires étaient fournies aux élèves en termes de grandeurs macroscopiques, le volume surtout (verser $n \text{ cm}^3$ de la solution...) La lecture de la phénoménologie se faisait dans le registre macroscopique, et cette lecture était suffisante pour réussir. Ce n'est plus le cas ici.

4.2. Discussions relatives à la deuxième séance de TP

Dans ce TP, les informations sur les grandeurs macroscopiques (les masses des réactifs) ne sont plus fournies et ce sont les élèves qui doivent les déterminer. Cette tâche passe par l'utilisation de l'équation de réaction, que les élèves doivent lire dans les deux registres.

En ce qui concerne la transformation chimique étudiée, les activités déjà rencontrées dans la séance précédente sont facilement reproduites par les élèves. C'est le cas pour les noms des substances en présence, de leurs caractéristiques macroscopiques (couleur, état) ou de leur formule chimique. Même les tests de présence des ions cuivre II et hydroxyde, dont l'élaboration avait posé des problèmes aux élèves, sont facilement réinvestis, de même que le protocole expérimental permettant leur mise en œuvre. De ce point de vue il y a eu apprentissage.

En ce qui concerne la représentation de la transformation chimique, les élèves savent que c'est l'équation de réaction qui permet cette représentation. Là aussi il y a un progrès par rapport à la séance précédente. Mais lorsqu'il s'agit d'utiliser l'équation de réaction les obstacles se manifestent à nouveau.

Dans la discussion collective l'**obstacle mathématique** sur la signification des coefficients apparaît. Le guidage serré de l'enseignante permet à l'ensemble des groupes d'utiliser correctement les coefficients de l'équation de réaction (deux ions hydroxyde pour un ion cuivre II). Mais nous ne pouvons affirmer que l'obstacle a été réellement franchi, il apparaît encore chez un élève du groupe 5.

L'**obstacle didactique** constitué par l'usage répété de l'équation réduite dans l'enseignement antérieur, conduit les élèves à ignorer la présence, dans les grains de sulfate de cuivre et d'hydroxyde de sodium, des ions *spectateurs*. Le passage du registre nanoscopique (proportions dans lesquelles les ions réagissent) au registre macroscopique (masses de réactifs à utiliser), est compromis. Pour certains de ces groupes, cet obstacle peut être franchi (groupes 3 et 6) à la suite d'une intervention de l'enseignante. Mais pour les autres (groupes 1, 2, 4 et 5), l'obstacle résiste et les élèves ne comprennent pas que dans le registre macroscopique les manipulations des réactifs ne sont possibles que sur la totalité des ions.

Cette séquence d'enseignement a surtout révélé la résistance au changement de l'obstacle épistémologique. À part le groupe 3 qui, dès le début de son raisonnement, s'appuie sur les quantités de matières pour déterminer les masses de réactifs à utiliser, tous les autres groupes raisonnent soit en masse (groupe 1, 2, 4 et 6) soit en volume (groupe 5). Lorsqu'ils calculent les masses molaires l'idée qu'il faut deux fois plus d'ions hydroxyde que d'ions cuivre II doit se retrouver dans les rapports des masses. C'est le cas des groupes 1 et 5 dans lesquels un élève s'étonne que la masse des ions hydroxyde ne soit pas le double de celle des ions cuivre II alors qu'ils ont pourtant pris les bonnes proportions. Lors de la séance de TP précédente les élèves raisonnaient en volume pour traduire le « deux fois plus ». Au cours de cette deuxième séance ils savent que le raisonnement en volume ne leur permet pas de réussir et ils traduisent le « deux fois plus » en masse. Ce résultat confirme ceux de Tulberg *et al.* (1994) relatifs à la confusion que font les élèves dans une réaction chimique entre les mots mole, quantité, volume ou masse.

5. CONCLUSION

Ce qui est en jeu au cours de ces activités c'est la mise en relation du modèle de la transformation chimique avec le concept de mole. Pour résoudre le second problème, il s'agissait de passer d'une étude qualitative

de la réaction choisie, à une étude quantitative. Le même problème posé à des chimistes équivalentistes aurait pu être résolu sans recourir au registre nanoscopique. N'oublions pas que les premières lois de la chimie quantitative ont pu être énoncées sans faire d'hypothèses sur le fonctionnement du registre nanoscopique. Mais l'élève de seconde n'est pas un équivalentiste. Si cela lui permet de ne pas refuser *a priori* l'activité de modélisation, cela lui ôte les connaissances de la chimie quantitative nécessaires pour résoudre le problème. Les instructions officielles de la classe de seconde placent cependant le système explicatif de la réaction chimique uniquement au niveau macroscopique : « *L'étude de la transformation chimique d'un système commence par la mise en place d'outils de description macroscopique du système impliquant la définition de la mole* » (B.O., 30 août 2001, p. 18).

Nous pensons par contre, en accord par exemple avec Barlet & Plouin (1994), que la modélisation de la transformation chimique à l'aide de l'équation de réaction ne peut se faire que par une circulation entre les registres macroscopique (l'expérimental) et nanoscopique (la modélisation). Le concept de mole étant au cœur de l'interface entre les deux registres. C'est dans cette optique que nous avons élaboré nos situations problèmes. Nous avons observé la très grande résistance des élèves à cette circulation entre les registres, lorsqu'il s'agit de lire l'équation de réaction. Leur lecture se fait dans le registre macroscopique en termes de volume et de masse et quand, sous l'action d'un guidage serré de l'enseignant, ils doivent la lire à l'échelle nanoscopique, ils se révèlent incapables de revenir dans le registre macroscopique.

Notre étude fait apparaître que, si les élèves semblent capables d'identifier les deux registres, des obstacles que nous avons qualifiés d'épistémologiques, de sens commun, mathématiques et didactiques posent problèmes pour leur mise en relation en utilisant le concept de mole. Des études historiques et didactiques ont également mis en évidence la très grande résistance de ces obstacles. Il est donc normal qu'ils ne puissent être dépassés par cette seule résolution de problèmes.

Toutefois, nous avons observé que, lors de telles activités, où une large place est donnée au débat dans la classe, les élèves construisent, plus que des réponses, des questions productives sur le plan conceptuel. Hesse & Anderson (1992) font remarquer que l'apprentissage de la transformation chimique requiert des modifications complexes dans l'écologie conceptuelle de beaucoup d'élèves. Nous partageons ce point de vue et nous ajouterons que cette réorganisation conceptuelle ne peut se concevoir que par la réflexion critique et dans la durée. D'autres activités permettant aux élèves de débattre sur le sens qu'ils donnent à la phénoménologie macroscopique observée et de discuter des phénoménologies nanoscopiques explicatives pour la transformation chimique seront donc nécessaires. On peut cependant raisonnablement penser que, lors de l'apprentissage du traitement quantitatif

des transformations chimiques qui va suivre, ils seront plus aptes à s'approprier, compte tenu des obstacles auxquels ils se sont confrontés, les concepts et procédures institutionnalisés par l'enseignant (tableau descriptif du système au cours de la transformation et introduction de la notion d'avancement).

BIBLIOGRAPHIE

- BARKER V. (2000). *Beyond appearances : student's misconceptions about basic chemical ideas. Report for the Royal Society of Chemistry.* <http://www.chemsoc.org/networks/learnnet/miscon.htm>.
- BARLET R. & PLOUIN D. (1994). L'équation bilan en chimie. Un concept intégrateur source de difficultés persistantes. *Aster*, n° 18, pp. 27-55.
- BROUSSEAU G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2001). *Hors Série, n° 2, du 30 août 2001*. Paris, ministère de l'Éducation nationale, pp. 4-26.
- DUMON A. & LAUGIER A. (2004). L'équation de réaction : approche historique et didactique de la modélisation de la transformation chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 98, n° 866, pp. 1131-1144.
- FILLON P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *Aster*, n° 25, pp. 113-141.
- FURIO C., AZCONA R. & GUIASOLA J. (2002). The learning and teaching of the concepts amount of substance and mole: a review of the literature. *Chemistry Education Research And Practice In Europe*, vol. 3, n° 3, pp. 277-292.
- HESSE J. & ANDERSON C. (1992). Student's conception of chemical change. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 29, pp. 277-299.
- HUDDLE P.A. & PILLAY A.E. (1996). An In-depth Study of misconceptions in stoichiometry and chemical equilibrium at a South Africa University. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 33, n° 1, pp. 65-77.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000). Practical works and representation of chemical reaction in the macroscopic and microscopic levels : a study with fourth form students. *Chemistry Education Research And Practice In Europe*, vol. 1, n° 1, pp. 61-75.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2001). D'Aristote à Mendéléév, plus de 2000 ans de symbolisme pour représenter la matière et ses transformations. *L'Actualité Chimique*, mars 2001, pp. 38-50.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2003). À la recherche des obstacles épistémologiques à la construction du concept d'élément chimique par les élèves de seconde. *Didaskalia*, n° 22, pp. 69-97.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1988). Gestion d'activités de modélisation en classe. *Aster*, n° 7, pp. 121-141.
- NURRENBERN S. & PICKERING M. (1987). Concept Learning versus Problem Solving : is there a Difference ? *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 6, p. 508.
- ORANGE C. (2003). Investigation empirique, construction de problèmes et savoirs scientifiques. In C. Larcher (dir.), *L'expérimental dans la classe*. Paris, INRP, pp. 59-84.
- ROBARDET G. (2001). Quelle démarche expérimentale en classe de physique ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 95, n° 836, pp. 1173-1190.
- SAVOY L.-G. & STEEPLES B. (1994). Concept hierarchies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, n° 75, pp. 97-103.
- SCHMIDT H.J. (1990). Secondary school student's strategies in stoichiometry. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 4, pp. 457-471.

TULBERG A., STRÖMDAHL H. & LYBECK L. (1994). Students' conceptions of 1 mole and educators' conceptions of how they teach 'the mole'. *International Journal of Science Education*, vol. 16, n° 2, pp. 145-156.

YARROCH W.L. (1985). Student understanding of chemical equation balancing. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 22, pp. 449-459.

Cet article a été reçu le 9/12/2003 et accepté le 6/07/2004.

Book reviews

C. LARCHER, M. GOFFARD (éds) (2003). *L'expérimental dans la classe. Enjeux, référence, fonctionnements, contraintes. Recherche en association sous la direction de C. Larcher.* Lyon, éditions de l'INRP, 158 p.

Le livre de 158 pages, à la maquette claire et agréable, regroupe 5 chapitres. Il s'annonce curieusement comme le résultat d'un ensemble d'une recherche lancée en 1996 par l'INRP en relation avec l'opération *La main à la pâte*, bien que cette opération n'apparaisse pas dans l'ouvrage, dont le dernier chapitre relate des recherches achevées à cette date. L'ensemble des didactiques des disciplines scientifiques est représenté.

L'intérêt de ce livre se trouve à mon sens dans l'ensemble des chapitres 2 et 3 qui forment un tout, et dans le chapitre 5 qui apporte un éclairage original sur l'analyse linguistique d'un fonctionnement didactique d'élèves de Première S. Le chapitre 1, de M. Goffard, se présente comme un état des lieux de l'utilisation d'activités expérimentales en classe et le 4, de M. Coquidé, donne un point de vue sur la relation entre les activités expérimentales et les *curricula*.

Dans le chapitre 2, A. Laugier et P. Schneeberger présentent des analyses d'activités expérimentales innovantes, caractérisées suivant trois critères : l'entrée pédagogique privilégiée par l'enseignant, l'origine du problème que les élèves doivent résoudre et le type de réel auquel ils sont confrontés. Dans la première partie du chapitre, les auteurs présentent des repères pour situer la place de l'expérimental dans les activités scientifiques en classe en articulant des pratiques sociales de référence

chez les scientifiques et les activités de classe. L'analyse des différences entre l'apprentissage à l'école et la pratique professionnelle est mise en évidence dans les différentes phases de l'enseignement : contextualisation, dévolution, personnalisation, validation et institutionnalisation.

La deuxième partie du chapitre fournit des caractéristiques des pratiques expérimentales observées en classe selon différents aspects : l'objet de l'observation, la tâche d'investigation et le réel sur lequel porte l'activité de l'élève. Quelques exemples d'activités sont ensuite présentés, qu'elles soient des auteurs du chapitre ou d'autres participants ayant répondu à l'appel d'association de l'INRP. Il y est question de fermentation alcoolique en classe de première sciences expérimentales (P. Schneeberger), d'une sortie sur le terrain en CM2 et de la transformation du schiste en micaschiste en première S (C. Orange), de l'approche de la stœchiométrie, de la détermination d'un volume de gaz, et de l'étude de transformations chimiques à partir de textes historiques en seconde (A. Laugier), de la respiration du muscle broyé en première S, de l'étude du métabolisme d'algues en seconde et en première S, de la réalisation d'un terrarium au cycle 2, d'un comportement de chauve-souris lors de la formation de PE2 (M. Coquidé), d'un circuit RLC en oscillations forcées en terminale S et d'une mesure de chaleur latente en première S (D. Beauflis). Une partie de ce large ensemble d'études est classée suivant l'origine du problème posé aux élèves – entièrement/partiellement construit par les élèves, ou posé par l'enseignant – et l'autre suivant le mode de confrontation des élèves au réel (objets manipulables, courbes, images).

La suite du chapitre traite du mode de fonctionnement dans la classe, repérant les activi-

tés cognitives des élèves et identifiant leurs stratégies ou les pratiques des enseignants. Avant de conclure, les auteurs montrent qu'ils se sont souciés du point de vue des élèves sur les pratiques innovantes à l'aide de questionnaires ; ils fournissent en annexe un tableau (peu exploitable) résumant leur enquête. Il en résulte un climat d'autosatisfaction qui ne pose pas les véritables problèmes de la gestion par des enseignants des résultats d'innovations : relation avec la structuration des connaissances, avec leur évaluation, avec les manuels scolaires, etc.

Le chapitre 3, par C. Orange, constitue une analyse théorique des données du chapitre 2. Il justifie à lui seul la lecture de l'ouvrage même si quelques passages ne sont pas simples à lire. L'auteur reprend la comparaison entre la pratique du scientifique et celle des élèves en situation expérimentale dont il dégage les fonctions épistémologiques. Pour cela, il étudie la construction de problèmes explicatifs suivant le point de vue de l'investigation empirique. À ce propos, il considère la mise à l'épreuve d'un modèle, la mise en tension critique des idées explicatives et des investigations empiriques, l'instanciation des modèles, et l'articulation expérience/relevé empirique. Cela lui permet de discuter de la difficulté pédagogique à traiter à la fois des connaissances indispensables à la gestion du registre empirique et de celles relatives aux modèles. La solution de l'allongement dans le temps imposé par la décomposition de la tâche y apparaît comme une solution naturelle sauf pour un des exemples étudiés (l'approche de la stœchiométrie) pour lequel l'analyse, à l'aide de ce cadre théorique, révèle qu'ont été menées de front une véritable investigation empirique des élèves et la problématisation.

Le chapitre 5 correspond aux résultats de la thèse de G. Collet et propose une approche linguistique de la modélisation par l'élève, travail qui fut particulièrement novateur. Sur l'exemple de l'enseignement de l'énergie en première, l'apprentissage y est décrit au moyen de l'activité langagière qui débute par le recensement des éléments du problème, suivie d'une phase de recherche de synonymes entre termes du modèle et propriétés des objets et des phénomènes de l'expérience, et s'achève par exploration des possibilités syntaxiques des mots du modèle. Les méthodes et les objectifs de l'analyse sémantique sont alors explorés.

Dans une deuxième partie de ce chapitre, le rôle de la langue dans l'appropriation des concepts scientifiques est abordé. L'analyse langagière des données montre la nécessité de la co-présence de la souplesse d'un niveau de langage naturel (niveau notionnel) et de la rigueur d'un niveau scientifique (niveau conceptuel) dans les processus d'apprentissage.

La dernière partie du chapitre permet de comprendre pourquoi les mécanismes langagiers occupent une large place dans la découverte et dans l'appréciation de la plausibilité. Une phrase (énoncée entre élèves) ne peut ainsi participer à la construction des connaissances que si les termes qui la constituent sont en harmonie (isotopie sémantique).

L'intérêt de certains chapitres ne doit pas évaluer la pauvreté du travail éditorial, révélé entre autres par la pitoyable gestion de la bibliographie. Le choix d'avoir regroupé les références comprises entre 1992 et 2000 en fin d'ouvrage, laissant les autres en fin de chaque chapitre, n'est pas pratique à l'usage, d'autant que cette règle ne vaut pas pour les chapitres 1 et 5 ! Par ailleurs, les auteurs n'étant nommés ni sur la couverture ni dans la table des matières, on ne découvre qu'au fil de la lecture qu'il s'agit d'un ouvrage collectif. On notera aussi que l'introduction éditoriale commence par se plaindre que l'enseignement des sciences est souvent considéré comme trop mathématisé alors que le chapitre 1, également écrit par une co-éditrice, préfère révéler la place non négligeable des activités expérimentales dans l'enseignement ! Enfin, l'hétérogénéité des points de vue épistémologiques entre les chapitres y est simplement constaté dans cet ouvrage, dont le lectorat n'est en réalité pas défini.

J.-F. Le Maréchal

BENHASSOUN S. (2004). *Enseignement-apprentissage des ondes dans les lycées tunisiens : un essai de remédiation.* Thèse de doctorat, université Claude Bernard-Lyon 1, 224 p. et un volume d'annexes.

Cette thèse porte sur l'enseignement des ondes en terminale scientifique des lycées tunisiens. Le domaine conceptuel concerné est exploré avec un éclairage historique et une dimension épistémologique. L'auteur relève

que le concept d'onde est avant tout une construction théorique ne découlant pas de façon immédiate de l'observation. Il enchaîne par une courte réflexion sur la place de l'expérience, de l'instrument et de la mesure en physique. L'auteur fait ensuite une (trop) rapide revue des travaux déjà réalisés sur la question. Il présente les enseignements préconisés en Tunisie, en se référant au cadre théorique de la transposition didactique.

Pour construire son enseignement, l'auteur commence par des réflexions classiques sur l'apprentissage : constructivisme, socioconstructivisme, situations problèmes, toutes références largement partagées par les didacticiens des sciences. Il rajoute la prise en compte des mises en relation des divers registres sémiotiques, développement plus récent des recherches dans ce domaine. Ceci amène à une réflexion utile sur les divers registres de langage : naturel, représentations symboliques, graphiques et dynamiques.

Pour « *construire et réaliser une séquence d'enseignement* », un choix fort est alors fait : s'appuyer sur deux outils, un outil expérimental (une cuve à ondes particulière) et un outil formel (le phaseur). En couplant une cuve à ondes mécanique traditionnelle à un diaphragme et un stroboscope, il peut faire travailler les élèves sur les variables temps et espace, en séparant l'étude spatiale à un instant donné et l'étude au cours du temps en un point donné. Cette amélioration d'un dispositif classique est très utile et on aurait aimé une présentation plus précise de l'outil expérimental qui faciliterait sa diffusion. Le phaseur permet aux élèves de représenter par un vecteur l'état de vibration du système en couplant les variables spatio-temporelles et en permettant de repérer facilement la phase. Ceci leur permet d'analyser les situations physiques en facilitant leur modélisation.

L'auteur fait ensuite une description détaillée des divers scénarios de la séquence. Ceci permet de mieux comprendre les progressions et enchaînements prévus. Cependant, l'analyse *a priori* faite par l'auteur pour justifier ses choix est escamotée dans le texte. C'est dommage car cette proposition remarquable de séquence aurait été d'autant plus convaincante et solide.

L'analyse des effets de ces séquences sur l'apprentissage est menée essentiellement à partir des réponses écrites à un questionnaire.

Une étude poussée en est faite pour chaque question : analyse et catégorisation des réponses, essai d'interprétation. Cela permet de suivre l'appropriation progressive de l'outil phaseur et les succès dans la mise en œuvre pour prédire et expliquer les résultats expérimentaux. L'auteur essaie de définir de façon plus précise les compétences spécifiques acquises par les élèves. Il isole ainsi état, milieu, référence, phaseur, superposition, addition. Il peut alors construire des profils d'élèves. Il montre ainsi que le phaseur, lorsque les élèves s'en emparent, est indéniablement puissant pour les aider à résoudre les problèmes. Il confirme que doter les élèves d'une technique adaptée à la résolution de tâches leur donne la possibilité d'avancer et d'élargir le champ des possibles, expérimentaux comme théoriques. Peut-être l'auteur aurait-il pu explorer encore cette question. Par exemple, le phaseur reste-t-il au niveau de la technique de résolution ou ouvre-t-il sur la « technologie » des savoirs en jeu en aidant à comprendre la « raison d'être » des phénomènes observés ? En bref, permet-il d'améliorer la compréhension ?

J.-J. Dupin

MORTIMER E., SCOTT P. (2003). *Meaning Making in Secondary Science Classrooms*. Maidenhead, Philadelphia, Open University Press, 141 p.

Dans sa préface à ce livre relativement bref, James Wertsch en situe immédiatement l'importance : « *c'est un des meilleurs exposés que nous ayons aujourd'hui de la façon dont la théorie socioculturelle s'applique dans les pratiques de classe... [il] apporte une contribution majeure à la théorie socioculturelle elle-même* ».

L'idée de base que les auteurs veulent défendre, qui a en quelque sorte donné naissance au livre, est que l'épicentre de l'enseignement et de l'apprentissage des sciences ne se situe pas dans les *activités* qui peuvent se dérouler dans les classes, mais dans le *discours* que l'enseignant et les élèves échangent autour de ces activités. Cette prise de position repose évidemment sur les théories vygotskiennes qui attribuent une nature sociale à la production et à l'apprentissage des connaissances et pour lesquelles le langage est le médiateur indispensable.

L'observation montre que les pratiques réelles en classe sont très variées ; mais la pratique dominante consiste en un discours essentiellement produit par l'enseignant, et où les interventions des élèves se réduisent à des réactions, laissant peu de place à la construction par eux d'une pensée articulée.

Les auteurs entendent donc présenter un paradigme post-constructiviste, basé sur les théories socioculturelles. Celles-ci sont exposées dans le chapitre 2. Notamment, les auteurs abordent de front la bonne question : « en quoi une perspective socioculturelle est-elle utile pour la recherche sur l'enseignement des sciences ? » Puis ils développent un cadre d'analyse pour les interactions en situation de classe (chapitre 3), et fournissent deux exemples détaillés d'application de ce cadre, assez différents quant aux sujets abordés et aux méthodes d'organisation de la classe (chapitres 4 et 5). Que ces deux exemples proviennent d'observations en classe, dans un cas au Brésil, dans l'autre dans le nord de l'Angleterre, apporte un intérêt supplémentaire à leur confrontation.

L'idée essentielle du cadre théorique, illustrée par les exemples des chapitre 4 et 5, est de paramétrer l'activité de l'enseignant en classe par cinq types de caractéristiques : les objectifs d'enseignement, le contenu de cet enseignement, l'approche communicative, les types de discours, les modes d'intervention de l'enseignant. Les apports les plus neufs portent sur l'approche communicative et les types de discours :

- la communication que l'enseignant instaure dans sa classe peut être classifiée à partir de deux couples : dialogique/fondée sur l'autorité de l'enseignant, et interactive/non interactive ;

- il est utile de repérer et de mettre en relation avec les autres caractéristiques, si le discours de l'enseignant est du type initialisation-réponse de l'élève-évaluation par l'enseignant, ou initialisation-réponse-relance par l'enseignant, avec les diverses formes de relances possibles.

Le livre se termine par dix notes synthétiques sur la perspective socioculturelle, sur les théories de Vygotsky et de Bakhtine, qui seront utiles aux formateurs ou enseignants souhaitant se familiariser avec ces idées, ou à des étudiants en DEA.

Du point de vue d'un didacticien (français en tous cas) une première réserve peut être la référence limitée aux savoirs en jeu. Comment la nature de ces savoirs influence-t-elle le discours qui mènerait à un meilleur apprentissage ? Une analyse plus serrée du discours autour d'activités de travaux pratiques, par exemple, aurait probablement pu donner des aperçus importants sur ce point.

Un deuxième point critique serait l'idée, que le livre peut parfois donner, que les conflits entre les nouvelles idées et les vieilles doivent se résoudre. Très - trop - souvent, il n'en est rien : les vieilles idées perdurent, peut-être transformées, parce qu'elles ont un champ de validité apparent (le plus souvent la vie quotidienne) que les nouvelles idées ne leur ont pas contesté. L'individu applique alors des théories contradictoires dans des domaines différents.

Enfin, on peut constater que les analyses restent assez qualitatives, signe sans doute que les catégories par lesquelles les auteurs tentent de décrire les efforts de l'enseignant de donner sens aux concepts scientifiques, restent encore assez larges.

Ces réserves n'entament pas l'intérêt de ce livre. À mon sens, l'enjeu actuel pour la didactique des sciences est bien de se saisir réellement d'une telle problématique socioculturelle pour l'enrichir dans deux directions : y faire sentir plus fortement le poids des savoirs spécifiques en jeu dans les interactions de classe ; ne pas se limiter à l'analyse du seul discours de l'enseignant, mais prendre en compte l'ensemble des phénomènes langagiers dans la classe, y compris l'activité de co-construction des connaissances entre les élèves.

C. Buty

DENZIN N. K., LINCOLN Y. S. (dirs) (2000). *Handbook of Qualitative Research*. Thousand Oaks (California) et Londres (Angleterre), SAGE Publications, 1 065 p.

Ce volumineux ouvrage collectif est devenu aux États-Unis, en l'espace de quelques années seulement, une sorte de classique de la méthodologie qualitative, souvent cité dans les plans de cours dans les facultés de sciences sociales. Les éditions de 1994 (643 p.) et celle considérablement augmentée

publiée en 2000 (1065 p.) sont toutefois si différentes l'une de l'autre que l'on pourrait presque les considérer comme deux ouvrages distincts. Si les contenus demeurent globalement les mêmes, ce sont, dans près de la moitié des cas, les auteurs qui ont changé d'une version à l'autre. Une quarantaine de chapitres denses et inédits, rédigés par autant de collaborateurs ou d'équipes provenant pour la plupart des États-Unis, dessinent successivement les principaux paradigmes et des cadres théoriques pouvant servir de fondements à des projets de recherche. Les auteurs réunis ici sont peu connus en Europe, sauf peut-être Norman Denzin, co-responsable de l'ensemble, qui publie chaque année un recueil d'articles dans une collection intitulée *Studies in Symbolic Interaction*.

Deux caractéristiques principales font l'originalité de ce *Handbook of Qualitative Research*. D'abord, comme son titre l'indique, les auteurs s'inscrivent entièrement dans les approches de la méthodologie qualitative, en démontrant la richesse et la variété de ces stratégies, à partir d'exemples concrets. Le premier chapitre fournit d'ailleurs en une trentaine de pages un bilan exhaustif de l'évolution de la recherche qualitative, principalement en sociologie et en anthropologie. Par ailleurs, et c'est l'un de ses points forts, l'ouvrage dans son ensemble se veut fondamentalement ancré dans la tradition sociologique américaine de l'École de Chicago ; les auteurs revendiquent d'emblée pour le chercheur le statut de « bricoleur » qui forge ses outils de recherche (pp. 2 et 19), et les avenues proposées sont le plus souvent interdisciplinaires, voire transdisciplinaires. Ainsi, l'ouvrage pourra inspirer à la fois les ethnologues, anthropologues, sociologues, historiens et les chercheurs en psychologie sociale.

Les chapitres ne s'apparentent pas à des modes d'emploi techniques mais contiennent plutôt des exposés théoriques délimités, qui situent des champs d'investigation, des cadres théoriques, ou encore identifient les apports possibles de certains croisements interdisciplinaires. Après une première partie qui présente les principaux éléments de l'ouvrage (comme l'épistémologie, l'éthique, l'étude des représentations), la deuxième partie cerne certaines approches en émergence, comme les études culturelles (les « Cultural Studies »), les études sur le genre (les « Gender Studies ») et la théorie critique

actuelle qui prolonge les apports de l'École de Francfort. La partie suivante inventorie successivement une dizaine de stratégies de cueillette de données comme les méthodes constructivistes, les études de cas, l'ethnographie, l'observation participante, l'ethnométhodologie, la méthode biographique, la théorisation ancrée (« Grounded Theory Methodology »). La quatrième partie présente des méthodes de collecte et des formes d'analyse, de l'entretien à l'analyse visuelle, avec des contributions très originales sur les techniques d'observation et sur le récit biographique de l'expérience personnelle. Plus brèves, les deux dernières parties (5 et 6) sont également stimulantes, particulièrement les chapitres sur l'ethnographie réflexive, la validation des interprétations, sur le choix des critères (« à une époque où tout est devenu relatif », expliquent les auteurs) et surtout un exposé innovateur sur l'écriture comme moyen d'investigation (de L. Richardson).

Pour situer le lecteur français, je dirais que le style direct et pratique de ce livre s'apparente parfois à celui de M. Huberman et M. Miles, dont l'excellent *Analyse des données qualitatives* avait été traduit dans notre langue en 1991 chez De Boeck. Ces deux chercheurs avaient d'ailleurs contribué à la première édition du présent ouvrage. Incontestablement, les deux versions de ce *Handbook of Qualitative Research* constituent une véritable mine de ressources réunies dans une présentation à la fois originale et exhaustive. Plusieurs des auteurs fournissent en fin de chapitre une critique de leurs propres arguments et n'hésitent pas à poser les limites de leur perspective théorique, sinon de leur contribution. Si sa lecture exige une très bonne connaissance de l'anglais, son potentiel heuristique récompensera le chercheur assidu. Signe tangible du succès de la deuxième édition, Denzin et Lincoln ont par la suite publié - chez le même éditeur - plusieurs ouvrages collectifs sur les méthodes de recherche, dont certains sont des dérivés ou des versions abrégées du présent *Handbook of Qualitative Research*. Ce livre rigoureux, véritable voyage au pays des théories, me semble indispensable à tout séminaire abordant les questions méthodologiques, et servira peut-être de planche de salut à certains thésards qui se sentent isolés ou en mal d'inspiration.

Y. Laberge

CHEMCHENG X. *L'éducation à l'environnement au Laos : une proposition d'ingénierie didactique autour du biogaz pour les lycéens, et d'ingénierie de formation à la technologie du biogaz pour les villageois-éleveurs.* Thèse de doctorat, université J. Fourier-Grenoble, 281 p. + 95 p. d'annexes.

La thèse présentée par Xaja Chemcheng vise à construire « un projet de complément de formation des lycéens et de formation des villageois au développement du biogaz dans le cadre du développement durable ». Partant de l'analyse des causes d'échec de l'implantation du biogaz au Laos, Xaja Chemcheng s'appuie sur l'approche anthropologique de Chevallard (1985, 1992, 2002) et les travaux de Rabardel & Vérillon (1995) pour construire une ingénierie didactique qui s'inscrit dans le cadre d'une éducation au développement durable.

La première partie présente avec clarté les techniques de production du biogaz et son intérêt pour les villageois du Laos. Après s'être intéressé à l'utilisation de digesteurs pour biogaz dans les pays voisins, X. Chemcheng décrit le contexte laotien à partir d'enquêtes réalisées sur le terrain dans plusieurs régions, par questionnaires et entretiens auprès de divers spécialistes et de propriétaires de digesteurs. Un ensemble d'obstacles potentiels à l'installation et à l'utilisation d'unités de biogaz dans les villages laotiens sont décelés, de même que sont dégagées les connaissances (théoriques et pratiques) nécessaires pour les utilisateurs de biodigesteurs.

Dans la deuxième partie, l'auteur présente méthodiquement les savoirs en jeu dans la maîtrise de la technologie du biogaz, dans le but de mieux comprendre les dysfonctionnements analysés dans la première partie. Il analyse ensuite les programmes de l'enseignement secondaire (en biologie, physique, chimie, technologie et géographie) de façon à repérer comment ces savoirs sont abordés dans la scolarité. Cette étude, enrichie par des observations des pratiques enseignantes, lui permet de faire des propositions à prendre en compte pour l'ingénierie ; elle montre clairement que le concept de recyclage occupe une place déterminante dans le réseau des concepts à mettre en jeu. Cette partie se termine par l'analyse des savoirs techniques nécessaires à la maintenance du digesteur, savoirs qu'il sera nécessaire d'introduire, après transposition, dans la formation des villageois-

éleveurs pour permettre la mise en place d'unités fonctionnelles de biogaz.

Dans la troisième partie, l'auteur présente une ingénierie didactique qui permette aux lycéens d'opérationnaliser les savoirs scientifiques étudiés en classe. Il propose également un projet de formation destiné à des villageois-éleveurs pour l'utilisation et la maintenance de digesteurs. La proposition destinée aux lycéens consiste en la réalisation d'un *atelier biogaz* conçu dans le cadre d'une pédagogie du projet tandis que la formation des villageois est basée sur des « mises en situation » visant à donner du sens aux opérations nécessaires au fonctionnement du digesteur.

Il convient de souligner l'importance du thème abordé par X. Chemcheng qui répond aux préoccupations des organismes nationaux de son pays, le Laos, concernant le développement des ressources humaines « en préservant l'environnement naturel, les écosystèmes et la biodiversité de manière durable ». L'objet de cette recherche présente des enjeux primordiaux à caractères éthique, éducatif et économique. En outre, X. Chemcheng a été conduit à recourir à un grand nombre de connaissances issues de différents domaines disciplinaires, ce qui donne une dimension interdisciplinaire affirmée au travail mené.

Le projet de X. Chemcheng vise le développement de la qualité de l'enseignement en tenant compte des contraintes laotiennes d'encadrement et de faisabilité. Il veut pallier également le défaut de prise en compte de certaines dimensions dans la formation des agriculteurs, en particulier la dimension écologique qui prend de plus en plus d'ampleur dans un pays où la pression démographique est grandissante.

L'auteur fait entrevoir dans son texte des applications possibles pour les concepts de didactique qui sont présentés dans la première partie (« cadre théorique »). Dans son exposé oral, il a montré de façon plus détaillée comment il utilise, face au problème qu'il cherche à résoudre, les notions de transposition didactique, d'organisation praxéologique du savoir, d'instrument et d'action instrumentée.

La thèse de X. Chemcheng présente un grand intérêt dans la mesure où elle devrait déboucher sur une action novatrice susceptible de participer à un développement durable dans son pays.

On ne peut qu'encourager X. Chemcheng à poursuivre ses travaux et à tester la faisabilité des propositions d'ingénierie didactique en faisant fonctionner les concepts de didactique auxquels il se réfère.

P. Schneeberger