

Analyse des difficultés des étudiants à propos des concepts de phase et de surface d'onde, du principe de Huygens

Analysis of students' difficulties on the concepts of phase and wave surface, on Huygens' principle

Laurence MAURINES

IUFM de Créteil
LDSP, Université Denis Diderot Paris 7, case 7086
2, Place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

La première partie de cet article porte sur des situations de propagation selon une direction et le concept de phase d'une onde. La deuxième concerne des situations de propagation selon plusieurs directions, de réflexion et transmission, de superposition d'ondes sphériques cohérentes et le concept de surface d'onde. Les grandeurs physiques auxquelles les étudiants relient ces deux concepts et les méthodes utilisées pour tracer une surface d'onde sont dégagées et analysées. Des tendances de raisonnement déjà mises en évidence dans nos précédentes recherches se manifestent : considérer l'onde comme un objet matériel, réduire le nombre de concepts et les matérialiser. Quelques remarques sur des manuels d'enseignement et quelques propositions pédagogiques sont faites.

Mots clés : *raisonnement commun, université, phase, surface d'onde, principe de Huygens.*

Abstract

First, this paper focuses on situations of propagation along one direction and on the concept of wave phase. Second, it deals with situations of propagation along several directions (propagation in an inhomogeneous medium, from an extended source, reflection and transmission, superposition of coherent spherical waves) and on the concept of wave surface. The physical quantities to which the students linked these two concepts and the methods they used in order to draw a wave surface are put forward and analysed. The same trends towards a mechanistic reasoning and towards a reduction and materialization of concepts as those previously pointed out are encountered. Some school text-books have been analysed and some pedagogical implications are discussed.

Key words : *common reasoning, university, wave phase, wave surface, Huygens' principle.*

1. INTRODUCTION

Nous menons depuis plusieurs années des recherches sur les difficultés soulevées par l'étude des phénomènes ondulatoires car il s'agit d'un domaine moins exploré que d'autres sur le plan de la didactique et connu des enseignants comme difficile à enseigner. Notre objectif est d'analyser les principales tendances de raisonnement observées dans des groupes d'élèves et d'étudiants relativement variés afin d'en proposer un « modèle », c'est-à-dire une description organisée, aussi synthétique et prédictive que possible. Nous espérons par là favoriser une réflexion sur les objectifs pédagogiques à poursuivre et sur les méthodes à utiliser pour les atteindre.

Cette étude fait partie d'une recherche portant sur les difficultés soulevées par le modèle géométrico-ondulatoire de la propagation d'une onde dans un milieu de dimension trois, en présence ou non d'obstacles. Dans ce modèle, une onde est décrite au niveau macroscopique à l'aide de rayons et de surfaces d'onde et est reconstruite à l'aide d'ondes élémentaires sphériques (principe de Huygens-Fresnel). Après avoir analysé comment des étudiants ayant reçu un enseignement sur les ondes utilisent les concepts de rayon et de surface d'onde pour représenter graphiquement des phénomènes sonores et lumineux (Maurines, 1997), nous nous intéressons ici aux facteurs dont dépendent, pour eux, les concepts de phase et de

surface d'onde, et aux méthodes utilisées pour tracer une surface d'onde dans une situation donnée. Cette étude vise à examiner si les tendances vers un raisonnement mécaniste et monotonnel, privilégiant l'expérience sensible et des indices perceptibles, mises en évidence pour la propagation d'un signal sur une corde (Maurines, 1986) et d'un signal sonore selon une direction (Maurines, 1992), se manifestent également pour des signaux et des ondes se propageant selon plusieurs directions.

Parmi la littérature en didactique portant sur les conceptions et modes de raisonnement dans le domaine des ondes, nous n'en connaissons pas ayant abordé ces thèmes. Nous pouvons par contre repérer l'existence de tendances vers un raisonnement mécaniste en termes d'objet que l'on suit dans plusieurs études portant sur des situations identiques ou non à celles que nous avons explorées. Il en est ainsi des études sur le son de Linder & Erickson (1989) et de Watt & Russel (1990), des travaux sur la superposition de deux signaux transversaux se propageant sur une corde d'Abboud (1989) et de Wittmann *et al.* (1999), des études sur la lumière de Lefèvre (1988), d'Ambrose *et al.* (1999) et de Colin (1999). Signalons enfin les nombreux travaux sur l'optique géométrique et la formation des images qui mettent en évidence l'existence d'un raisonnement en termes d'image voyageuse (Fawaz & Viennot, 1986 ; Goldberg & Mc Dermott, 1987 ; Kaminsky, 1989 ; Galili, 1996, etc.)

Nous allons tout d'abord préciser la problématique et la méthodologie de cette étude. Puis nous présenterons les résultats obtenus et les analyserons. Nous montrerons que le type de raisonnement, dégagé avant enseignement à propos de la propagation d'un signal sur une corde et d'un signal sonore selon une direction, se manifeste également après enseignement, dans les situations explorées et pour les questions posées. Nous terminerons par une analyse succincte des manuels d'enseignement et quelques propositions pédagogiques.

2. PROBLÉMATIQUE

Nous allons commencer par faire quelques remarques sur le domaine conceptuel concerné par cette étude. Cela permettra de justifier en partie les thèmes spécifiques explorés lors de cette recherche et de situer les réponses des étudiants.

2.1. Quelques remarques sur les concepts de phase et de surface d'onde, sur le principe de Huygens

Nous ne nous intéressons qu'à des situations qui peuvent être étudiées dans le cadre d'un modèle scalaire où la connaissance d'un seul champ suffit (approximation de l'optique et acoustique physiques).

Une onde est une modification d'une propriété de l'espace variable à la fois dans l'espace et le temps. Le champ caractérisant cette propriété est décrit par une fonction F dépendant des variables d'espace et de temps. Les fonctions partielles de la fonction F sont associées aux descriptions spatiale et temporelle du phénomène. Le phénomène de propagation se traduit par le fait que la fonction F dépend d'une fonction couplant l'espace et le temps. Cette fonction est appelée la phase de l'onde progressive (Born & Wolf, 1980, p. 17). Nous la noterons Φ . Nous dirons qu'à une valeur donnée de la phase correspond un point particulier de l'onde et généraliserons ainsi des expressions du type « le front d'un signal », « un sommet », « un zéro d'une onde progressive monochromatique », etc. Si la phase est constante en un point de l'onde, elle dépend du temps en un point du milieu, et de l'espace à un instant donné.

Si le milieu est homogène, non dissipatif et non dispersif, l'onde est décrite dans le cas d'une propagation unidirectionnelle par une fonction du type $F(x - ct)$. La phase est donnée par $\Phi = x - ct$ (celle-ci prend la forme $\Phi = \omega t - kx$ pour une onde sinusoïdale de pulsation ω et de vecteur d'onde k). Un point de l'onde correspond à une valeur constante de Φ et donc également de F . Dans le cas d'une propagation tridirectionnelle, un point de l'onde correspond toujours à une valeur constante de la phase Φ mais plus de F . Ainsi, si la source est omnidirectionnelle, F peut se mettre sous la forme $1/r G(r-ct)$: F décroît avec r et Φ est donnée par « $r-ct$ ». Si la source est directionnelle (comme dans le cas d'un haut-parleur), F est de la forme $A(r, \vartheta) / r G(r - ct)$: F dépend de r et de la direction de propagation, Φ étant toujours donnée par « $r-ct$ ». Si le milieu est dissipatif et non dispersif, un point de l'onde correspond à une valeur constante de la phase, mais la valeur de F en ce point de l'onde décroît exponentiellement au cours de la propagation (les fonctions F précédentes sont multipliées par $e^{-\alpha x}$ ou $e^{-\alpha r}$).

Lors de la propagation dans un milieu de dimension trois, on est amené à définir, à partir de la fonction d'onde $F = Ae^{i\Phi}$, des surfaces particulières. Une surface de phase, encore appelée surface d'onde, est l'ensemble des points atteints au même instant par l'onde (c'est donc l'ensemble des points vérifiant $\Phi = \text{constante}$ à t donné). Une surface isoamplitude est l'ensemble des points pour lesquels l'amplitude A du champ est la même. Sur une surface équiphasé, l'amplitude de l'onde n'est pas nécessairement

constante (Born & Wolf, 1980, p. 17). Ainsi, dans le cas de la propagation d'une onde sonore, émise par un haut-parleur directionnel de diagramme de rayonnement donné, la surface de phase et la surface d'onde sont sphériques, mais la surface d'égale amplitude sonore ne l'est pas.

Le principe de Huygens est un principe de superposition qui permet de comprendre la propagation de proche en proche d'une onde. Il apparaît aujourd'hui comme la formulation qualitative du théorème intégral de Helmholtz et Kirchhoff, le principe de Huygens-Fresnel en étant une formulation quantitative approchée (Jessel, 1973, p. 105). Ce théorème montre qu'une onde, se propageant à l'extérieur d'une surface fermée Σ contenant la source (par exemple une surface d'onde), est identique à celle que l'on obtiendrait en supprimant cette source et en la remplaçant au temps t par des sources fictives convenables réparties sur toute la surface Σ . Le champ rayonné par ces sources (nous les appellerons source de Huygens) correspond, selon les cas, à celui de monopôles (émission omnidirectionnelle) ou/et de dipôles (émission directionnelle). Le principe de Huygens dit que, grâce à cette équivalence, on peut passer de la surface d'onde à un instant donné à la surface d'onde à un instant ultérieur par simple construction de l'enveloppe des surfaces d'ondes des ondes émises par les sources de Huygens. Le principe de Huygens-Fresnel permet, quant à lui, d'obtenir l'amplitude de l'onde en un point donné : celle-ci est égale à la somme des amplitudes des ondes émises par les sources de Huygens.

Le principe de Huygens, ou principe des ondes-enveloppes, peut être utilisé dans le cas de sources fictives réparties sur une surface d'onde mais aussi dans celui de sources ayant une existence réelle. C'est le cas des sources secondaires réparties sur une surface réfléchissante ou de séparation entre deux milieux matériels. C'est aussi celui de sources primaires. Ce principe des ondes-enveloppes dit que la surface d'onde de l'onde résultant de la superposition des ondes émises par une distribution continue de sources ponctuelles monochromatiques cohérentes est l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes élémentaires sphériques émises par les sources ponctuelles. Lorsque la distance point d'observation-source est grande devant la longueur d'onde et la dimension de la source, cette surface d'onde est sphérique et la répartition en amplitude varie sur la surface d'onde.

2.2. Questions explorées

Cette étude sur les concepts de phase et de surface d'onde et sur le principe de Huygens a débuté, dès 1989, à la suite de nos premiers travaux sur la propagation d'un signal transversal sur une corde et, depuis, a été

menée en parallèle avec nos autres recherches. Elle a commencé par une première enquête exploratoire, centrée sur le concept de phase et mettant en jeu un signal ou une onde monochromatique se propageant selon une direction. Cette enquête était motivée tant par l'absence de travaux à ce sujet que par le rôle clé qu'accordaient au concept de phase les études de Colmez (1975) et Hulin (1975) ainsi que l'analyse de contenu réalisée pour notre précédente recherche (Maurines, 1986). Les résultats de cette première enquête et le fait que nous avions débuté, en 1991, une étude sur les difficultés soulevées par la propagation d'une onde selon plusieurs directions, nous ont conduits, en 1993, à élargir le domaine d'étude au concept de surface équiphasse, c'est-à-dire au concept de surface d'onde. Une seconde enquête exploratoire, centrée sur le concept de surface d'onde et mettant en jeu une onde monochromatique sonore se propageant dans l'air, a alors été réalisée. Le bilan de ces deux premières enquêtes exploratoires (Maurines, 1995) et une analyse des conséquences des tendances de raisonnement mises en évidence nous ont conduits par la suite à nous intéresser au principe de Huygens.

Lors de ces enquêtes sur les concepts de phase et de surface d'onde et sur le principe de Huygens, quatre types de problèmes ont été explorés.

Les recherches sur la propagation des signaux transversaux sur une corde montrant que les élèves et les étudiants tendent à accorder à un point d'une corde une composante longitudinale de mouvement (Maurines, 1986) ou de vitesse (Abboud, 1989), nous avons fait l'hypothèse qu'ils ne distinguent pas un point d'une onde d'un point du milieu et que le concept de phase ne devait pas être dissocié de celui de valeur du champ (maximum ou à un instant donné). Pour valider ces hypothèses, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

– sur les graphes associés à la description spatiale de la propagation d'une onde selon une direction, comment les étudiants déplacent-ils les points de l'onde et les points du milieu ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive varie-t-elle linéairement avec l'espace ou bien est-elle la même en différents points de l'onde à un instant donné ? Si elle est la même en différents points de l'onde, pour lesquels ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive est-elle constante au cours du temps en un point de l'onde ? Si elle n'est pas constante, comment varie-t-elle ?

– pour les étudiants, la phase d'une onde progressive varie-t-elle linéairement au cours du temps en un point du milieu ?

– les étudiants calculent-ils la vitesse d'un point d'une onde progressive en annulant la différentielle de la fonction phase Φ ou bien en dérivant par rapport au temps la fonction champ, autrement dit calculent-ils ou non la vitesse d'un point de l'onde comme si c'était un point du milieu ?

Comme l'enquête exploratoire confirmait notre hypothèse sur les difficultés des étudiants à dissocier le concept de phase de celui d'amplitude d'une onde dans des situations mettant en jeu des ondes se propageant selon une direction, nous avons supposé qu'il devait en être de même pour des ondes se propageant selon plusieurs directions. Nous avons alors exploré les questions suivantes :

– pour les étudiants, une surface d'onde est-elle une surface équiphasé ou une surface isoamplitude ?

– pour les étudiants, la position des franges d'interférences résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources synchrones et cohérentes ne dépend-elle que de la différence de phase entre les deux ondes en un point du milieu ou bien change-t-elle si l'intensité d'une des deux sources change ?

Comme la recherche sur la propagation d'un signal transversal sur une corde montrait que les élèves et les étudiants décrivent et expliquent ce qui se passe en se centrant sur une forme en mouvement considérée globalement comme un ensemble de points équivalents (« la bosse »), nous avons supposé qu'il en était de même pour la propagation d'une onde selon plusieurs directions et que les étudiants raisonnaient en suivant une surface d'onde. La recherche sur la propagation d'un signal transversal sur une corde révélant de plus que les élèves et les étudiants attribuent à la « bosse » qui se propage sur une corde des caractéristiques d'objet (avoir une forme indépendante de la vitesse de propagation et de la source qui crée le signal), nous avons fait l'hypothèse qu'il en est de même pour la surface d'onde. Les questions suivantes ont ainsi été abordées :

– pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle ou non de la vitesse de propagation de l'onde, autrement dit du milieu ?

– pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle ou non de la forme de la source qui crée l'onde, si celle-ci est étendue ?

– pour les étudiants, que devient la forme d'une surface d'onde d'une onde incidente lors d'une réflexion sur un obstacle ou d'une transmission d'un milieu à un autre ?

Comme un raisonnement, en termes d'objet que l'on suit, implique une centration sur le seul niveau macroscopique, nous avons fait l'hypothèse que les étudiants n'utilisent pas le concept d'enveloppe et le principe de

Huygens car ceux-ci nécessitent de prendre en compte simultanément le niveau macroscopique et celui des ondes élémentaires émises par les sources de Huygens. Pour tester cette hypothèse, nous avons choisi des situations mettant en jeu des distributions de sources ponctuelles non seulement continues mais aussi discontinues. Dans le premier cas, nous avons retenu des situations de réflexion et de transmission, et dans le second, deux situations « classiques » de l'enseignement : superposition des ondes émises par deux sources ponctuelles monochromatiques cohérentes ou par une distribution infinie de telles sources, alignées sur une droite et équidistantes. Nous avons abordé les questions suivantes :

- les étudiants utilisent-ils ou non le principe de Huygens pour construire une surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise ?
- pour les étudiants, existe-t-il ou non une surface d'onde pour l'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes progressives monochromatiques cohérentes ? La forme de celle-ci dépend-elle ou non du déphasage entre les sources ?

3. MÉTHODOLOGIE

À la suite des deux enquêtes exploratoires précédemment citées (une première série de questionnaires papier-crayon portant sur la propagation d'une onde ou d'un signal sur une corde et d'un son sinusoïdal émis par un haut-parleur), nous avons cherché, d'une part à étayer davantage les conclusions du premier bilan (Maurines, 1995), et d'autre part à valider l'hypothèse d'un raisonnement en termes d'objet centré sur le niveau macroscopique. Pour cela, nous avons affiné les questionnaires déjà construits et en avons élaboré d'autres. Les tableaux 1 et 2 présentent les grandes lignes de la quinzaine de questionnaires rédigés lors de cette deuxième étape. Une moitié de ces questionnaires porte sur la phase d'une onde progressive, l'autre sur la surface d'onde et le principe de Huygens. Beaucoup de questionnaires ne précisent pas le type d'onde utilisé alors que d'autres le font (ondes sonores, ondes lumineuses, rides à la surface de l'eau). La plupart des questions sont qualitatives et ne nécessitent pas de calcul. Elles sont toujours accompagnées d'une demande de justification.

Une population d'environ 550 étudiants a été interrogée après enseignement sur les ondes :

- 170 étudiants, âgés de 17 à 19 ans, ont suivi un enseignement de niveau secondaire sur les ondes (60 élèves de première et terminale scientifiques, 110 étudiants en début de première année de classes préparatoires aux grandes écoles scientifiques ou de premier cycle universitaire).

L'enseignement dispensé en classe de première S correspondait au programme de 1988 en vigueur jusqu'à la rentrée de 1994. Il débutait par l'étude de la propagation d'un signal et d'une onde selon une direction et poursuivait par celle de la propagation dans un milieu de dimension deux ou trois. L'approche préconisée à ce niveau d'enseignement était descriptive et graphique. L'étude de la propagation selon une direction s'appuyait sur les graphes associés aux descriptions spatiale et temporelle, et celle de la propagation dans un milieu de dimension trois, sur les concepts de surface d'onde et de rayon. L'enseignement dispensé en classe de terminale scientifique correspondait au programme de 1983 en vigueur jusqu'à la rentrée de 1989. Reprenant ce qui avait été vu en première, il formalisait le phénomène de propagation en introduisant l'expression analytique des fonctions associées à la propagation selon une direction d'un signal et d'une onde monochromatique : $F(x,t) = F(x - ct)$ pour le premier, $F(x,t) = a \sin(\omega t - kx)$ pour la seconde. Il donnait ainsi une vision unifiée des descriptions spatiale et temporelle et s'appuyait sur la fonction Φ , phase d'une onde ou d'un signal ;

– 380 étudiants, âgés de 20 à 23 ans, ont suivi un enseignement de niveau supérieur (80 étudiants en deuxième année de premier cycle universitaire, 270 étudiants préparant un concours pour devenir professeur de physique et chimie dans l'enseignement secondaire, 30 professeurs stagiaires venant de réussir ce concours).

Les étudiants n'ont pas été interrogés sur l'ensemble des questionnaires. Ceux auxquels ils ont eu à répondre ont été choisis en fonction de l'enseignement suivi. C'est ainsi que seuls les questionnaires portant sur la direction du mouvement d'un point d'une onde ou du milieu et sur la confusion surface d'onde-surface équiphasé ont été passés en classe de première et terminale scientifiques. Les résultats fournis au même questionnaire par les différents sous-groupes ont été regroupés car ils ne font apparaître aucune différence significative. Le nombre d'étudiants interrogés en moyenne à chaque questionnaire étant d'une quarantaine, les pourcentages doivent être interprétés comme tendances majoritaires ou minoritaires. Un pourcentage de réponses erronées de 25 % après un enseignement sur les ondes est le signe d'une difficulté s'il est légitime d'attendre un pourcentage nul ; il en est de même d'un pourcentage faible de réponses correctes ou d'un taux élevé de non-réponses.

Les réponses des étudiants ont d'abord été analysées questionnaire par questionnaire. Les résultats obtenus à l'ensemble des questionnaires ont ensuite été confrontés. L'interprétation que nous en donnons met au jour les grandes lignes d'un raisonnement « commun » sur la propagation des ondes en dimension trois. Il trouve sa justification non pas dans le nombre de réponses obtenues à une question particulière mais dans les multiples recou-

pements qu'il autorise, que ce soit à l'occasion des thèmes de recherche abordés dans cette étude que dans ceux abordés dans l'étude sur la propagation des signaux selon une direction (Maurines, 1986, 1992) ou sur les représentations graphiques « communes » des ondes en dimension trois, en présence ou non d'obstacles (Maurines, 1997).

Nous n'entrerons pas ici dans une présentation exhaustive des résultats obtenus. Seules les tendances les plus représentatives seront décrites. Des exemples significatifs de réponses d'étudiants les illustreront ainsi que leurs pourcentages d'apparition. Ces derniers sont calculés sur le nombre d'étudiants interrogés (comme dans les encadrés présentant des exemples de représentations graphiques), ou parfois, sur le nombre d'étudiants fournissant une réponse lorsque le nombre de non-réponses est élevé.

Principales hypothèses testées	Données	Questions
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique d'une onde monochromatique amortie rappel de la définition de la phase d'une onde progressive monochromatique	– la valeur de la phase de l'onde est-elle constante au cours du temps, en deux points différents de l'onde, un zéro et un sommet ? – description spatiale une demi période plus tard
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique d'une onde monochromatique ou d'un signal rappel de la définition de la phase d'une onde progressive monochromatique et généralisation dans le cas d'un signal indéformable	– la valeur de la phase de l'onde est-elle constante au cours du temps, en deux points différents de l'onde (un zéro et un sommet) ou au sommet du signal ? – même question si l'onde ou le signal se propagent en diminuant d'amplitude – pour l'onde monochromatique : description spatiale un quart de période plus tard
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale d'ondes monochromatiques ou de signaux définition de la phase d'une onde progressive monochromatique et généralisation pour un signal	– comparer la valeur de la phase en différents points d'une onde ou d'un signal
confusion point d'une onde-point du milieu confusion phase Φ -amplitude A confusion phase Φ -valeur du champ F	description spatiale et expression analytique de trois ondes progressives monochromatiques dont l'amplitude est constante, amortie, ou modulée en amplitude	– à quelle vitesse se déplace un sommet de l'onde ?
confusion phase Φ -intensité	interférences lumineuses à deux ondes émises par des sources ponctuelles monochromatiques cohérentes et de même intensité	– la position des franges d'interférences varie-t-elle si l'une des deux sources a une intensité double de l'autre ?

Tableau 1 : Caractéristiques des questionnaires portant sur le concept de phase

Principales hypothèses testées	Données	Questions
confusion surface d'onde-surface isoamplitude	– un GBF, un oscilloscope, un haut-parleur et un microphone branché à l'oscilloscope	– quelle méthode doit-on choisir pour déterminer une surface d'onde sonore : garder l'amplitude de la courbe visualisée à l'oscillo constante ou faire en sorte qu'elle ne se décale pas horizontalement ?
confusion surface d'onde-surface isoamplitude	– diagrammes de rayonnement de deux hauts-parleurs assimilés à des sources ponctuelles	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel	sources ponctuelles dans un milieu homogène ou non : – lumière et son dans air de température uniforme ou non – rides à la surface d'un lac de profondeur constante ou non	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel	– une boule et un pavé cubique tombant dans un lac	– comparer et tracer les surfaces d'onde
surface d'onde assimilée à un objet matériel et considérée globalement au niveau macroscopique	surfaces d'onde d'une onde incidente plane monochromatique surface de séparation entre deux milieux homogènes de forme « sinusoïdale »	– tracer une surface d'onde transmise
surface d'onde assimilée à un objet matériel et considérée globalement au niveau macroscopique	surfaces d'onde d'une onde incidente plane monochromatique surface réfléchissante de forme « parabolique »	– tracer une surface d'onde réfléchie en utilisant le principe de Huygens
confusion surface d'onde-surface isoamplitude concept d'enveloppe non utilisé	deux sources ponctuelles monochromatiques cohérentes	– tracer une surface d'onde de l'onde émise par les deux sources émettant en phase – peut-elle être dissymétrique ?
confusion surface d'onde-surface isoamplitude concept d'enveloppe non utilisé	une distribution de sources ponctuelles monochromatiques équidistantes alignées sur une droite	– peut-on avoir une surface d'onde plane parallèle à la ligne de source, non parallèle à la ligne de sources ?

Tableau 2 : Caractéristiques des questionnaires portant sur la surface d'onde et le principe de Huygens

4. RÉSULTATS

4.1. Les étudiants, les « points d'une onde » et les « points du milieu »

Sur les schémas associés à la description spatiale de la propagation d'une onde, le graphe de la fonction représentant la forme de l'onde à un instant donné est translaté au cours du temps. Deux types de points sont à considérer. Les uns sont attachés à la courbe représentant la forme de l'onde

et se déplacent avec elle : ce sont les points de l'onde (« sommet », « creux », « zéro », etc.) en lesquels la phase de l'onde est constante au cours du temps. La valeur de la phase est caractéristique du point de l'onde considéré et varie linéairement avec l'espace. Les autres ont des coordonnées spatiales fixes : ce sont les points du milieu en lesquels la phase de l'onde varie linéairement avec le temps. Alors que la vitesse de phase ou vitesse de propagation d'un point d'une onde sinusoïdale (amortie ou non) est constante au cours du temps, la vitesse d'un point du milieu varie avec le temps. La première est obtenue en annulant la différentielle de la phase Φ de l'onde alors que la seconde est obtenue en dérivant par rapport au temps la fonction F donnant le champ, l'abscisse x étant fixée. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Quand il s'agit d'indiquer comment bougent les points d'une corde, lors de la propagation d'une onde sinusoïdale, beaucoup d'étudiants (57 %, $N = 30$) **translatent les points de la corde avec l'onde** au lieu de les faire bouger transversalement en leur laissant une abscisse constante (Maurines, 1995).

Quand il s'agit de tracer la courbe représentant la forme de l'onde à un instant différent de l'instant de référence et de positionner des points de l'onde à cet instant, beaucoup d'étudiants donnent une réponse incorrecte. Par exemple, dans la situation présentée dans l'encadré 1, mettant en jeu une onde sinusoïdale amortie et deux points de l'onde correspondant à des valeurs différentes du champ (un est un « zéro » de l'onde, l'autre un « sommet »), on observe que :

– **pour 16 % des étudiants ($N = 44$), l'onde serpente.** La courbe reste identique à elle-même et l'onde progresse par ajout de bosses, les points de l'onde étant déplacés le long de la courbe (voir la figure 2 de l'encadré 1) ;

– **pour 20 % des étudiants, les points de l'onde ont une abscisse fixe au cours du temps** et la courbe représentant la forme de l'onde à l'instant $t+T/2$ est la symétrique de la courbe donnée en référence. Ces étudiants semblent confondre point de l'onde et point du milieu, onde progressive et onde stationnaire (voir la figure 3 de l'encadré 1).

4.2. Les étudiants, la phase et la vitesse de l'onde

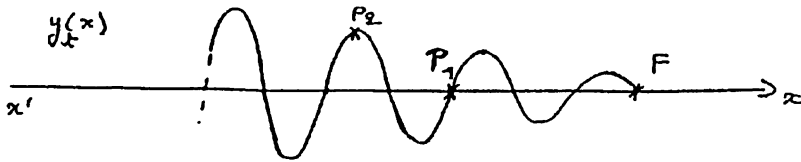
Alors que la phase de l'onde, en différents points d'une onde monochromatique se propageant sur une corde, augmente linéairement avec l'abscisse x , la majorité des étudiants (68 %, $N = 28$) considèrent que la phase est la même en deux sommets différents de l'onde. En fait, les

ENCADRÉ 1

**Description spatiale de la propagation
d'une onde sinusoïdale amortie**

Donnée

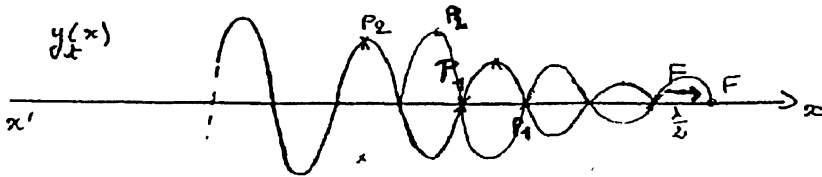
Schéma donnant l'état du milieu à un instant t . Les points F , P_1 et P_2 sont des points de l'onde, en particulier F est le front de l'onde.



Questions : Schéma donnant l'état du milieu à l'instant $t+T/2$, la position des points F , P_1 et P_2 .

Exemple de réponses considérées comme correctes (45 %, N = 44)

Figure 1



Nous n'avons pas tenu compte du fait que l'étudiant n'a pas donné une amplitude correcte à la sinusoïde. Seuls trois étudiants l'ont fait.

Exemples de réponses incorrectes (36 %, N = 44)

Figure 2

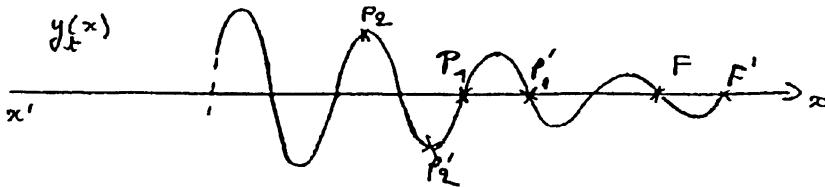
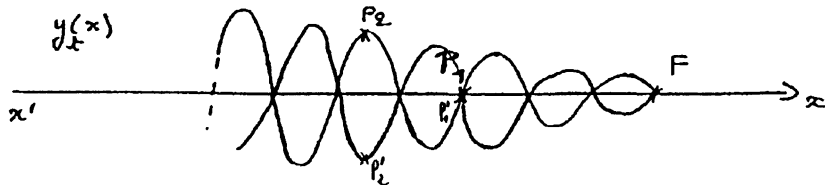


Figure 3



étudiants raisonnent sur les points de l'onde comme si c'étaient des points de la corde : ils comparent leur mouvement et répondent « **même valeur de la phase** » pour « **mouvements en phase** » (Maurines, 1995).

Quand il s'agit d'indiquer si la phase de l'onde est constante ou non au cours du temps en un point de l'onde, beaucoup d'étudiants répondent que **la phase de l'onde varie en un point de l'onde** : 58 % de l'ensemble des réponses obtenues aux différentes situations proposées aux étudiants portant sur cette question (N = 196). Sur les justifications données, certains étudiants traitent implicitement ou non un point de l'onde comme un point du milieu en raisonnant sur une abscisse fixe. D'autres considèrent que la phase de l'onde en un point de l'onde dépend de la valeur du champ à un instant donné en un point donné du milieu ou de la valeur maximum du champ, c'est-à-dire de l'amplitude de l'onde. Par exemple, dans la situation présentée à l'encadré 1, les justifications associées aux réponses « la phase de l'onde varie au cours du temps en P_1 et P_2 , respectivement zéro et sommet de l'onde monochromatique amortie », sont majoritairement du premier type (83 %, 45 % des 44 étudiants interrogés) : « la phase est $u = \omega t - kx$ or ω , k sont des constantes. Si on reste en P_1 , **alors x est constant**. Comme le temps varie, u varie proportionnellement à t ». Une minorité d'entre elles (17 %, 9 % des 44 étudiants interrogés) sont du deuxième type : « *si on considère que P_1 appartient au signal, la phase n'est pas constante car le signal **s'amortit** au cours du temps (la phase diminue). C'est la même chose pour le point P_2* ». C'est cette relation non pertinente entre la valeur du champ et la phase de l'onde qui conduit 7 % des 44 étudiants à répondre que la phase de l'onde est constante uniquement pour le point P_1 , celle au point P_2 variant avec le temps : « **l'amplitude de l'onde n'est pas constante**. La phase de l'onde en P_1 ne varie pas au cours du temps (le point P_1 est sur l'axe). La phase de l'onde au point P_2 varie au cours du temps car l'amplitude de l'onde n'est pas constante. »

Pour calculer la vitesse d'un point d'une onde, beaucoup d'étudiants font comme si ce point était un point du milieu et dérivent l'expression F du champ. Ainsi, pour obtenir la vitesse d'un sommet P d'une onde sinusoïdale d'amplitude constante, beaucoup d'étudiants (45 %, N = 40) emploient cette méthode : « Le point P se déplace à la vitesse $v = dy/dt = a\omega \cos(\omega t - kx)$ car P ne se déplace pas sur l'axe xx' mais en revanche, **il bouge de haut en bas**. » Parmi les 9 étudiants répondant que la vitesse d'un point de l'onde est ω/k , un seul justifie sa réponse en disant : « $\omega t_1 - kx_1 = \omega t_2 - kx_2$ d'où $\omega \Delta t = k \Delta x$ et $v = \Delta x / \Delta t = \omega / k$ ». Lorsqu'il s'agit de calculer la vitesse de propagation d'un sommet d'une onde sinusoïdale amortie ou modulée en amplitude (questions moins « classiques » que la précédente), cet étudiant ne répond pas.

Terminons, en disant que, parmi les étudiants qui différencient un point d'une onde et un point du milieu, beaucoup ne savent pas que la phase d'une onde est constante en un point de l'onde. C'est ainsi qu'une corrélation entre les réponses obtenues au questionnaire présenté dans l'encadré 1 montre que, pour 63 % des 16 étudiants qui traduisent un point de l'onde avec la forme de l'onde, la phase de l'onde varie linéairement avec le temps en un point de l'onde.

4.3. Pour les étudiants, la surface d'onde est-elle une surface équiphase ?

Une surface d'onde est une surface équiphase sur laquelle l'amplitude de l'onde, et par conséquent l'intensité de l'onde, n'est pas nécessairement constante. Ainsi dans le cas de la propagation d'une onde sonore sinusoïdale, émise par un haut-parleur directionnel de diagramme de rayonnement donné, la surface d'onde en champ lointain est sphérique mais la surface isoamplitude ne l'est pas. Pour déterminer expérimentalement une surface d'onde sonore grâce à un oscilloscope et un microphone, il faut faire en sorte que la sinusoïde observée à l'écran ne se décale pas horizontalement et ne pas chercher à ce qu'elle garde la même amplitude. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Alors que les surfaces d'onde de deux hauts-parleurs de diagrammes de rayonnement différents, un omnidirectionnel et un directionnel, sont toutes les deux sphériques, une majorité d'étudiants (90 %, N = 41) répond qu'elles sont différentes. Beaucoup (51 % sur la population totale) justifient cette réponse en traçant des surfaces isoamplitudes et non des surfaces d'onde (voir la figure 2 de l'encadré 2). Les réponses des quelques étudiants, dessinant une surface d'onde sphérique pour la source omnidirectionnelle et une portion de sphère limitée par un cône pour la source directionnelle, ne peuvent être considérées comme correctes, car les justifications accompagnant les dessins assimilent une surface d'onde à une surface isointensité (voir la figure 3 de l'encadré 2).

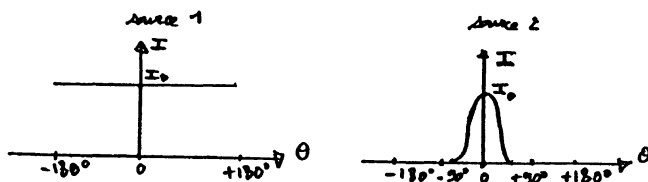
Lorsqu'il s'agit de choisir une méthode pour déterminer expérimentalement une surface d'onde sonore, une majorité d'étudiants (61 %, N = 49) impose à l'amplitude de la sinusoïde observée sur l'écran de l'oscilloscope de rester constante. Pour les étudiants qui retiennent cette seule condition (33 % sur la population totale), tout se passe comme si une surface d'onde était une surface isoamplitude : « *surface d'onde : même amplitude* ». Pour les autres qui imposent de plus à la sinusoïde de ne pas se décaler horizontalement (28 % sur la population totale), tout se passe comme si une surface d'onde était à la fois une surface équiphase et une surface iso amplitude : « *il*

ENCADRÉ 2

Forme de la surface d'onde des ondes émises par deux sources sonores monochromatiques ayant des diagrammes de rayonnement différents

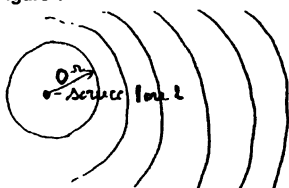
Données

Diagrammes de rayonnement de deux sources sonores (considérées comme ponctuelles) émettant à 2 000 Hz.



Exemple de réponses correctes (5 %, N = 41)

Figure 1



La surface d'onde provenant d'une source ponctuelle est sphérique car celle-ci représente les points d'égale phase et les lie Or $\Phi = cte$ correspond à $r = cte$ d'où sphère.

Exemples de réponses incorrectes (90 %, N = 41)

Figure 2

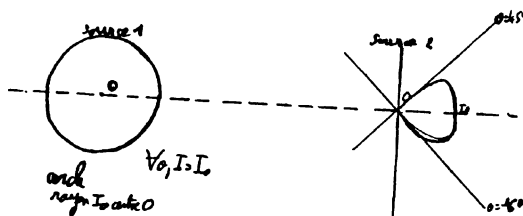
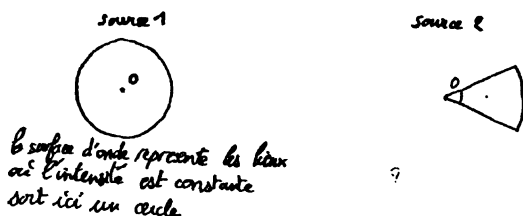


Figure 3



faut combiner les deux méthodes car il faut satisfaire la condition sur l'amplitude et la phase ».

4.4. Pour les étudiants, la forme d'une surface d'onde dépend-elle de la vitesse de propagation et de la forme de la source à l'origine de l'onde ?

Une surface d'onde étant l'ensemble des points du milieu atteints au même instant par un point de l'onde, sa forme dépend de la vitesse de propagation. La surface d'onde d'une onde émise par une source ponctuelle est sphérique uniquement si le milieu est homogène. La forme d'une surface d'onde dépend de la forme de la source en champ proche (autrement dit « très peu de temps » après la création de cette surface d'onde) et n'en dépend pas en champ lointain. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Pour beaucoup d'étudiants, la surface d'onde d'une onde progressive sinusoïdale se propageant dans un milieu inhomogène est sphérique comme si l'onde se propageait dans un milieu homogène. Ainsi, parmi les étudiants fournissant une réponse, il y en a 67 % qui répondent de cette manière pour la propagation du son (N = 27), 41 % pour la propagation de la lumière (N = 17) et 63 % pour la propagation de rides à la surface de l'eau (N = 30). Les justifications accompagnant ce type de réponse précisent clairement que la forme de la surface d'onde ne dépend pas de la vitesse de propagation (voir la figure 2 de l'encadré 3) : « *oui, la surface est la même mais elle parvient au récepteur M plus vite* », « *oui, le changement de température fait varier la vitesse **mais pas** la forme de la surface d'onde* ».

Pour beaucoup d'étudiants, la forme de la surface d'onde d'une onde émise par une source étendue ne dépend pas de la forme de la source. Ainsi, pour 63 % des étudiants fournissant une réponse (N = 30), les rides se propageant à la surface d'un lac, juste après le lâcher d'une boule et d'un pavé cubique, ont la même forme. Certaines justifications insistent sur le fait que la forme des rides n'a rien à voir avec la forme de la source étendue : « *Les fronts d'onde sont toujours circulaires. **Elles sont indépendantes de la forme.** Seule l'amplitude variera en fonction de la masse des objets* », « *car ce n'est pas la forme de l'objet qui est importante, c'est le fait qu'il y ait contact avec la surface de l'eau* ».

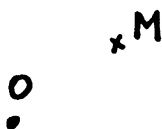
Bien que ces réponses puissent provenir d'une référence implicite à l'expérience familière consistant à jeter des cailloux dans l'eau, elles nous semblent significatives par l'insistance des commentaires. De plus, elles peuvent être interprétées comme les réponses portant sur la propagation dans un milieu inhomogène en disant que les étudiants considèrent

ENCADRÉ 3

Forme de la surface d'onde d'une onde émise par une source ponctuelle monochromatique sonore (ou lumineuse), se propageant dans de l'air dont la température varie avec l'altitude

Données

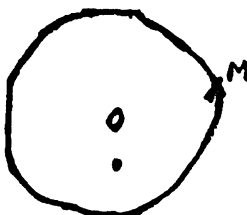
Il n'y a pas de vent et la température diminue avec l'altitude. On rappelle que la vitesse du son (ou de la lumière) croît (décroit) avec la température.



Exemple de réponses correctes (31 %, N = 61)

Figure 1

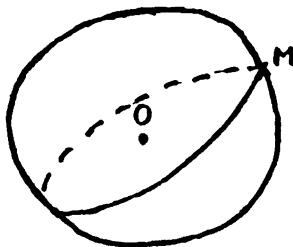
La vitesse du son diminue avec T. C'est une sphère déformée. Les points à haute altitude sont plus éloignés que les autres.



Exemple de réponses incorrectes (57 %, N = 61)

Figure 2

Il n'y a pas de perturbation donc tous les points à la même distance de la source sont sur la même surface d'onde.



globalement une surface d'onde. En effet, sur les schémas fournis, aucun n'obtient la surface d'onde à un instant t en considérant que la surface d'onde à l'instant origine correspond à la surface de la source et qu'une surface d'onde s'accroît perpendiculairement à elle-même avec une vitesse égale à la vitesse de propagation. Par ailleurs, il est à signaler que tous les étudiants raisonnent au seul niveau macroscopique. Aucun ne décompose la surface de la source en un ensemble de points-sources cohérents émettant des ondes élémentaires sphériques : ni le principe de Huygens, ni le terme « enveloppe » ne sont mentionnés.

4.5. Pour les étudiants, comment est la forme de la surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise ?

Pour obtenir la forme d'une surface d'onde d'une onde réfléchie ou transmise, les formes d'une surface d'onde incidente et de la surface de séparation (réfléchissante ou réfractante) étant données, on peut utiliser trois méthodes. Deux portent sur le niveau macroscopique : une fait appel aux lois de la réflexion ou de la réfraction ainsi qu'à l'orthogonalité de la surface d'onde et des rayons ; une autre utilise le fait que le « chemin » parcouru le long d'un rayon par un point de l'onde ne dépend pas du point choisi sur la surface d'onde incidente. La troisième méthode relie le niveau macroscopique et le niveau des ondes élémentaires. Elle s'appuie sur le fait que chaque point de la surface de séparation se comporte comme une source de Huygens émettant une onde élémentaire sphérique et que la surface d'onde de l'onde réfléchie ou transmise est l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes élémentaires. Les sources de Huygens ne sont pas toujours en phase car elles ne sont pas toujours atteintes au même instant par une surface d'onde incidente donnée. Leur déphasage dépend des formes de la surface d'onde incidente et de la surface de séparation ainsi que de la direction de propagation de l'onde incidente. Les surfaces d'onde d'une onde réfléchie ou transmise n'ont pas toujours une forme similaire à celle de l'onde incidente, ou à celle de la surface de séparation. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

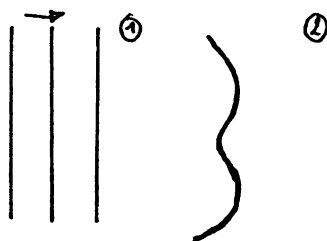
Lorsqu'il s'agit de représenter une surface d'onde d'une onde transmise par une interface « sinusoïdale », l'onde incidente étant plane et aucune méthode n'étant imposée, beaucoup d'étudiants tracent une surface d'onde transmise de même forme que la surface de séparation (figure 2 de l'encadré 4) et quelques-uns une surface d'onde plane (figure 3 de l'encadré 4). Rares sont les étudiants qui tracent une surface d'onde transmise de forme différente de la surface de séparation. Ces dessins ne sont pas justifiés et portent sur le niveau macroscopique, aucune surface d'onde secondaire n'apparaissant.

ENCADRÉ 4

Forme de la surface d'onde d'une onde transmise d'un milieu homogène à un autre

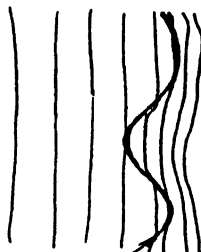
Données

Surface d'onde de l'onde incidente, forme de la surface de séparation. V_1 supérieure à V_2 .



Exemple de réponses correctes (13 %, N = 15)

Figure 1



Exemples de réponses incorrectes (60 %, N = 15)

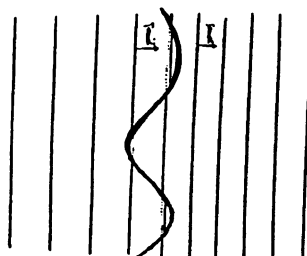
Figure 2

Surface d'onde = surface sur laquelle les points arrivent en phase.



Figure 3

Le déphasage sera le même en tout point de la surface de séparation. Après avoir passé la surface, tous les points de l'onde incidente se retrouvent en phase.



ENCADRÉ 5

Forme de la surface d'onde d'une onde réfléchi

Données

Surface d'onde de l'onde incidente, forme de la surface réfléchissante.



Exemples de réponses où la surface d'onde a une forme correcte (18 %, N = 49)

Figure 1

Chaque point de la surface réfléchissante se comporte comme une source ponctuelle émettant une onde sphérique.

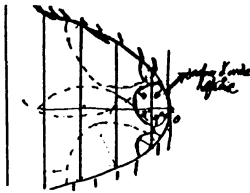
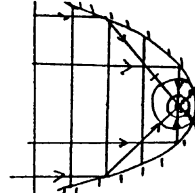


Figure 2

Pour une surface parabolique, l'optique géométrique prévoit que les rayons réfléchis convergent au foyer. Les surfaces d'onde sont normales aux rayons.



Exemples de réponses où la surface d'onde a une forme incorrecte (37 %, N = 49)

Figure 3

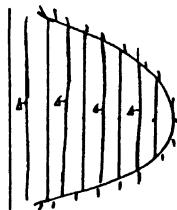
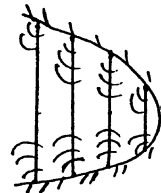


Figure 4



Figure 5

D'après le P. de Huygens, à partir d'un point source propagation selon une onde sphérique, d'où les surfaces d'onde au niveau de la surface réfléchissante.



Lorsqu'il s'agit de représenter une surface d'onde d'une onde réfléchi par une surface « parabolique », l'onde incidente étant plane et la méthode basée sur le principe de Huygens étant imposée, beaucoup d'étudiants (45 %, N = 49) ne répondent pas, certains demandant ce qu'est le principe de Huygens (13 %).

La majorité des dessins fournis (67 %, N = 27) porte uniquement sur le niveau macroscopique, la moitié représente une surface d'onde de forme correcte (figure 2 de l'encadré 5). Parmi les dessins représentant une surface d'onde de forme incorrecte, on retrouve des surfaces d'onde réfléchi ayant la forme de la surface d'onde incidente (figure 3 de l'encadré 5) et d'autres ayant la forme de la surface de séparation (figure 4 de l'encadré 5).

Parmi les dessins prenant en compte le niveau des ondes élémentaires (33 %, N = 27), certains ne portent que sur ce niveau (15 %, N = 27 ; figure 5 de l'encadré 5) et d'autres aussi sur le niveau macroscopique (18 %, N = 27). Seulement les deux tiers de ces réponses proviennent d'une utilisation correcte du principe de Huygens (figure 1 de l'encadré 5).

4.6. Pour les étudiants, existe-t-il une surface d'onde pour l'onde résultant de la superposition d'ondes émises par des sources ponctuelles cohérentes ?

La surface d'onde de l'onde résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources ponctuelles cohérentes en phase est de forme elliptique. Elle peut être assimilée à l'enveloppe des surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources lorsqu'on est suffisamment loin des sources de sorte à pouvoir considérer la distribution des sources comme continue. L'amplitude de l'onde résultante est modulée : il existe des surfaces hyperboliques d'intensité maximum et nulle (franges d'interférences). Si les deux sources ne sont pas en phase, la surface d'onde n'est plus symétrique. Pour les étudiants, ce n'est pas le cas.

Lorsqu'il s'agit de tracer une surface d'onde de l'onde résultant de la superposition des ondes émises par deux sources cohérentes en phase, seulement 41 % des 32 étudiants fournissant une réponse (N = 27) dessinent les surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources ponctuelles ainsi que leur enveloppe (figure 1 de l'encadré 6). Une majorité de réponses est incorrecte (59 %, N = 27). La moitié d'entre elles correspond à des étudiants qui ne raisonnent qu'au niveau des ondes élémentaires : les surfaces d'onde des ondes émises par les deux sources ponctuelles sont représentées mais pas leur enveloppe (figure 2 de l'encadré 6). L'autre moitié correspond à des

ENCADRÉ 6

Forme de la surface d'onde de l'onde résultant de la propagation de deux ondes émises par deux sources ponctuelles monochromatiques

Donnée

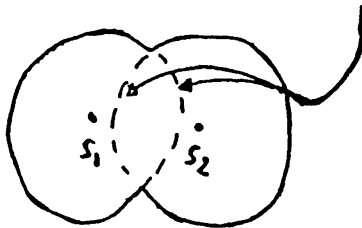
Surface d'onde de l'onde émise par une source. Position des deux sources.



Exemple de réponses correctes (34 %, N = 32)

Figure 1

Les parties en pointillé ayant subi des interférences, elles ne font plus partie de la surface d'onde.



Exemples de réponses incorrectes (50 %, N = 32)

Figure 2

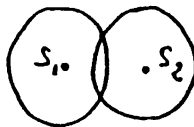
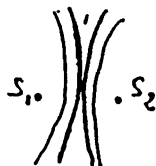


Figure 3

Interférences



étudiants qui confondent surface d'onde et surface isoamplitude : des franges d'interférences et non des surfaces d'onde sont dessinées (figure 3 de l'encadré 6).

Seulement 36 % des 32 étudiants fournissant une réponse (N = 22) disent que l'onde résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources monochromatiques cohérentes peut avoir une surface d'onde dissymétrique. Comme les étudiants tendent à confondre une surface d'onde et une surface isoamplitude, on comprend que seule une minorité d'entre eux donne un moyen correct en disant que les sources ne doivent pas émettre en phase (9 %, N = 22) et que la majorité (27 %, N = 22) ne fait pas appel au déphasage des sources : il faut « *déplacer la source S_2* », « *lui donner une intensité plus grande...* » C'est sans doute aussi la raison pour laquelle on obtient un nombre élevé d'étudiants qui répondent qu'obtenir une surface d'onde dissymétrique est impossible (64 %, N = 22). La même difficulté à raisonner sur des situations « non symétriques » se manifeste sur les réponses obtenues à un questionnaire demandant s'il est possible d'obtenir une onde plane à partir d'une ligne de sources monochromatiques équidistantes. Alors qu'il est impossible d'obtenir une surface d'onde plane pour 28 % des étudiants (N = 29) lorsque celle-ci est parallèle à la ligne de sources, ce nombre passe à 45 % lorsque l'onde ne se propage pas perpendiculairement à la ligne de sources. Parmi les 34 % d'étudiants qui disent que c'est possible, seule la moitié donne un moyen correct lié au déphasage des sources.

5. DISCUSSION

5.1. Modèle du raisonnement des étudiants

On retrouve sur les résultats précédents les mêmes tendances vers un raisonnement mécaniste que celles mises en évidence dans nos précédentes recherches. En effet, pour les étudiants, l'onde est représentable graphiquement par des surfaces en mouvement auxquelles ils attribuent des caractéristiques d'objet. En effet, pour eux :

– la forme de la surface d'onde d'une onde progressive ne dépend pas de la vitesse de propagation, tout comme la forme d'un solide indéformable ne dépend pas de sa vitesse de déplacement ;

– la forme de la surface d'onde d'une onde progressive ne dépend pas de la source étendue qui est à l'origine de l'onde, tout comme la forme d'une balle ne dépend pas de la main qui la lance ;

– la forme de la surface d'onde d'une onde incidente est conservée lors d'une réflexion ou d'une transmission d'un milieu à un autre comme si cette forme était celle d'un objet indéformable, ou bien garde l'empreinte de ce qui s'est passé comme si cette forme était faite en pâte à modeler ;

– dans des situations de superposition d'ondes cohérentes, l'onde résultante n'a pas de surface d'onde car chaque onde élémentaire garde son identité propre, comme c'est le cas pour deux anneaux accrochés l'un à l'autre.

De plus, dans ces situations de propagation dans un milieu à trois dimensions, on observe les mêmes tendances à raisonner sur des concepts indifférenciés. En effet, pour les étudiants :

– un point d'une onde n'est pas distingué d'un point du milieu. Sur les graphes associés à la description spatiale de la propagation d'une onde, un point d'une onde garde une abscisse fixe au cours du temps au lieu de se déplacer avec l'onde. La phase de l'onde en un point de l'onde varie linéairement avec le temps au lieu d'être constante. La vitesse d'un point d'une onde est calculée de la même manière que la vitesse d'un point du milieu. La phase d'une onde progressive sinusoidale ne varie pas linéairement avec l'espace mais est la même en chaque sommet ;

– le concept de phase d'une onde n'est pas dissocié de ceux de valeur du champ et d'amplitude du champ. La phase de l'onde, en un point d'une onde, varie dans le temps de la même façon que le champ ou diminue si l'amplitude de l'onde diminue. La surface d'onde est soit une surface isoamplitude, soit une surface isoélongation. La surface d'onde résultant de la superposition de plusieurs ondes possède la symétrie liée à la répartition spatiale des sources car celle-ci n'est pas perçue comme une surface équiphasse. La position des franges d'interférences résultant de la superposition de deux ondes émises par des sources ponctuelles monochromatiques cohérentes dépend de l'intensité des sources ;

– une surface d'onde est considérée en « bloc » et n'est pas discrétisée. Elle n'est pas considérée comme un ensemble de points distincts se déplaçant perpendiculairement à cette surface à une vitesse égale à la vitesse de propagation.

Par ailleurs, on rencontre la même tendance à matérialiser les concepts. En effet, relier la phase de l'onde et l'amplitude de l'onde, assimiler un point d'une onde et un point du milieu, traiter la surface d'onde comme un objet, sont des manières de rendre plus concrets les concepts abstraits mis en jeu.

Si la tendance à raisonner en suivant une forme en mouvement n'est pas spécifique de la propagation selon plusieurs directions, elle se traduit ici par une tendance propre à ce type de propagation : se focaliser sur un seul niveau, le niveau macroscopique ou celui des ondes élémentaires. Il en résulte que le concept d'enveloppe n'est pas utilisé. En effet :

– dans les situations de réflexion et de transmission, les étudiants se centrent majoritairement sur le seul niveau macroscopique si bien que l'onde du niveau macroscopique n'est pas recomposée à l'aide d'ondes élémentaires sphériques ;

– dans les situations de superposition d'ondes sphériques cohérentes, les étudiants restent au niveau des ondes élémentaires si bien que celles-ci gardent leur identité propre et ne définissent pas une onde résultante caractérisée par une surface d'onde unique.

5.2. Quelques remarques sur l'enseignement des ondes

Arrivés au terme de cette étude, nous voudrions montrer, sur quelques points, que l'enseignement, ne mettant pas l'accent sur les points délicats et laissant trop d'implicite et d'ambiguïté, favorise les tendances de raisonnement que nous venons de présenter.

Faisons, tout d'abord, quelques remarques sur les programmes du secondaire suivis par la majorité des étudiants interrogés. Les objectifs de connaissance et de savoir-faire à propos des concepts de phase et de surface d'onde restaient implicites.

Dans le programme de terminale scientifique de 1983, le terme « phase » apparaît pour la première fois dans le chapitre traitant des oscillateurs harmoniques pour désigner la fonction ϕ de la seule variable temporelle dont dépend la fonction sinusoïdale décrivant le mouvement d'un oscillateur : $y(t) = a \sin(\omega t + \phi_0)$ avec $\phi(t) = \omega t + \phi_0$. Le terme « phase » réapparaît dans le chapitre sur l'onde progressive sinusoïdale, le programme demandant d'introduire sans plus de précision la phase de l'onde, c'est-à-dire la fonction Φ des deux variables x et t dont dépend le champ caractérisant l'onde : $y(x,t) = a \sin(\omega t - kx)$ avec $\Phi(x,t) = \omega t - kx$. Rien n'est dit sur les confusions possibles résultant du fait que le même terme renvoie au mouvement d'un oscillateur matériel (que ce soit un oscillateur unique ou un oscillateur faisant partie d'un milieu continu parcouru par une onde) ou au mouvement d'un point d'une onde. Aucun commentaire n'est fait sur les variations spatiotemporelles de la phase d'une onde. On ne peut alors s'étonner que les étudiants raisonnent sur des oscillateurs matériels au lieu de raisonner sur les points d'une onde et répondent « mouvement en phase » pour « même valeur de

la phase d'une onde » ou bien que la phase d'une onde n'est pas constante en un point de l'onde.

Dans le programme de première scientifique de 1982, peu de choses est dit sur la surface d'onde. Aucune définition n'est donnée et aucun commentaire n'apparaît sur le fait que l'amplitude de l'onde n'est pas nécessairement constante sur une surface d'onde. S'il est recommandé d'utiliser la cuve à eau pour « montrer » des rides circulaires et rectilignes, la détermination expérimentale d'une surface d'onde sonore n'est pas demandée.

Les manuels du secondaire portant sur ces programmes n'explicitaient pas davantage les points délicats. Ils laissaient par contre apparaître des commentaires pouvant prêter à confusion.

Ainsi, en ce qui concerne la surface d'onde, on observe une tendance à associer « vibration en phase » et « même état vibratoire ». L'expérience réalisée sur la cuve à eau préconisée par le programme de première scientifique daté de 1982 pour introduire le concept de surface d'onde est ainsi décrite par : « *tous les points situés sur une même circonférence, c'est-à-dire à la même distance r du point source, donnent, à chaque instant, le même éclaircissement sur l'écran : nous pouvons penser qu'ils ont, à chaque instant, le même état vibratoire et qu'ils vibrent en phase. Ces points appartiennent à la même surface d'onde* » (Bramand *et al.*, 1982, p. 237). Même si la définition encadrée hors texte (« *une surface d'onde est une surface dont tous les points vibrent en phase* ») ne laisse pas subsister d'ambiguïtés, on peut se demander ce qu'auront retenu les élèves. Cette tendance à associer « vibration en phase » et « même état vibratoire » se retrouve dans des manuels de terminale scientifique dans les rappels portant sur le cours de première : « *surfaces d'ondes ou surfaces équiphases : ce sont les surfaces sur lesquelles les points **vibrent en phase**, c'est-à-dire **ont même mouvement** à tout instant* » (Charlot *et al.*, 1980, p. 335). De même, un manuel de seconde portant sur le programme daté de 1993 en vigueur jusqu'à la rentrée 2000 décrit une expérience réalisée avec un haut-parleur, un oscilloscope et un microphone de la manière suivante : « *déplaçons maintenant le microphone sur un cercle de centre O , la **sinusoïde de la voie Y_B reste identique à elle-même**. Et on obtiendrait le même résultat en déplaçant le microphone sur une sphère de centre O . Pour cette raison, on dit que l'onde sonore est sphérique (**l'état vibratoire est le même sur une sphère de centre O**)* ». Pourtant, lors de l'expérience, le haut-parleur n'émettant pas avec la même intensité dans toutes les directions, l'amplitude de la sinusoïde varie et ne reste pas constante, contrairement à ce qui est écrit (Tomasino & Penigaud, 1993).

Les démarches utilisées par les manuels de l'enseignement supérieur peuvent, elles-aussi, laisser subsister des confusions.

Ainsi, en ce qui concerne le concept de phase d'une onde, certains manuels la définissent comme la constante ϕ intervenant dans l'expression $(\omega t - kx + \phi)$. On ne peut s'étonner dans ces conditions de ne pas voir précisé que la vitesse de phase d'une onde est obtenue en annulant la différentielle de la fonction à deux variables « $\omega t - kx$ » (Queyrel & Mesplède, 1996, pp. 12-13).

En ce qui concerne le concept de surface d'onde, on y retrouve les mêmes commentaires tendant à associer phase et amplitude que ceux rencontrés dans les manuels du secondaire. On lit ainsi :

« *La grandeur vibrante qui se propage est caractérisée par la fonction d'onde $\Psi(r,t)$. Surfaces d'onde : ce sont les surfaces sur lesquelles, à chaque instant, $\Psi = \text{cte}$* » (Soum et al., 1995, p. 7) ;

« *Un front d'onde est une surface sur laquelle chaque grandeur acoustique **a même valeur** en tout point, quel que soit l'instant considéré* » (Rossi, 1986, p. 17).

6. CONCLUSION

Les résultats présentés ici montrent que les tendances vers un raisonnement monotonnel en termes d'objet que l'on suit, tout d'abord mises en évidence pour la propagation unidirectionnelle des signaux, visibles ou non, se rencontrent également dans le cas de la propagation selon plusieurs directions d'une onde. Elles se manifestent, non seulement dans des situations géométriques de propagation, de réflexion ou de transmission, mais aussi dans des situations ondulatoires de superposition d'ondes sphériques cohérentes, de diffraction (Maurines, 1997) ou de formation d'images en éclairage cohérent (Maurines, 2000). Elles semblent bien être une caractéristique du raisonnement commun car elles se rencontrent dans d'autres domaines de la physique (Viennot, 1996). Elles sont difficilement remises en question par l'enseignement actuel des ondes, celui-ci restant implicite ou ambigu sur des points délicats.

La connaissance des difficultés rencontrées par les élèves et les étudiants nous permet de suggérer quelques propositions pédagogiques.

Pour dégager le caractère abstrait de l'onde, il nous semble souhaitable d'introduire un vocabulaire spécifique en généralisant des expressions telles que le « front » d'un signal, les « crêtes » ou les « creux » d'une onde. On introduirait ainsi le concept de « point d'une onde » et dirait qu'un point i d'une onde « coïncide » à un instant donné t avec un point du milieu d'abs-

cisse x , autrement dit que son mouvement obéit à une équation du type $x - x_i = v (t - t_i)$. Cela pourrait être fait à un premier niveau d'enseignement. Par la suite, on définirait la phase d'une onde et préciserait que la vitesse de phase est obtenue en annulant la différentielle de cette fonction. S'il est important d'introduire la phase d'une onde, cela n'est pas suffisant. En effet, il est souhaitable d'apprendre aux élèves et aux étudiants à éliminer les paramètres non pertinents auxquels ils ont pensé. Des questions qualitatives, telles celles qui sont présentées ici, peuvent être utilisées à cette fin. Mettant l'accent sur des points traditionnellement oubliés dans l'enseignement, elles devraient aider les étudiants à différencier un point d'une onde d'un point du milieu et à dissocier la phase d'une onde de son amplitude.


En ce qui concerne la surface d'onde, il est nécessaire de la définir comme une surface équiphase et de faire comprendre aux élèves et aux étudiants que l'amplitude n'est pas toujours constante sur une surface d'onde. C'est dans le domaine de l'acoustique que l'on peut trouver des exemples facilement abordables à un premier niveau d'enseignement (diagramme de rayonnement des sources sonores). À un deuxième niveau, on peut s'intéresser à la structure de l'onde résultant de la superposition de deux ondes cohérentes : la surface d'onde est de forme elliptique et l'amplitude est modulée (franges hyperboliques d'amplitude maximale ou nulle). À un troisième niveau, on peut étudier la structure de l'onde émise par un dipôle électromagnétique oscillant grâce à un modèle ondulatoire vectoriel. De plus, il est souhaitable de proposer aux élèves et aux étudiants des exercices mettant l'accent sur le fait qu'une surface d'onde n'est pas un objet matériel indéformable à considérer en « bloc ». Des questions portant sur la construction graphique d'une surface d'onde dans une situation donnée (propagation dans un milieu inhomogène ou non, propagation d'une onde créée par une source étendue, réflexion, transmission) peuvent être proposées. Par ailleurs, pour lutter contre la tendance à suivre une forme en mouvement et à se focaliser sur un seul niveau, il est souhaitable de proposer des exercices centrés sur le principe de Huygens. Permettant de faire un lien, de manière qualitative et graphique, entre le niveau des ondes élémentaires et le niveau macroscopique, il pourrait aider les étudiants à prendre conscience de l'existence de deux niveaux d'analyse, l'impact visuel de la mise en regard des schémas portant sur chaque niveau n'étant pas à sous-estimer. L'étude qualitative et graphique portant sur la surface d'onde et le principe de Huygens pourrait s'appuyer sur l'outil informatique car, facile d'emploi, il permet de mettre rapidement en évidence les conséquences d'un changement de paramètre (vitesse de propagation, forme de la source étendue, direction de l'onde incidente, forme d'une surface réfléchissante, etc.)

BIBLIOGRAPHIE

- ABBOUD R. (1989). *Difficultés de l'enseignement dans deux domaines de la physique : le phénomène d'induction électromagnétique et la propagation d'ondes mécaniques*. Thèse, Université Paris 7.
- AMBROSE B.S., SHAFFER P.S., STEINBERG R.N. & Mc DERMOTT L.C. (1999). An investigation of student understanding of single-slit diffraction and double slit-interference. *American Journal of Physics*, vol. 67, n° 2, pp. 146-155.
- BORN M. & WOLF E. (1980). *Principles of Optics*. New York, Pergamon Press.
- BRAMAND P., FAYE P. & THOMASSIER G. (1982). *Physique, première S*. Paris, Hachette.
- CHARLOT R., GOUGEON J. & WALTER C. (1980). *Fondements de la physique, Terminale C*. Paris, Belin.
- COLIN P. (1999). *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement*. Thèse, Université Denis Diderot Paris 7.
- COLMEZ F. & MOREAU R. (1975). *Propagation dans un milieu à une dimension*. Document de travail de la commission Lagarrigue.
- FAWAZ A. & VIENNOT L. (1986). Image optique et vision. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 686, pp. 1125-1146.
- GALILI I. (1996). Students' conceptual change in geometrical optics. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 7, pp. 847-868.
- GOLDBERG F.M. & Mc DERMOTT L.C. (1987). An investigation of students understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror. *American Journal of Physics*, vol. 55., n° 2, pp. 108-119.
- HULIN M. (1975). Propagation d'un signal dans un milieu linéaire. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 574, pp. 949-956.
- JESSEL M. (1973). *Acoustique théorique Propagation et Holophonie*. Paris, Masson.
- KAMINSKI W. (1989). Conceptions des enfants et des autres sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.
- LEFÈVRE R. (1988). *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants sur le thème de l'optique*. Thèse, Université Paris 7.
- LINDER C. & ERICKSON G. (1989). A study of tertiary physics students' conceptualizations of sound. *International Journal of Science Education*, vol. 11, special issue, pp. 491-501.
- MAURINES L. (1986). *Premières notions sur la propagation des signaux mécaniques : analyse des difficultés des étudiants*. Thèse, Université Paris 7.
- MAURINES L. (1992). Mécanique spontanée du son, Actes du deuxième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques, Sète 1992. *Trema* n° 3-4, pp. 77-91.
- MAURINES L. (1995). Les étudiants et la phase d'une onde progressive : résultats d'une enquête exploratoire. In G. Mary & W. Kaminsky (Coord.), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, IUFM de Reims et Université de Reims-Champagne-Ardennes, pp. 107-123.
- MAURINES L. (1997). Students and the wave geometrical model of the propagation of waves in a three dimensional medium. In M. Bandiera, S. Caravita, E. Torraca & M. Vicentini (Coord.), « *Research in science education in Europe* », *Sélection des actes de la première conférence internationale de l'association européenne de recherche en sciences de l'éducation (ESERA), Rome, 1997*. Dordrecht, Kluwer, pp. 103-112.

- MAURINES L. (2000). Les étudiants, la diffraction de Fraunhofer et la formation des images en éclairage cohérent. *Didaskalia*, vol. 17, pp. 55-99.
- QUEYREL J.-L. & MESPLÈDE J. (1996). *Précis de Physique, Optique. Deuxième année.* Paris, Bréal.
- ROSSI M. (1986). *Électroacoustique.* Paris, Dunod.
- SOUM G., DENIZART M. & JAGUT R. (1995). *Optique*, tome 1. Paris, Hachette.
- TOMASINO A. & PENIGAUD A. (1993). *Physique, seconde.* Paris, Nathan.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique.* Paris, De Boeck.
- WATT D. & RUSSELL T. (1990). *Sound. Primary SPACE Project Research Report.* Liverpool, Liverpool University Press.
- WITTMANN M., STEINBERG R.N. & REDISCH E.F. (1999). Making sense of how students make sense of mechanical waves. *The physics teacher*, n° 37, pp. 15-21.

Cet article a été reçu le 20 juillet 1998 et accepté le 29 août 2002.



Le concept de masse en physique : quelques pistes à propos des conceptions et des obstacles

The concept of mass in physics : some elements about conceptions and obstacles

Damien GIVRY

Université Lyon 2
Laboratoire GRIC équipe COAST
5 avenue Pierre Mendès France, CP 11
69676 BRON Cedex, France.

Résumé

Ce travail propose de pointer certaines difficultés que rencontrent les élèves lors de l'enseignement du concept de masse en classe. Pour cela, il s'appuie sur l'approche historique de ce concept, ainsi que sur l'analyse des programmes, pour bâtir un questionnaire, proposé à des élèves allant de la classe de troisième au DEUG et à des enseignants de lycée. L'analyse de ce questionnaire a permis de mettre en évidence un certain nombre d'obstacles et de conceptions liés au concept de masse, ainsi que de pouvoir suivre leur évolution à travers les différents stades de l'enseignement.

Mots clés : didactique de la physique, conception, obstacle, masse inerte, masse gravitationnelle.

Abstract

This study deals with students' difficulties during the learning of the concept of mass in school. In order to better understand these difficulties, we have studied the history of this concept and analysed curricula. After this work, we have elaborated a questionnaire, that we proposed to students from the junior high school to the university and to high school teachers. Questionnaire analysis shows conceptions and obstacles concerning the concept of mass during the different stages of teaching and allows us to see their evolution.

Key words : *didactics of physics, conception, obstacle, inertial mass, gravitational mass.*

INTRODUCTION

La masse est une grandeur fondamentale de la physique, elle intervient aussi bien en mécanique classique que dans la théorie de la relativité, en physique nucléaire qu'en mécanique quantique. Cependant, l'apprentissage de ce concept est loin d'être évident et les élèves rencontrent de nombreuses difficultés lors de son enseignement en classe. Une partie des travaux en didactique réalisés sur ce sujet a porté sur les difficultés des élèves à faire la distinction entre le poids et la masse (Halbwachs & Bovet, 1980 ; Mullet, 1990 ; Galili, 1993 ; Aubert, 1994). Une autre étude a souligné l'ambiguïté que peut engendrer la différence entre le concept de masse inerte et celui de masse gravitationnelle (Heurtaux, 1978 ; Halbwachs & Bovet, 1983), ce qui a amené à se demander sur lequel de ces deux concepts s'appuyaient les élèves lorsqu'ils définissaient la masse (Doménech *et al.*, 1993). Notre travail s'inscrit dans la continuité de ceux traitant de la différence entre masse inerte et masse gravitationnelle. Cependant, il se centre sur les représentations des élèves au sujet de la masse inerte et s'intéresse plus particulièrement à l'évolution des obstacles et des conceptions des élèves de la classe de troisième à la deuxième année de DEUG¹.

Dans un premier temps, nous ferons une approche historique du concept de masse, que nous limiterons volontairement aux parties concernant notre étude, afin de repérer, à travers les grands changements conceptuels, d'éventuels obstacles épistémologiques. Dans un second temps, nous effectuerons, par le biais de la transposition didactique, une analyse de certains manuels et des programmes relatifs au concept de masse. À partir de ce travail préalable, nous formulerons des hypothèses de recherche et nous définirons le cadre théorique dans lequel nous allons les tester. Nous décrirons la méthodologie que nous avons mise en place pour cette étude et nous finirons par la présentation de nos résultats.

1. APPROCHE HISTORIQUE DU CONCEPT DE MASSE

1.1. Galilée, la loi de chute des corps conquise contre l'opinion générale

Au Moyen-Âge, l'enseignement de la philosophie et plus particulièrement des sciences se faisait dans des écoles scolastiques. Ces écoles (inspirées par la philosophie d'Aristote) considéraient le poids (*pondus*) comme une propriété des objets lourds. C'est Galilée (1564-1642) qui, en établissant la loi sur la chute des corps, a supprimé la distinction entre les objets lourds qui avaient un poids et les objets légers qui n'en avaient pas. Ce faisant, Galilée va se heurter à des pseudo-théories admises par les grands courants de pensée de l'époque. Deux types d'explications faisaient alors barrage : « *l'explication qualitative et cosmologique du mouvement de chute comme retour des graves (comprenez les corps lourds) à leur lieu naturel* », ainsi qu'une « *hypothèse empirique et quasi-mathématique, qui ne manque pas d'une certaine vraisemblance bien qu'elle soit fautive, suivant laquelle la vitesse de la chute est déterminée par le poids du corps* » (Merleau-Ponty, 1974, p. 22). C'est Galilée qui établit par l'expérience que tous les corps qui tombent de la même hauteur acquièrent la même accélération. Il précise notamment que « *la chute ne dépend pas du poids* » et que « *l'action de la résistance du milieu (le frottement) est relativement plus grande dans la chute des petits corps.* » (Merleau-Ponty, 1974, p. 22) c'est-à-dire que les frottements dépendent de la taille des objets. Cependant, Galilée ne concevait pas la gravité comme extérieure au corps. Il concevait néanmoins « *l'idée d'une résistance interne au changement de mouvement* » (Lecourt, 1999, p. 613), qu'il exprima à l'aide du principe de l'inertie pour le mouvement dans le plan horizontal. Ce principe, bien que généralisable (valable dans toutes les directions, sur la Terre comme dans l'espace), ne fut envisagé qu'horizontalement par Galilée, car c'était, selon lui, « *le seul réalisable expérimentalement à la surface de la Terre* » (Lecourt, 1999, p. 613). De plus ce principe n'était pas envisageable dans le cosmos, car, pour lui, « *la ligne cosmique la plus naturelle* » était « *le cercle et non la droite* » et « *par conséquent le mouvement rectiligne et uniforme* » n'était « *qu'une abstraction, valable comme approximation locale* » (Lecourt, 1999, p. 613).

À la même époque, Descartes (1596-1650), en s'appuyant sur ce principe, définit, dans son livre « *Méditation métaphysique* » (1641), la quantité de mouvement (p) comme étant le produit de la vitesse (v) par la quantité de matière (m) : $p = m \cdot v$. Le terme « quantité de matière » était d'ailleurs utilisé dès le XIV^e siècle, avec l'idée de sa conservation dans tous les changements, de plus, Richard Swineshead († 1355) envisageait la

possibilité de sa mesure mathématique par le produit de la densité et du volume.

1.2. Newton, la gravité est extérieure au corps

Mais c'est Newton (1642-1727) qui, le premier, établit une distinction nette entre la masse et le poids, en concevant la gravité comme une sollicitation extérieure. C'est sur la base de ce changement conceptuel révolutionnaire que repose la Mécanique classique. Dans ses *Principia Mathematica* (*Principes mathématiques de la philosophie naturelle*, 1687), il définit la masse comme la « quantité de matière » donnée par la « réunion de la densité et du volume » (sous-entendu le produit des deux). Il établit, à l'aide d'expériences sur des pendules, la proportionnalité entre le poids (P) et la masse (m) à une hauteur donnée, ce qui se traduit par l'équation :

$$P = m \cdot g$$

g étant l'intensité du champ de pesanteur, indépendante de la forme, de la nature et de la masse du corps. En voyant la gravité comme extérieure au corps et la masse comme une quantité invariable, il apparaît que le poids varie en fonction de la distance au centre de la Terre.

Par la suite, Newton étend la gravitation à tous les corps et érige le principe de la gravitation universelle : « *tous les corps ont en propre un pouvoir de gravité, proportionnel aux quantités de matières que chacun d'eux contient* ». C'est-à-dire que la force de gravitation de chaque objet est proportionnelle à sa masse.

À partir de ce principe et en utilisant les lois de Kepler (1571-1630) sur le mouvement des planètes ainsi que la loi de Galilée sur la chute des corps, lois qui utilisent toutes les deux la proportionnalité entre « *les espaces parcourus et les carrés des durées* », Newton établit que la force d'attraction de gravitation universelle entre deux corps de masse respectivement m et m' séparés par une distance d est :

$$F = G \frac{m \cdot m'}{d^2}$$

(G : constante de gravitation universelle).

Cette relation sera confirmée expérimentalement par Cavendish (1731-1810) au XIX^e siècle, qui, en pesant des petites masses à l'aide d'une balance de torsion, va retrouver la proportionnalité entre la force d'attraction et le produit des masses.

Newton définit aussi la force d'inertie propre à chaque corps, qu'il appelle *vis insita*, c'est-à-dire que « *le pouvoir de résister au changement d'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite est proportionnel à la masse du corps* » (Lecourt, 1999, p. 614), ce qui pourrait se résumer par : la masse inertielle s'oppose à la mise en mouvement ainsi qu'au changement de mouvement. La formulation du principe d'inertie selon Descartes repose essentiellement sur la conservation du mouvement et s'appuie sur des considérations géométriques. L'inertie n'est pas perçue comme une résistance au mouvement. Ce qui permet à Newton de donner une définition quantitative de la masse inertielle, ainsi qu'une formulation précise de la quantité de mouvement, qui allie le principe d'inertie et la loi de changement de mouvement : « *Le changement de la quantité de mouvement d'un corps provoqué par une force agissant sur lui est proportionnel à cette force en grandeur et en direction* » (Lecourt, 1999, p. 614). Newton l'appellera théorème du centre d'inertie, il se traduit par la relation mathématique suivante :

$$F \approx \Delta (m \cdot v)$$

(avec F la force, m la masse et v la vitesse). Que l'on trouvera le plus souvent dans la relation fondamentale de la dynamique sous la forme :

$$F = m \cdot a$$

(avec F la force, m la masse et a l'accélération). La masse apparaît comme le coefficient de proportionnalité entre la force et l'accélération, elle exprime le passage de la cinématique (propriétés du mouvement) à la dynamique (propriétés des forces). Ce qui permet, comme le souligne Newton, d'établir par cette relation l'équivalence de toutes les forces, quelle que soit leur nature (d'impulsion, de gravitation, électrique, etc.) Contrairement à ce que pensait Galilée, cette relation est universelle ; elle s'applique dans toutes les directions, aussi bien sur Terre que dans l'espace. Elle ne se limite pas à la direction horizontale.

Suite à la définition de la masse newtonienne, la physique et la chimie vont connaître un essor considérable. Néanmoins vers la fin du XIX^e siècle, Mach (1838-1916) reprochait à cette définition d'être imprécise et il définit la masse par l'accélération (Mach, 1883, p. 210). Cette définition fut remise en cause par des expériences où la masse n'était plus conservée. C'est au début du XX^e siècle, qu'Einstein (1879-1955), à travers la théorie de la relativité restreinte, relia la masse à l'énergie. Depuis, de nouveaux domaines, comme la mécanique quantique, se sont développés ; toutefois le concept de masse reste essentiel dans la physique moderne.

2. LES OBSTACLES ÉPISTÉMOLOGIQUES

Ce bref résumé sur l'évolution du concept de masse à travers les siècles, nous a permis d'observer une partie des grands changements conceptuels qu'il a subis. Ces changements se sont faits contre des théories déjà existantes ; c'est donc en termes d'obstacle qu'il faut voir, dans ce cas, l'avancée de la science. C'est en utilisant cette définition « Bachelardienne » de l'obstacle, que nous en avons identifié un certain nombre susceptibles de poser des difficultés lors de l'enseignement du concept de masse.

2.1. La gravité est interne aux objets

Ce mode de raisonnement revient à considérer seulement les actions du corps étudié sur l'extérieur. Ainsi on dira que si on lâche une pierre, elle tombe par terre, à cause de sa « lourdeur ». Alors qu'en mécanique classique, ce sont les forces extérieures à l'objet (ici la gravité) qui sont responsables du mouvement et non l'objet qui possède un capital (voire une volonté) lui permettant de retourner à sa position naturelle.

2.2. La vitesse de chute est proportionnelle au poids

Lorsqu'on lâche deux objets de poids différents et de même forme, instinctivement on pense que le plus lourd arrivera le premier au sol. Cependant, si on effectue cette expérience à une hauteur de deux mètres, la différence entre les instants des deux impacts sur le sol n'est pas perceptible à l'œil nu. Cette hypothèse, bien que datant du XVI^e siècle, est toujours d'actualité. Or la vitesse de chute ne dépend pas du poids, mais des frottements de l'air sur l'objet. Cependant, cette idée est souvent prise comme une vérité établie, alors qu'elle est bâtie sur l'opinion courante. « *L'opinion pense mal ; elle ne pense pas : elle traduit des besoins en connaissances. En désignant les objets par leur utilité, elle s'interdit de les connaître. On ne peut rien fonder sur l'opinion : il faut d'abord la détruire. Elle est le premier obstacle à surmonter* » (Bachelard, 1937, p. 14).

2.3. Le principe d'inertie ne s'applique qu'horizontalement

Galilée considérait la masse comme une résistance au mouvement, ce qui rejoint la définition de Newton, mais il n'envisageait le principe d'inertie que dans un plan horizontal. Or ce principe est valable dans toutes les directions. Simplement, sur un plan horizontal, le poids d'un objet est compensé

par la réaction du support, ce qui donne une situation épurée, où, si l'on néglige les frottements, seule la masse inertielle intervient.

3. ANALYSE DES PROGRAMMES ET DES MANUELS : LA TRANSPPOSITION DIDACTIQUE

Nous nous proposons de regarder comment le concept de masse est présenté dans les programmes ainsi que dans certains manuels. Pour cela, nous étudierons sa transposition didactique, au sens d'Y. Chevallard (1985), ce qui devrait nous permettre d'appréhender les écarts entre le savoir de référence et le savoir à enseigner. Précisons que cette analyse n'est pas exhaustive et qu'elle ne traite que des parties que nous estimons clefs à l'introduction du concept de masse.

3.1. Savoir de référence

Pour étudier la transposition didactique du concept de masse, nous sommes appuyés sur deux ouvrages de mécanique, Landau & Lifchitz (1975) et Reif (1995), pour définir un savoir de référence lié à ce concept. Pour la suite de cet article, nous adopterons les définitions des trois concepts qui suivent.

La masse gravitationnelle

Elle est liée à la gravitation : tous les objets s'attirent entre eux et la force d'attraction dépend de leurs masses. Par exemple, plus une pierre sera lourde et plus elle sera attirée par la Terre.

La masse inerte

Elle se définit comme une résistance à la mise en mouvement et au changement de mouvement. C'est-à-dire que plus un objet aura une masse importante et plus il sera difficile de le faire accélérer, ralentir ou changer de direction.

Les frottements

Il y a deux types de frottements, les frottements secs qui correspondent au contact entre deux surfaces solides (par exemple une chaussure et le sol) et les frottements visqueux qui sont le résultat d'un contact entre une surface solide et un fluide (liquide ou gazeux), par exemple un ballon dans l'air.

Les frottements visqueux varient proportionnellement à la vitesse. En revanche, les frottements secs n'apparaissent que lors de la mise en mouvement d'un objet. Ils s'opposent à la mise en mouvement et varient dans le même sens que le poids. Plus un objet aura un poids important et plus il y aura de frottements. Par exemple, il y aura plus de frottements des roues sur le sol pour un camion chargé que pour un camion vide.

3.2. Analyse de la transposition entre le savoir de référence et le savoir à enseigner

Nous avons analysé le programme datant de 1998 (savoir à enseigner) :

– de la classe de troisième : c'est à ce moment que l'on introduit le concept de masse gravitationnelle et que l'on demande aux élèves « *quelle relation existe-t-il entre le poids et la masse d'un objet ?* » ;

– de première : on commence l'introduction de la masse inerte à travers le « *principe d'inertie mis en évidence par Galilée* », ainsi que « *les phénomènes de frottements* », on illustre sans formalisme « *les interactions à distance* » à travers « *la gravitation* » ;

– de terminale : le concept de poids est situé à l'intérieur d'une théorie plus large : « *la loi de la gravitation universelle* ». La masse inertielle est introduite par « *la relation fondamentale de la dynamique* ».

Nous avons aussi étudié un manuel de première (Bordas, 1998), ainsi qu'un manuel de terminale (Bordas, 1998), afin d'affiner notre analyse. En effet, il semblerait que les manuels se rapprochent beaucoup plus du savoir enseigné par les enseignants que les programmes.

3.3. Résultats de l'analyse

L'analyse des programmes de 1998 et des manuels, sous le regard de la transposition didactique, nous a permis de constater certains écarts entre le savoir de référence et le savoir à enseigner : le plus important est l'absence du concept de masse inertielle dans les programmes et les manuels. Bien que le principe d'inertie et la relation fondamentale de la dynamique y soient présents, la masse n'est jamais présentée comme une résistance à la mise en mouvement ou au changement de mouvement. Ce qui peut engendrer un certain nombre de difficultés :

– **le concept de masse gravitationnelle risque d'être utilisé à la place du concept de masse inerte**, (étant donné que seule la masse gravi-

tationnelle est définie). Il n'y a aucun moyen de faire la distinction entre ces deux concepts. On risque de voir apparaître des raisonnements où la masse inerte sera expliquée par la loi de la gravitation ;

– **la force de frottement est présentée comme la seule résistance au mouvement**, on risque de voir remplacer le concept de masse inertielle par les frottements, car ils s'opposent tous les deux au mouvement. Les frottements sont souvent perçus comme la seule explication à la difficulté de mettre en mouvement un objet lourd. Ils risquent de masquer les effets liés à l'inertie, c'est pourquoi nous faisons l'hypothèse que les frottements peuvent être un obstacle à l'acquisition du concept de masse inerte.

Nous avons aussi remarqué d'autres écarts :

– **la masse n'est jamais définie**, il est juste précisé qu'elle se mesure en kilogrammes ;

– **le concept d'inertie, lorsqu'il est utilisé implicitement, est quasiment toujours présenté horizontalement**. En effet, nous n'avons trouvé dans les manuels que des situations mettant en jeu des objets en mouvement horizontal (table à coussin d'air, voiture, etc.) pour illustrer la relation fondamentale de la dynamique.

L'analyse des programmes et des manuels nous a permis de mettre en évidence un certain nombre de difficultés que peuvent rencontrer les élèves lors de l'enseignement du concept de masse. Lors de cette analyse nous nous sommes contentés de pointer les endroits susceptibles de poser problème ; il nous faut maintenant formuler ces difficultés sous forme d'hypothèses, afin de pouvoir les tester. Mais avant, il nous faut définir le cadre théorique dans lequel nous nous sommes placés.

4. CADRE THÉORIQUE

Nous nous plaçons dans une approche constructiviste, où l'apprenant est « acteur » de la construction de son savoir et où l'apprentissage dépend des connaissances initiales des élèves (Piaget, 1969). Cependant, nous n'adoptons pas la séparation faite par Piaget entre la forme de pensée enfantine et les formes de la pensée mûre ; nous préférons nous référer à Vygotski, qui considère que « *le développement des concepts spontanés et celui des concepts scientifiques, sont, nous devons présumer, des processus étroitement liés qui exercent l'un sur l'autre une influence constante* » (Vygotski, 1985, p. 221).

Pour étudier les connaissances initiales des élèves, nous utiliserons des travaux en didactique des sciences, s'appuyant sur les définitions qui suivent.

Obstacle

Il ne s'agit pas de considérer des « *obstacles externes, comme la complexité et la fugacité des phénomènes* », mais « *c'est dans l'acte de connaître, intimement, qu'apparaissent, par une nécessité fonctionnelle, des lenteurs et des troubles* ». « *C'est là que nous décèlerons des causes d'inertie que nous appellerons des obstacles épistémologiques* ». « *Face au réel, ce qu'on croit savoir clairement offusque ce qu'on devrait savoir. Quand il se présente à la culture scientifique, l'esprit n'est jamais jeune. Il est même très vieux, car il a l'âge de ses préjugés* ». « *Le réel n'est jamais* » ce qu'on pourrait croire, « *mais il est toujours ce qu'on aurait dû penser* » (Bachelard, 1937, p. 14). On pourrait qualifier les obstacles épistémologiques de pseudo-connaissances qui empêchent la connaissance du réel, car c'est le fait de connaître et non celui d'ignorer qui s'oppose à la construction du rapport au savoir.

Contrat didactique

Le contrat didactique est l'ensemble « *des relations qui déterminent – explicitement pour une petite part, mais surtout implicitement – ce que chaque partenaire va avoir à charge de gérer et dont il sera, d'une manière ou d'une autre responsable devant l'autre.* » Ce qui veut dire que « *au cours d'une séance ayant pour objet l'enseignement à un élève d'une connaissance déterminée, l'élève interprète la situation qui lui est présentée, les questions qui lui sont posées, les informations qui lui sont fournies, les contraintes qui lui sont imposées, en fonction de ce que le maître reproduit, consciemment ou non, de façon répétitive dans sa pratique de l'enseignement. Nous nous intéressons plus particulièrement à ce qui, dans ces habitudes, est spécifique des connaissances enseignées* » (Brousseau, 1982, p. 61).

Conception

« *Une conception renvoie à des processus mentaux mis en oeuvre par celui qui agit, qui raisonne, qui apprend... Ces processus ne sont bien sûr pas directement observables. On ne peut que constater leurs manifestations au niveau des procédures mises en oeuvre par l'apprenant. Le chercheur, dans le but de donner du sens aux erreurs d'un élève, doit donc faire des inférences sur son fonctionnement mental.* » « *On peut dire que les conceptions ne sont pas une propriété des individus mais une construction du chercheur pour modéliser le fonctionnement cognitif de l'élève en vue d'interpréter les procédures observées dans les situations d'apprentissage.* » (Robardet & Guillaud, 1997, pp. 158-159).

Cette définition demande quelques précisions sur ce que l'on entend par erreur. En effet, nous ne nous plaçons pas dans le courant des misconceptions (Confrey, 1986 ; Novak, 1983), où l'analyse des réponses des élèves est faite en termes de conception juste ou fautive. Nous préférons ne pas porter de jugement et considérer une réponse, incorrecte du point de vue de la physique, comme une conception utilisée hors de son domaine de validité (Balacheff, 1999). De plus, nous ne pensons pas qu'une nouvelle conception en remplace une autre, mais que plusieurs conceptions cohabitent et sont mobilisées suivant le contexte (Duit, 1994). Lorsque deux conceptions sont en compétition l'une est progressivement abandonnée, au profit de l'autre qui apparaît comme plus pertinente dans un plus grand nombre de situations (Hewson & Lemberger, 1999). Dans cette étude, nous essayons de comprendre le raisonnement qu'utilisent les élèves dans un certain nombre de situations et nous ne nous limitons pas à savoir si ce raisonnement est juste ou faux du point de vue de la physique.

5. FORMULATIONS DES HYPOTHÈSES DE RECHERCHE

Nous avons formulé les hypothèses de recherche qui suivent.

1. Le concept de masse inerte n'est pas mobilisé par les élèves et il est peu mobilisé par les enseignants : nous considérons que ce concept peut être connu des élèves et qu'il est connu des enseignants. Cependant, nous pensons qu'il est possible que plusieurs conceptions cohabitent (nous considérons un concept comme une **conception** en accord avec le point de vue de la physique), nous pensons que dans ce cas le concept de masse inerte ne sera pas mobilisé.

2. La force de frottement est, pour les élèves, un obstacle à l'apprentissage du concept de masse inertielle : présenter la force de frottement comme la seule résistance au mouvement risque d'en faire un **obstacle** lié à l'enseignement.

3. Le concept de masse inerte n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement par les élèves : en ne présentant le concept de masse inerte que dans des situations horizontales, nous pensons que, par effet de **contrat**, les élèves risquent de penser que ce concept n'existe qu'horizontalement.

4. Le concept de masse gravitationnelle est utilisé, par les élèves, à la place de celui de masse inerte : en ne présentant que le concept de masse gravitationnelle, par effet de **contrat**, il est probable que les élèves utilisent ce concept dans toutes les situations.

5. Pour les élèves, la vitesse en chute libre est fonction du poids : cette pseudo-connaissance, admise dans le quotidien, risque de se poser en **obstacle** pour les situations de chute libre.

6. MÉTHODOLOGIE ET MISE EN PLACE DU QUESTIONNAIRE

Le questionnaire nous est apparu comme la solution la plus adaptée pour tester nos hypothèses sur un public allant de la troisième au DEUG. En effet, il offre l'avantage de pouvoir traiter un grand nombre de productions.

Questionnaire

Nous avons décidé de faire un questionnaire avec des questions semi-ouvertes, dans lesquelles nous présentons des situations familières, où les élèves doivent prédire et expliquer ce qu'il va se passer. L'anticipation des phénomènes nous a semblé un des moyens les plus efficaces pour obliger les élèves à expliciter leurs conceptions. Faire appel à des situations familières favorise la compréhension des questions, tout en limitant les réponses dans lesquelles les élèves récitent leurs cours sans donner d'explication.

Grille d'analyse

Afin de mettre au point une grille d'analyse, nous avons défini des catégories de réponses, grâce à une analyse *a priori*, que nous avons complétée après analyse *a posteriori* des questionnaires.

Mise en place

Ce questionnaire a été distribué à :

- des élèves de **troisième**, auxquels le concept de masse inerte n'avait pas encore été présenté (stade **avant enseignement**) ;
- des élèves de **terminale**, après l'enseignement sur la mécanique, qui correspond au moment où le concept de masse inerte est enseigné (stade **d'enseignement**) ;
- des élèves de 2^{ème} année de **DEUG** (MIAS²), pour lesquels le concept était théoriquement assimilé (stade **après enseignement**) ;
- des **enseignants** de lycée, qui enseignent le concept de masse (stade **savoir des enseignants**).

Le choix de cette population devait nous permettre d'obtenir les différents raisonnements liés au concept de masse pour chacun des stades d'enseignement.

Précisons que pour :

- la classe de troisième, **30** questionnaires sur **30** ont été remplis,
- la classe de terminale, **31** questionnaires sur **31** ont été remplis,
- la classe de DEUG, **9** questionnaires sur **40** ont été remplis,
- les enseignants, **8** questionnaires sur **50** ont été remplis.

Nous présentons nos résultats, question par question, et montrons l'évolution des réponses pour les différents stades d'enseignement.

7. RÉSULTATS DU QUESTIONNAIRE

7.1. Question 1

Nous avons proposé une situation faisant intervenir le concept de masse inerte et celui de frottement, afin d'observer comment ces concepts sont mobilisés par les élèves et si l'un est privilégié par rapport à l'autre. Nous n'attendions pas que les élèves mobilisent les deux, car comme l'explique L. Viennot (1996), il est très dur, pour les élèves, d'envisager que, pour un effet donné, il puisse y avoir plusieurs causes et que ces causes soient simultanées.

Nous avons posé la question suivante :

« Dans un super marché, on pousse un caddie vide puis un caddie plein, comment expliques-tu que le caddie plein soit plus dur à mettre en mouvement que le caddie vide ? »

Réponse attendue : le caddie plein est plus dur à mettre en mouvement, car sa masse inerte **et** les frottements sont plus grands que pour le chariot vide, donc s'opposent d'avantage à la mise en mouvement.

Un effet : le caddie plein est plus dur à mettre en mouvement.

Deux causes : la masse (inerte) et les frottements sont plus importants.

Pour analyser les réponses à cette question, nous avons utilisé les trois catégories suivantes (tableau 1) :

– **le constat d'évidence** : ce sont des réponses que nous ne pouvons pas analyser en termes de concept, car elles se placent sur le plan de la description. Par exemple : « *Car le caddie plein est plus lourd* », « *parce*

que *c'est plus lourd* (logique) ». Dans ces réponses, nous ne pouvons savoir ni quelle signification les élèves donnent au mot *lourd*, ni s'ils le rattachent à un concept lié à la masse gravitationnelle. Ces réponses ne nous donnent pas assez d'information pour en tirer une conclusion au niveau conceptuel. En revanche, elles peuvent être interprétées en termes de causalité simple : l'effet (le caddie plein est plus dur à mettre en mouvement) est dû à la cause (le caddie est plein donc plus lourd) ;

– **les frottements** : ce sont des réponses qui font appel à des raisonnements liés aux frottements. Par exemple : « *car l'action du poids des choses achetées agit sur les roues, et exerce une pression* » (élève de troisième), « *les frottements avec le sol sont beaucoup plus importants lorsque le caddie est plein à cause du poids* » (élève de terminale), « *les frottements augmentent avec le poids* » (élève de 2^{ème} année de DEUG).

– **l'inertie** : ce sont des réponses faisant appel à des raisonnements liés à l'inertie. Par exemple : « *le poids joue dans le sens inverse de la force* » (élèves de terminale), « *plus grande inertie, donc il faut donner plus de force au plus lourd* » (élève de 2^{ème} année de DEUG).

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Frottements	6/30	16/31	3/9	4/8
Inertie	0/30	3/31	3/9	3/8
Inertie + frottements	0/30	0/31	0/9	1/8
Constat d'évidence	22/30	6/31	1/9	0/8
Pas de réponse	2/30	5/31	2/9	0/8

Tableau 1 : Évolution des réponses en fonction des différents stades d'enseignement

Analyse du tableau

Les réponses liées aux frottements sont largement majoritaires. Bien que les élèves de troisième n'aient pas encore étudié les frottements en cours, ils commencent déjà à utiliser des raisonnements s'en rapprochant : ils parlent notamment de frottement et de pression sur les roues.

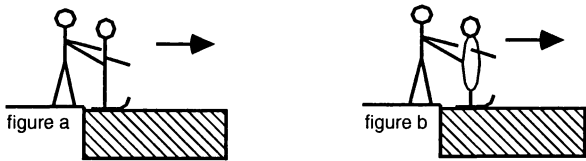
Les enseignants mobilisent plus le concept de frottements que d'inertie. C'est peut-être la raison pour laquelle nous constatons que les élèves de terminale font appel majoritairement aux frottements dans leurs réponses (16/31), contre 3/31 pour l'inertie.

Un seul enseignant répond à la question en utilisant les frottements et le concept de masse inerte. Il semblerait que les enseignants aient, comme les élèves (Viennot, 1996), des difficultés à mobiliser plusieurs concepts pour expliquer une situation donnée.

Enfin, les constats d'évidence, catégorie de réponses majoritaire en troisième diminuent fortement en terminale, jusqu'à devenir inexistantes en DEUG. Ainsi, il semblerait que le système explicatif des élèves devient beaucoup plus poussé au fur et à mesure de l'enseignement, que les élèves se rattachent beaucoup moins aux traits de surface (ce qui est pareil ou différent au niveau perceptible) et qu'ils bâtissent de plus en plus leurs raisonnements sur des théories.

7.2. Question 2

Nous avons décidé de prendre une situation similaire à la question 1, mais nous avons supprimé les frottements. Ici, seule la masse inertielle intervient.



« Les frottements entre le patin à glace et la glace sont négligeables.
 Sur le bord de la patinoire, un élève pousse un camarade (figure a), il pousse ensuite avec la même force un autre camarade, qui est plus lourd (figure b).
 Selon toi :
 1- Le plus léger va parcourir une distance plus grande.
 2- Le plus lourd va parcourir une distance plus grande.
 3- Les deux patineurs vont parcourir la même distance.
 Explique pourquoi ».

Cette question comporte une ambiguïté ; en effet elle demande de comparer les distances parcourues, mais elle ne précise pas que cette comparaison doit se dérouler dans le « même laps de temps », sinon, compte tenu de l'absence de frottement, entre la glace et le patin et en négligeant les frottements dus à l'air, les deux patineurs ne devraient jamais s'arrêter. Pour palier cette imprécision, nous n'avons analysé que les réponses comportant des explications utilisant la vitesse ou comparant les distances dans un même laps de temps. De plus, nous n'avons pas voulu utiliser le mot force au sens de la physique (en précisant son intensité, son sens et sa direction), mais au sens de la vie quotidienne (pousser avec la même force = pousser pareil) afin d'éviter au maximum que les élèves récitent leur cours et donnent des formules, car nous n'aurions rien pu tirer de ce type d'explication.

Réponse attendue : la force de lancement étant identique, le plus léger sera plus facile à mettre en mouvement, car il a une masse inerte plus petite, donc il aura une vitesse plus importante et ira plus loin que le plus lourd dans le même laps de temps.

Nous avons défini trois nouvelles catégories (tableau 2) :

– **l'élan** : c'est l'idée selon laquelle plus un objet sera lourd et plus il ira vite, la masse jouant un rôle moteur qui entraîne les objets. Nous avons baptisé ce type de raisonnement la conception d'élan. Voici quelques réponses d'élèves : « *car la masse entraîne* », « *parce qu'avec sa lourdeur, il va avoir plus d'élan* » (élèves de troisième), « *l'énergie emmagasinée est plus grande lors de la mise en mouvement d'un objet lourd* » (élève de terminale), « *car la force d'inertie est proportionnelle à m* », « *car $E_c = 1/2 mv^2$ est plus grande pour le plus lourd* » (élèves de DEUG).

Cette conception rejoint l'idée pré-galiléenne d'*impetus* : « *une certaine énergie motrice incorporelle était cédée au projectile par l'instrument du jet* » (Lecourt, 1999, p. 503). Cette idée, selon laquelle le mouvement est interprété à l'aide « *d'un capital de force* » qui entraîne les objets, a été retrouvée chez de nombreux élèves par Viennot (1978). Précisons que, dans cette situation, le « capital de force » est associé, par les élèves, uniquement à des idées faisant appel à la lourdeur ou à la masse ;

– **l'attraction terrestre** : c'est l'idée selon laquelle plus un objet est lourd et plus il est difficile à mettre en mouvement, parce que l'attraction terrestre empêche le mouvement. C'est comme s'il y avait un aimant au centre de la terre qui attirerait les objets et freinerait leur mise en mouvement. On retrouve le cas où la masse gravitationnelle est utilisée à la place de la masse inerte. Voici quelques réponses, où il est écrit que le patineur le plus léger parcourt une plus grande distance dans un même laps de temps : « *parce que la force d'attraction du camarade le plus lourd est plus forte et freine la vitesse* » (élève de troisième), « *le poids va vers le centre de la Terre, donc la Terre joue un rôle de résistance par rapport au poids* », « *à cause de l'attraction de la Terre qui est plus forte suivant la masse de l'objet* » (élèves de terminale) ;

– **l'inertie est ignorée** : il s'agit des justifications dans lesquelles la masse (inerte) ne joue aucun rôle. Les élèves répondent que, sans frottements, les deux patineurs parcourront la même distance : « *car même force, donc même vitesse* », « *car le poids n'a aucun lien avec la vitesse* » (élèves de terminale), « *comme $P = m.g$, pour les deux camarades la réaction du support et le poids s'annulent, de plus les frottements sont négligeables, donc ils vont parcourir la même distance* » (élève de DEUG), « *ils parcourent la même distance en des temps égaux* » (enseignant de lycée).

Nous avons gardé la catégorie **inertie** : « *le poids joue une force de résistance contre la force de l'élève* » (élève de terminale).

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Inertie ignorée	0/30	13/31	3/9	1/8
Inertie	4/30	5/31	1/9	4/8
Attraction Terrestre	1/30	1/31	0/9	0/8
Élan	6/30	2/31	3/9	0/8
Constat d'évidence	1/30	0/31	0/9	0/8
Réponse non analysée	14/30	7/31	2/9	3/8
Pas de réponse	4/30	3/31	0/9	0/8

Tableau 2 : **Évolution des réponses en fonction des différents stades d'enseignement**

Analyse du tableau

Nous avons dû écarter la moitié des réponses des élèves de troisième et environ un tiers des réponses des autres classes, à cause du manque de précision de cette question. L'analyse dont nous rendons compte ne concerne plus la totalité des personnes interrogées.

Le concept d'inertie commence à être envisagé par les élèves de troisième : « *parce que le plus léger bouge facilement* », « *car son poids le ralentira moins* ». Bien qu'envisagée en troisième, l'inertie est très peu mobilisée en terminale et en DEUG. Beaucoup des réponses d'élèves de terminale et de DEUG mobilisent des idées à l'encontre du concept d'inertie [la masse (inerte) ne joue aucun rôle]. Nous avons même trouvé un enseignant qui, dans sa réponse, niait ce rôle. Cette situation nous permet de voir que le concept d'inertie est très peu mobilisé, ce qui nous conforte dans nos hypothèses de recherche. De plus, en comparant les réponses aux questions 1 et 2, nous trouvons que la majorité des élèves qui justifient la question 1 par les frottements ne mobilisent pas le concept d'inertie à la question 2.

Les élèves qui mobilisaient le concept de masse inerte dans la question 1 ne le mobilisent pas forcément dans la question 2. Ce qui nous amène à préciser que les raisonnements, que nous inférons aux réponses des élèves, sont forcément rattachés à la situation proposée. Ce n'est pas parce qu'un élève a utilisé la conception d'élan dans une situation qu'il l'utilisera de nouveau dans une autre situation.

Enfin, les réponses faisant appel à la conception d'élan restent présentes de la troisième au DEUG. Précisons que, contrairement à la conception d'attraction terrestre, que nous avons envisagée dès l'analyse *a priori*, la conception d'élan a été découverte lors de l'analyse *a posteriori* des questionnaires.

7.3. Question 3

À travers cette question, nous souhaitons tester deux hypothèses : pour les élèves, la vitesse en chute libre est fonction du poids et le concept d'inertie n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement (tableau 3). Nous avons choisi l'énoncé suivant qui fait intervenir la masse gravitationnelle et la masse inerte verticalement :

« Un homme tient une boule de pétanque et une balle de tennis dans ses mains, il les place à la même hauteur et les lâche en même temps.

Selon toi :

1- C'est la boule de pétanque qui va toucher le sol en premier.

2- C'est la balle de tennis qui va toucher le sol en premier.

3- Elles vont arriver en même temps.

Explique pourquoi ».

Réponse attendue :

– la boule de pétanque étant plus lourde, elle sera plus attirée par la Terre (masse gravitationnelle), mais elle sera plus dure à mettre en mouvement (masse inerte),

– la balle de tennis sera moins attirée par la Terre, mais se mettra plus facilement en mouvement.

C'est pour cela que la boule de pétanque et la balle de tennis arrivent en même temps.

Pour éviter au maximum les réponses de type « cours » avec des formules, nous n'avons pas précisé s'il fallait négliger ou non les frottements de l'air sur les balles. En toute rigueur physique, il serait normal de prendre les frottements de l'air en compte et de considérer que la boule de pétanque arrivera très légèrement avant la balle de tennis. Cependant, à hauteur d'homme, la différence n'est pas perceptible à l'œil nu et ces deux objets arrivent en même temps.

Pour les réponses, nous avons eu deux élèves de troisième qui expliquent que la boule de pétanque arrive en premier « *parce que l'air retient plus la plus légère* », et il n'y a que deux enseignants qui ont utilisé des justifications liées aux frottements de l'air. Tous les autres élèves ne parlent pas d'air dans leurs explications, donc nous faisons l'hypothèse qu'ils n'en tiennent pas compte dans leurs réponses.

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Boule de pétanque	19/30	16/31	1/9	0/8
Explications :				
Constat d'évidence	16/19	13/16	0/1	0/0
Frottements	2/19	0/16	0/1	0/0
Masse gravitationnelle	1/19	3/16	1/1	0/0
En même temps	10/30	12/31	8/9	8/8
Explications :				
Cours	3/10	6/12	8/9	8/8
Pas d'explication	7/10	6/12	0/9	0/8
Pas de réponse	1/30	3/31	0/9	0/8

Tableau 3 : **Évolution des réponses en fonction des différents stades d'enseignement**

Analyse du tableau

La majorité des élèves de troisième et de terminale répond que la boule de pétanque va arriver la première. Ce qui est surprenant c'est le grand nombre de réponses de type constat d'évidence et le peu de réponses utilisant la masse gravitationnelle. Pour les élèves de DEUG, la tendance s'inverse et la quasi-totalité pense que la boule de pétanque et la balle de tennis vont arriver en même temps. Ce renversement provient certainement de l'enseignement, car cette situation est souvent traitée en classe de terminale.

Nous avons obtenu deux types de justification :

– **le constat d'évidence** : « *car la boule de pétanque est plus lourde* » ;

– **le type cours** : « *la vitesse ne dépend pas de la masse* », « *le poids n'intervient pas dans cette expérience, seul le volume intervient* » (élèves de terminale) « *$a=g$ donc c'est indépendant de la masse* », « *$F=m.a$, donc $a=g$* » (élèves de DEUG) ; dans les réponses de type cours nous n'obtenions pas assez d'information sur le concept de masse pour pouvoir en déduire quelque chose.

Cette question renforce l'hypothèse selon laquelle : « la vitesse de chute dépend du poids » pour les élèves de troisième et de terminale. En revanche, elle a tendance à l'invalider pour les élèves de DEUG et les enseignants.

En ce qui concerne l'hypothèse : « le concept d'inertie n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement par les élèves », nous ne pouvons pas trancher : certes le concept de masse inerte n'est jamais

mentionné par les élèves, mais le concept de masse gravitationnelle est très peu utilisé dans les réponses. Nous pouvons conclure seulement que les concepts de masse inerte et de masse gravitationnelle sont très peu mobilisés par les élèves.

7.4. Question 4

Cette question se propose de tester l'hypothèse : « le concept de masse inerte n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement par les élèves ». Dans cette situation, l'inertie agit horizontalement et la gravitation verticalement (tableau 4).

« Deux punching-balls sont suspendus au plafond, le premier est rempli de sable et le second est rempli de plumes. Un boxeur tape de toutes ses forces, dans le premier punching-ball, puis dans le second.

Selon toi :

- 1- C'est le punching-ball rempli de sable qui va monter le plus haut.
- 2- C'est le punching-ball rempli de plumes qui va monter le plus haut.
- 3- Ils vont monter à la même hauteur.

Explique pourquoi ».

Nous avons utilisé volontairement l'expression quotidienne « *taper de toutes ses forces* », à la place de l'expression physique avec « *une force de même intensité* », pour éviter que les élèves modélisent cette situation avec des formules mathématiques et pour favoriser l'explication dans un langage naturel.

Réponse attendue : le punching-ball rempli de plumes va monter plus haut que celui rempli de sable, car il a une masse moins importante donc il est plus facile à mettre en mouvement et lorsqu'il monte, il est moins attiré par la Terre. (Nous ne tenons pas compte des frottements de l'air sur le punching-ball).

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Même hauteur	8/30	4/31	0/9	1/8
Plume plus haut	20/30	25/31	8/9	6/8
Explications :				
Constat d'évidence	12/20	11/25	1/8	0/6
Masse gravitationnelle	2/20	0/25	2/8	1/6
Masse inerte	0/20	7/25	0/8	2/6
Pas d'explication	6/20	7/25	5/8	3/6
Sable plus haut	2/30	0/31	0/9	0/8
Explication :				
Élan	2/2	0/0	0/0	0/0
Pas de réponse	0/30	2/31	1/9	1/8

Tableau 4 : **Évolution des réponses en fonction des différents stades d'enseignement**

Analyse du tableau

Plus de 3/4 des réponses indiquent que le punching-ball rempli de plumes va monter le plus haut et cela pour tous les niveaux d'enseignement. Il est intéressant de voir que l'on retrouve, comme pour la question 3, un nombre élevé de constats d'évidence et des réponses sans explication, ce qui montre que les élèves ont des difficultés à expliquer des situations où le concept de masse inerte et celui de masse gravitationnelle sont présents simultanément. De plus ces concepts sont mobilisés rarement dans les explications des élèves, sauf pour la classe de terminale où environ un quart l'utilise. Exemple : « *celui rempli de plumes monte plus haut car il est plus facile à mettre en mouvement* » (élève de terminale).

La conception d'élan se retrouve, mais uniquement dans les réponses des élèves de troisième, pour justifier que le punching-ball de sable monte le plus haut.

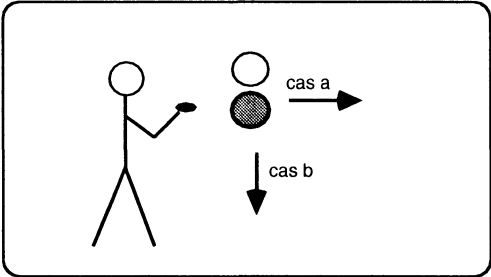
Le concept d'inertie est trop peu mobilisé pour nous permettre de trancher sur le fait que le concept de masse inerte n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement par les élèves. Nous pouvons juste constater qu'un quart des élèves de terminale le mobilise dans cette situation.

7.5. Question 5

Toujours dans l'idée de regarder quand le concept d'inertie est mobilisé par les élèves, nous avons cherché une situation où, **seul**, le concept de masse inerte interviendrait. Pour cela nous avons choisi une

situation se déroulant dans l'espace. Cette question n'est plus inspirée d'une situation familière : les élèves ne peuvent pas s'appuyer sur leur vécu pour y répondre.

MIR



« Un cosmonaute flotte dans la station MIR en état d'apesanteur. Il doit frapper avec la même force un ballon rempli d'air, puis un ballon rempli de sable. Selon toi, s'il frappe les deux ballons horizontalement (cas a) :

1-C'est le ballon rempli de sable qui va partir le plus vite.
 2-C'est le ballon rempli d'air qui va partir le plus vite.
 3-Ils vont partir pareil.

Explique pourquoi

Même question pour le cas b ».

Nous avons utilisé volontairement l'expression quotidienne « *frapper avec la même force* », à la place de l'expression physique avec « *une force de même intensité* », pour éviter que les élèves modélisent cette situation avec des formules mathématiques et pour favoriser l'explication de cette situation en langage naturel (tableaux 5a et 5b)

Réponse attendue : le ballon rempli d'air va partir plus vite, car sa masse est moins grande que celle du ballon rempli de sable donc il sera plus facile à mettre en mouvement. Cette question demande aux élèves d'étudier la situation juste après l'impact du ballon et nous n'attendions pas que les élèves prennent en compte les frottements de l'air sur les ballons.

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Réponse 1 (sable)	10/30	0/31	0/9	1/8
Réponse 2 (air)	10/30	0/31	1/9	7/8
Réponse 3 (identique)	9/30	31/31	7/9	0/8
Pas de réponse	1/30	0/31	1/9	0/8

Tableau 5a : **Évolution des réponses à la question 5 (cas a) en fonction des différents stades d'enseignement**

Analyse du tableau

Il est impressionnant de voir que, pour la terminale, tous les élèves répondent que les deux ballons vont partir avec la même vitesse. Nous avons trouvé de nombreuses justifications du type : « *la masse n'a pas d'importance, car l'expérience se passe en apesanteur* », « *en apesanteur la masse n'a pas d'importance* ». De plus, la quasi-totalité des élèves de DEUG répond comme les terminales, avec le même type de justification.

	Troisième	Terminale	DEUG	Enseignant
Réponse 1 (sable)	17/30	0/31	0/9	1/8
Réponse 2 (air)	1/30	0/31	1/9	7/8
Réponse 3 (identique)	9/30	31/31	7/9	0/8
Pas de réponse	3/30	0/31	1/9	0/8

Tableau 5b : **Évolution des réponses à la question 5 (cas b) en fonction des différents stades d'enseignement**

En comparant les tableaux 5a et 5b, il apparaît que seules les réponses des élèves de troisième changent en fonction de la direction. De plus, on trouve un certain nombre de justifications faisant appel à la gravitation. Ce qui nous conforte dans l'idée que la notion selon laquelle toutes les directions sont équivalentes en apesanteur, n'est pas encore assimilée. En revanche cette notion nous semble bien maîtrisée par les classes de terminale et de DEUG (on retrouve les mêmes réponses dans les deux cas).

Dans cette situation il est clair que le concept de masse inerte, aussi bien verticalement qu'horizontalement, n'est pas mobilisé par les élèves. Il est rare de rencontrer, dans un questionnaire, un nombre aussi unanime de réponses non conformes du point de vue de la physique. Nous pensons que cela vaudrait la peine de faire une étude plus fine sur ce sujet notamment de creuser la signification du mot apesanteur, les propriétés que lui attribuent les élèves, ainsi que l'enseignement traitant de ce sujet.

CONCLUSION

En nous appuyant sur l'approche historique du concept de masse, ainsi que sur une analyse partielle des programmes, nous avons formulé des hypothèses de recherche, que nous avons testées, à l'aide d'un questionnaire, sur une population allant de la troisième au DEUG en passant par les enseignants. Nous tenons à préciser que le nombre de personnes étudiées ne peut constituer un échantillon représentatif, et les résultats que nous avons obtenus se limitent aux situations que nous avons proposées dans le

questionnaire. Cette étude montre certains types de raisonnement qu'utilisent les élèves dans les situations proposées.

Nous avons vu que, dans la « situation des caddies », mettant en jeu les frottements et la masse inerte, la majorité des élèves mobilise les frottements et que très peu utilisent le concept de masse inerte. De plus, si l'on supprime les frottements (« situation des patineurs sur glace »), la majorité des élèves raisonne comme si la masse (inerte) n'intervenait pas, ce qui nous amène à penser que, pour les élèves, seuls les frottements jouent un rôle dans ces situations. Ceci nous conforte dans l'idée que, dans ces deux situations, **la force de frottement peut être un obstacle à l'apprentissage du concept de masse inerte pour les élèves**, car elle est présentée comme la seule résistance à la mise en mouvement.

Dans la « situation des patineurs sur glace », nous avons vu apparaître le raisonnement selon lequel plus un objet est lourd et plus il est difficile à mettre en mouvement. Parce que l'attraction terrestre empêche le mouvement, nous avons baptisé ce raisonnement : **la conception d'attraction terrestre**. Il illustre assez bien le fait que **le concept de masse gravitationnelle est utilisé à la place de celui de masse inerte**. Cependant nous l'avons trouvé chez trop peu d'élèves pour que cette hypothèse soit confirmée dans cette situation.

Dans la situation « balle de tennis versus boule de pétanque », il apparaît que, pour la majorité des élèves de troisième et de terminale, la boule de pétanque va arriver en premier, en revanche la grande majorité des élèves de DEUG prédit que les deux boules arriveront en même temps. Ceci nous permet d'inférer que, pour la plupart des élèves de troisième et de terminale, **la vitesse en chute libre est fonction du poids**.

Nous avons aussi constaté qu'il était difficile, pour les élèves, de formuler des explications dans les questions faisant intervenir le concept de masse gravitationnelle et celui de masse inerte. De plus, nous avons pu voir que l'inertie n'était jamais mobilisée ni dans la direction verticale pour la « situation balle de tennis versus boule de pétanque », ni dans la « situation en apesanteur », et qu'elle était très peu mobilisée, sauf pour les élèves de terminale, dans la direction horizontale. Ceci nous conforte dans l'idée, que, pour ces situations, **le concept de masse inerte n'est perçu, même de manière erronée, qu'horizontalement par les élèves**.

À travers les situations mettant en jeu simultanément plusieurs concepts, la quasi-totalité des élèves n'utilise qu'un seul concept pour les interpréter. Dans ces situations, les élèves mobilisent très peu le concept de masse inerte horizontalement et jamais verticalement. De plus, ce concept est très peu mobilisé par les enseignants.

Dans les situations en apesanteur, où seul ce concept intervient pour la physique, il n'est mobilisé ni par les élèves de terminale ni par la quasi-totalité des élèves de DEUG, ce qui, pour cette situation, confirme que **le concept de masse inerte n'est pas mobilisé par les élèves**. En revanche il est **mobilisé** par presque **tous les enseignants**. Ce résultat mérite d'être creusé : comment ce sujet est-il introduit dans l'enseignement ? Quelle signification les élèves donnent-ils au mot apesanteur et quelles propriétés lui attribuent-ils ?

Enfin, les élèves peuvent concevoir l'inertie comme une force d'élan. En effet, nous avons vu apparaître, à plusieurs reprises, l'idée que le poids ou la masse d'un objet entraîne les objets et que plus ils seront lourds et plus ils iront vite. Nous avons baptisé ce raisonnement : **la conception d'élan**. Cette conception rejoint l'idée pré-galiléenne d'*impetus*, retrouvée chez plusieurs élèves par Viennot (1978, 1996), où le mouvement est interprété à l'aide « d'un capital de force » qui entraîne les objets. Cependant, la conception d'élan n'associe ce « capital de force » qu'à des idées concernant le poids ou à la masse des objets ; et les élèves ne considèrent l'influence de la masse qu'après la mise en mouvement d'un objet. En effet, ils ne tiennent compte ni du moment où il faut mettre l'objet en mouvement, ni du rôle que joue la masse dans la mise en mouvement de cet objet.

Ce travail a mis en évidence un certain nombre de difficultés susceptibles d'apparaître lors de l'apprentissage du concept de masse. Il reste néanmoins à bâtir un enseignement tenant compte de ces difficultés et à tester cet enseignement, cela fera probablement partie d'une recherche future.

NOTES

1 Le sigle DEUG signifie Diplôme d'Études Universitaires Générales.

2 MIAS signifie Mathématiques, Informatique et Applications aux Sciences.

BIBLIOGRAPHIE

AUBERT F. (1994). *Contribution à la distinction des concepts de masse et de poids en classe de troisième*. Mémoire de DEA, Université de Montpellier 2.

BACHELARD G. (1937). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.

BALACHEFF N. (1999). Conception, Connaissance et Concept. *DidaTech*, n° 157, pp. 219-244.

- BROUSSEAU G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- LECARDONNEL J.-P., ANFOSSO F., BOULAND A., CAUWET J., LARCHER C., MYRAMOND M. & PAUL J.-C. (1998). *Physique Première S*. Paris, Bordas.
- LECARDONNEL J.-P., ANFOSSO F., BOULAND A., CAUWET J., LARCHER C., MYRAMOND M. & PAUL J.-C. (1998). *Physique Terminale S*. Paris, Bordas.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1998). *Numéro 10. Programmes de Troisième*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1998). *Numéro 10. Programmes des lycées, Physique-chimie classe de Première*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1998). *Numéro 10. Programmes des lycées, Physique-chimie classe de Terminale*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- CONFREY J. (1986), « *Misconceptions* » across subject matters : changing the course from a constructivism perspective. In the annual meeting of the American Educational Research Association.
- DESCARTES R. (1641). *Méditation métaphysique*. Paris, Vrin.
- DOMÉNECH A., CASASUS E. & DOMÉNECH M. (1993). The classical concept of mass : theoretical difficulties and students' definitions. *International journal of science education*, vol. 15, n° 2, pp. 163-173.
- DUIT R. (1994). *Conceptual change approaches in science education*. Paper presented at the Symposium on Conceptual Change, Friedrich Schiller University of Jena, Germany.
- EINSTEIN A. & INFELD L. (1983). *L'évolution des idées en physique*. Paris, Flammarion.
- GALILI I. (1993). Weight and gravity : teachers' ambiguity and students' confusion about the concepts. *International journal of science education*, vol. 15, n° 2, pp. 149-162.
- GUILLAUD J.-C. (1998). *Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième*. Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble 1, Laboratoire Interdisciplinaire de Didactique des Sciences Expérimentales.
- HALBWACHS F. & BOVET M. (1980). Le poids et la masse en classe de sixième. *Revue Française de Pédagogie*, n° 53, pp. 4-18.
- HALBWACHS F. & BOVET M. (1983). Sur le poids et la masse, la statique et la dynamique. *Revue Française de Pédagogie*, n° 63, pp. 119-127.
- HEURTAUX J. (1978). À propos de « masse inerte et masse de gravité ». *Revue Française de Pédagogie*, n° 45, pp. 37-47.
- HEWSON P.W. & LEMBERGER J. (1999). Status : the hallmark of conceptual learning An Example from Learning. *Invited paper for presentation at a Seminar to celebrate Rosalind Driver's contribution to research in science education, York*, pp. 1-24.
- LANDAU & LIFCHITZ (1975). *Physique théorique, mécanique*. Moscou, MIR.
- LECOURT D. (1999). *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris, PUF.
- MACH E. (1883). *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*. Paris, Éditions Jacques Gabay.
- MERLEAU-PONTY J. (1974). *Leçons sur la genèse des théories physiques*. Paris, Vrin.
- MULLET E. & GERVAIS H. (1990). Distinction between the concepts of weight and mass in high school students. *International journal of science education*, vol. 12, n° 2, pp. 217-226.
- NEWTON I. (1687). *Principia Mathématique*. Paris, Blanchard, 1966.

- NOVAK J.D. (1983). *Misconceptions in Science and Mathematics*.
[http : //www2.usc.edu/mlgr.html](http://www2.usc.edu/mlgr.html), Ithaca : Cornell University.
- PIAGET J. (1969). *Psychologie et pédagogie*. Paris, Denoël.
- REIF F. (1995). *Understanding basic mechanics*. Paris, Éditions Wiley.
- ROBARDET G. (1995). Situations-problèmes et modélisation : l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique. *Didaskalia*, n° 7, pp. 129-143.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris, PUF.
- VIENNOT L. (1978). Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. *Revue Française de Pédagogie*, n° 45, pp. 16-24.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. Bruxelles, de Boeck.
- VYGOTSKI L. S. (1985). *Pensée et langage*. Paris, Terrains / Éditions sociales.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Jean-Claude Guillaud et Guy Robardet pour avoir encadré ce travail de DEA, qui s'est déroulé au sein du Laboratoire Interdisciplinaire de Didactique des Sciences Expérimentales à Grenoble, ainsi que Bernadette Pateyron pour la pertinence de ses remarques, son soutien moral et orthographique.

Cet article a été reçu le 30 octobre 2001 et accepté le 15 décembre 2001.

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

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

André LAUGIER, Alain DUMON

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

Résumé

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

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

Abstract

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

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

INTRODUCTION

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

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

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

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

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

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

1. L'ÉTUDE ÉPISTÉMOLOGIQUE DU SAVOIR

1.1. L'activité de modélisation

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

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

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

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

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

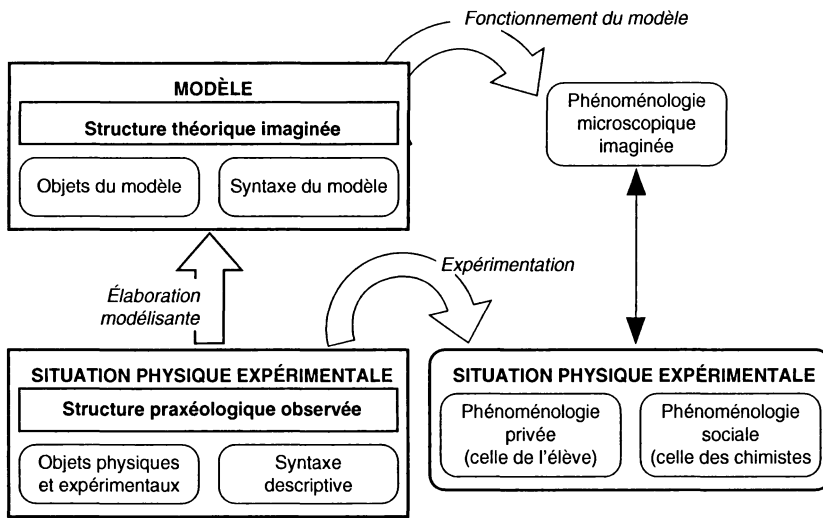


Figure 1 : Schéma de l'activité de modélisation en sciences utilisé dans nos travaux

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

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

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

1.2. L'étude du savoir de référence

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

Un point de vue mécaniste, dont Platon a été un des principaux représentants, va tenter de mathématiser la nature, afin de réduire la diversité des objets du monde sensible à une diversité de forme et de taille entre des particules constituantes. Cette problématique, partagée par les atomistes, va se retrouver, récurrente pendant des siècles, chez tous ceux qui considèrent que la chimie est avant tout une science de la matière, au sens de branche de la physique mathématique qui met l'accent sur la phénoménologie microscopique. L'épistémologie de cette science de la matière, présuppose que les mystères du Monde et les transformations de la matière doivent pouvoir s'expliquer « *en termes d'une physique résolument et strictement mécaniste, dépourvue de toute finalité, ne mettant en jeu que des principes matériels et leurs interactions* » (Pullman, 1995, p. 65).

Un point de vue substantialiste, défendu par Aristote, va, dès le IV^e siècle avant J.-C., récuser le mécanisme physico-mathématique de la science de la matière, et privilégier la phénoménologie sensible, telle qu'elle est perçue au niveau macroscopique. Aristote dote les qualités d'un substrat matériel ce qui permet d'envisager leur échange dans les transformations chimiques. En échangeant des propriétés il est possible de changer de substance (transmutation). Dans ce cadre, la chimie doit être une science des réactions dont le seul objet permis est l'étude de la phénoménologie macroscopique.

L'étude conduite révèle que les divergences entre ces deux points de vue s'enracinent dans des convictions dont la nature est avant tout épistémologique, philosophique, voire religieuse. De ce fait, ces deux cadres théoriques ne seront pas seulement concurrents, ils seront exclusifs l'un de l'autre sur de nombreux points (pluralité des mondes, rôle de Dieu, existence du vide, etc.) L'histoire de la construction d'une représentation de la transformation chimique est une compétition et une oscillation permanente entre ces deux paradigmes, chacun prenant tour à tour le dessus en fonction de

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

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

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

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

L'obstacle perceptif, dû aux « ravages de l'attribution directe à la substance des données immédiates de l'expérience sensible » (Bachelard, 1938, p. 104). Les chimistes ne pourront le dépasser qu'en refusant de se laisser perturber par les phénomènes sensibles qui masquent la transformation chimique. Ils devront percevoir ce qui se conserve derrière l'observation de ce qui change (dans l'interprétation de la combustion ce qui est important c'est la consommation d'oxygène ce n'est pas la flamme). Sous leur forme la plus triviale ces obstacles conduiront les chimistes à l'impasse de la transmutation puis à celle du phlogistique.

L'obstacle positiviste : pour le dépasser les chimistes devront abandonner l'idée que l'expérience est la seule activité permise au chimiste. Suzanne Bachelard pense même que les chimistes de la science des réactions ont dû vaincre « l'illusion phénoménologique de pouvoir bâtir la science sans le secours d'abstractions » (Bachelard, 1979, p. 13). En ce qui nous concerne, cette affirmation sera tempérée par le qualificatif de modélisante accolé à l'idée d'abstraction.

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

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

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

L'obstacle réaliste : les chimistes ne le franchiront qu'en renonçant à l'idée qu'il est possible d'accéder à une description de la réalité au niveau microscopique. La tâche du chimiste est d'imaginer un modèle de ce réel, qui « *représente non pas les propriétés du réel, mais seulement certaines propriétés* » (Bachelard, 1979, p. 9).

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

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

2.1. La méthodologie

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

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

Le déroulement prévu pour la séquence était le suivant :

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

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

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

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

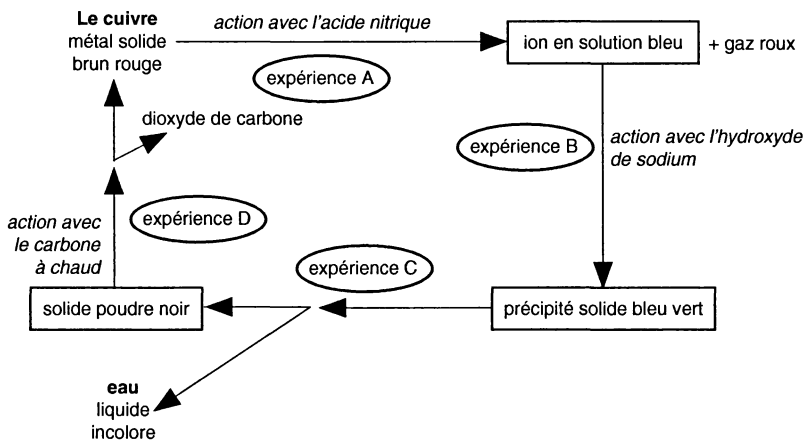


Figure 2 : Schématisation du « cycle du cuivre »

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

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

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

2.2. L'analyse de la séance

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

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

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

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

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

Le questionnement de ces élèves porte à la fois sur :

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

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

2.3. Analyse de la phase expérimentale

2.3.2. Par rapport au langage employé et au symbolisme chimique

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

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

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

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

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

2.3.2. Par rapport à la référence à la pratique antérieure

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

« – *Le produit était pas bien sec.*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

« *On nous demande de raconter ce qui se passe, mais on ne voit pas ce qui se passe. On voit des couleurs, on sent, mais on ne voit rien.* »

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

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

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

Une autre manifestation de l'obstacle mécaniste

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

2.4. Analyse de la discussion après la séance de TP

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

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

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

Une idée (très) générale de conservation

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

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

– *C'est Lavoisier qui a dit ça.*

– *Il a dit aussi tout se transforme. »*

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

Une confusion corps pur composé / mélange

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

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

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

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

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

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

Un obstacle institué par le langage chimique

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

L'enseignante : « – *Et après ?*

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

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

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

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

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

– *De l'oxyde de cuivre. »*

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

3. CONCLUSION

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

Au niveau macroscopique, l'obstacle perceptif

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

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

Au niveau microscopique, l'obstacle mécaniste

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

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

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

Des avancées permises par le débat dans la classe

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

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

Des lacunes dans les connaissances, sources de difficultés supplémentaires

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

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

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

BIBLIOGRAPHIE

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

- EINSTEIN A. & INFELD L. (1983). *L'évolution des idées en physique*. Paris, Flammarion.
- FILLON P. (1997). Des élèves dans un labyrinthe d'obstacles. *Aster*, n° 25, pp. 113-141.
- HALBWACHS F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. In M. Bunge, F. Halbwachs, Th. Kuhn, J. Piaget & L. Rosenfeld (Éds), *Les théories de la causalité*. Paris, PUF, pp. 39-111.
- HALBWACHS F. (1973). L'histoire de l'explication en physique. In *L'explication dans les sciences*. Paris, Flammarion, pp. 77-81.
- LAUGIER A. (1998). *Représentation de la réaction chimique dans les registres macroscopique et microscopique. Contribution au repérage des obstacles épistémologiques. Un exemple en classe de seconde*. Thèse, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000a). Histoire des sciences et modélisation de la transformation chimique en classe de seconde. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 94, pp. 1261-1284.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2000b). Practical works and representation of chemical reaction in the macroscopic and microscopic levels : a study with fourth form students. *Chemical Education Research And Practice In Europe*, vol. 1, n° 1, pp. 61-75.
- LAUGIER A. & DUMON A. (2001). D'Aristote à Mendéléév ; 2000 ans de symbolisme pour représenter la matière et ses transformations. *L'Actualité Chimique*, mars, pp. 38-50.
- LÉMERY N. (1757). *Cours de Chymie*. Nouvelle édition revue par M. Baron, Paris, L.-C. d'Houry, fils.
- MARTINAND J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, n° 2, pp. 89-99.
- NOVICK S. & NUSSBAUM J. (1978). Junior on Highschool Pupil's understanding of the particulate nature of matter. And an interview study. *Science Education*, n° 62, pp. 273-281.
- OSTWALD W. (1921). *L'évolution d'une science : la Chimie*. Traduction française de l'édition allemande de 1909, Paris, Flammarion.
- PFUNDT H. (1981). The atom – the final link in the division process or the first building block ? *Chemical Didactica*, n° 7, pp. 75-94.
- PULLMAN B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris, Fayard.
- RENSTRÖM L., ANDERSSON B. & MARTON F. (1990). Student's Conceptions of Matter. *Journal of Educational Psychology*, vol. 82, n° 3, pp. 555-569
- SAVOY L.-G. & STEEPLES B. (1994). Concept hierachies in the balancing of chemical equations. *Science Education Notes*, n° 75, pp. 97-103.
- SÉRÉ M.-G. (1985). « *Les conceptions de l'état gazeux chez les enfants de 11 à 13 ans* ». Thèse de doctorat d'état, Université Paris VII.
- SOLOMONIDOU C. (1991). *Comment se représenter les substances et leurs interactions ?* Thèse, Université Paris VII.
- STAVRIDOU H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves*. Thèse, Université Paris VII.
- THÉNARD L.-J. (1834). *Traité de Chimie élémentaire, théorique et pratique* (6^é édition). Paris, Crochard.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des mathématiques*, vol. 10, n° 23, pp. 133-170.

ANNEXE 1 : L'ANALYSE A PRIORI

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

ANNEXE 2 : LES FICHES FOURNIES AUX ÉLÈVES

Expérience A

Les produits utilisés :

des copeaux de cuivre
une solution d'acide nitrique

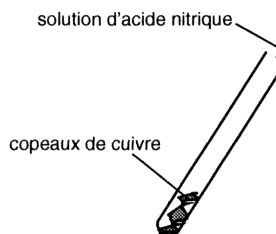
Le matériel :

un tube à essais
une pince

L'expérience

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

Remplir la fiche d'observation



Expérience B

Les produits utilisés :

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

Le matériel :

un tube à essais

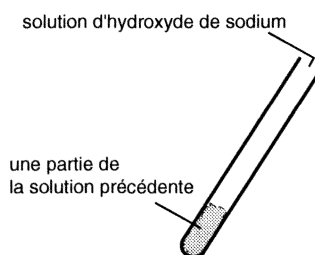
L'expérience :

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

Ne pas agiter.

Remplir la fiche d'observation

Comment peut-on récupérer le précipité qui se forme ?



Expérience C

Les produits utilisés :

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

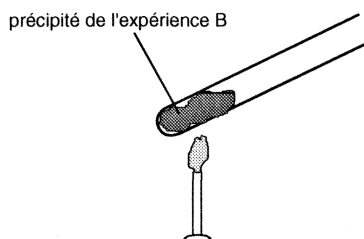
Le matériel :

un bec bunsen
une pince en bois
un tube à essais

L'expérience :

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

Remplir la fiche d'observation



Expérience D

Les produits utilisés

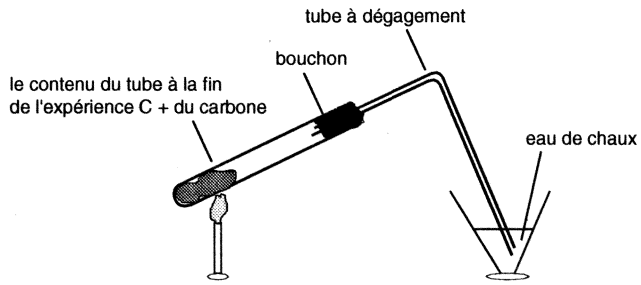
le contenu du tube à la fin de l'expérience C
du carbone en poudre
de l'eau de chaux

Le matériel :

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

L'expérience :

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



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

Expérience A

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

Expérience B

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

Expérience C

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

Expérience D

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

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

**De l'idéal didactique
aux déroulements réels en classe de
mathématiques : le didactiquement
correct, un enjeu de la formation
des (futurs) enseignants (en collège
et lycée)**

**From an idealistic didactical viewpoint
to what really happens in classroom :
the didactically correct as a challenge
in (future secondary school) teachers'
training**

Aline ROBERT

Équipe Didirem, IUFM de Versailles
45 avenue des États-Unis
78000 Versailles, France.

Résumé

Dans cet article, nous indiquons quelques exemples de propositions de séances de classe, tirées de recherches en didactique des mathématiques,

qui s'avèrent très difficiles à mettre en œuvre. Nous précisons certaines de ces difficultés, repérées notamment dans des travaux sur les pratiques des professeurs d'école. Nous développons ainsi tous les obstacles qui peuvent se présenter pour un enseignant proposant un problème pour introduire une nouvelle notion. Nous terminons par des perspectives de recherches, sur les pratiques des enseignants et sur leur formation.

Mots clés : *didactique des mathématiques, pratiques d'enseignants, formation, problèmes d'introduction, déroulements de la classe.*

Abstract

In this paper we give some examples of teaching sequences issued from our research work in the field of « didactique » of mathematics, which came out being very difficult to be implemented. We specify some of the difficulties we identified especially in works about teachers' practices in primary school. Thus we develop all obstacles a teacher proposing a problem in order to introduce a new notion to her students may encounter. As a conclusion, we give some perspectives for research works on teachers' practices and training.

Key words : *« didactique » of mathematics, teachers' practices, teachers' training, introductory problems, classroom.*

INTRODUCTION

Une vieille idée, habillée de neuf – la nécessaire transposition entre recherches et pratiques effectives, notamment en formation

Un certain nombre de chercheurs, Huberman & Gather-Thuler (1991) par exemple, ont attiré l'attention depuis longtemps sur le fait que les résultats des recherches en sciences de l'éducation ne peuvent être implantés tels quels, même si les chercheurs ont travaillé avec les praticiens. Les situations expérimentales ne sont pas toujours transmissibles, ni même transposables.

Or, dans la situation actuelle des lycées et collèges, dans la mesure où la simple reproduction des comportements des enseignants de mathématiques des générations précédentes n'est souvent plus suffisante, on est amené, en formation d'enseignants ou de formateurs, à essayer d'utiliser d'autres ressources, permettant de renouveler les pratiques. Et les

recherches en didactique peuvent en constituer une des sources importantes.

Mais, comme pour ce qui concernait les recherches en sciences de l'éducation, des obstacles nombreux se dressent contre cette tentative. Ces obstacles tiennent en partie à la réalité même du travail de l'enseignant. Tout n'est pas possible dans la pratique ! Pour résumer et nous limiter à l'essentiel, nous dirons qu'il peut exister des contradictions entre le métier d'enseignant et des exigences d'apprentissage (envisagées du strict point de vue didactique). La transposition qui s'impose alors, entre les recherches et les pratiques en classe, doit aussi être abordée (à notre avis) par des chercheurs, ce sont des véritables problèmes théoriques qui se posent ainsi. Mais ces obstacles tiennent aussi à la formation et à la manière dont sont transmises les ressources didactiques, et là les formateurs ont un rôle incontournable dans les adaptations, plus individuelles, qui doivent avoir lieu.

Ainsi il y a tout un travail à faire en amont et pendant les formations, de plusieurs parts, pour que restent en classe des éléments substantiels de cet idéal didactique, définissant ce que nous avons appelé le « didactiquement correct ».

C'est ce que nous allons développer dans cet article.

Nous allons d'abord donner quelques exemples de l'idéal didactique, puis expliquer ce qui se passe en classe et lister les obstacles qui se présentent et qui s'opposent à la poursuite de ces séances « idéales ». Cela nous amènera à évoquer le travail nécessaire pour préciser des séquences qui pourraient être menées en classe et qui garderaient l'essentiel de leur qualité didactique, ce que nous appellerons ici le « didactiquement correct ». Nous terminerons en évoquant l'obligatoire adaptation à la formation.

Nous serons amenées à évoquer de nombreux travaux de recherches déjà effectués, d'où des références bibliographiques importantes pour notre propos, dont une partie est une réflexion.

1. QUELQUES EXEMPLES « GÉNÉRIQUES » DE L'IDÉAL DIDACTIQUE : PROBLÈMES D'INTRODUCTION, TÂCHES MENANT À DES ADAPTATIONS DES NOTIONS ET PROBLÈMES TRANSVERSAUX

Une lecture « opérationnelle » des recherches en didactique des mathématiques apporte plusieurs pistes pour « enseigner autrement », même si ces recherches n'ont pas toujours pour objectif premier de

contribuer à transformer l'enseignement. Rappelons que les ingénieries produites dans ces recherches permettent de diagnostiquer les effets de situations bien précisées. Nous allons évoquer très schématiquement des exemples, en renvoyant à la bibliographie pour un exposé détaillé de séquences effectivement produites.

1.1. Les problèmes d'introduction

Un des moments particulièrement travaillés en didactique des mathématiques est celui de l'introduction des nouvelles notions.

Plusieurs théories se présentent. Que ce soit par exemple dans la dialectique outil/objet (Douady, 1986) ou dans la Théorie des situations (Brousseau, 1998), on retrouve l'idée d'une spécificité du travail à mener en classe pour essayer de donner rapidement du sens aux nouveaux objets à enseigner (ou à certains d'entre eux en tout cas).

Dans les deux cas, même si les justifications théoriques et les principes de conceptions diffèrent, on peut présenter rapidement un schéma commun à suivre en classe, en plusieurs étapes.

Il s'agit en effet de concevoir un problème (une situation problématique) et de fabriquer un énoncé qu'on donnera à chercher en classe, avant le cours proprement dit sur la notion visée (objet) et les exercices plus classiques.

Ce travail de résolution met en jeu « quelque chose » de nouveau pour les élèves, il doit cependant leur être accessible. Ainsi le travail préliminaire d'élaboration du problème est très important, souvent difficile ; et même si certains problèmes sont proposés dans les écrits didactiques, ils font souvent partie de séquences longues, nécessitant des prérequis exigeants, et qui ne prennent sens que dans leur globalité. Dans le premier cadrage théorique cité par exemple, c'est grâce à un jeu sur plusieurs cadres d'intervention de la notion mathématique visée que les élèves peuvent aborder le problème ; il est donc nécessaire qu'ils aient déjà quelques connaissances sur la notion dans un des cadres mathématiques au moins, pour s'appuyer sur le travail dans ce cadre et résoudre dans un autre. Par exemple, un système de deux équations du premier degré à deux inconnues peut être résolu dans le cadre analytique mais on peut penser que l'interprétation graphique (travail dans le cadre graphique) peut contribuer à donner du sens aux résultats analytiques.

L'enseignant doit donc laisser les élèves s'investir dans la recherche du problème, ce qui suppose un texte bien adapté et souvent un dispositif particulier (travail en petits groupes par exemple). Le professeur doit résister

aux pressions des élèves en les relançant sans leur donner d'indications, sans modifier leurs activités.

Il doit ensuite (faire) faire une synthèse du travail réalisé (note 1) et s'appuyer sur cette synthèse pour exposer lui-même les connaissances décontextualisées à retenir (note 2). Une part d'improvisation est nécessaire, puisqu'on ne peut pas prévoir exactement ce que les élèves vont produire.

Un travail de réinvestissement des nouvelles connaissances est ensuite organisé, souvent seulement évoqué dans les projets de séquences didactiques qui existent.

1.2. Réinvestissement et problèmes transversaux : travail sur différentes adaptations des notions visées à mettre en fonctionnement

Dans certaines recherches de didactique, une place importante est aussi consacrée au réinvestissement des notions. Il doit permettre des mises en fonctionnement variées, et, plus généralement, le travail transversal sur des énoncés portant sur plusieurs notions, pour lesquels les élèves peuvent (ou doivent) trouver seuls les connaissances à utiliser. Les activités ainsi provoquées doivent contribuer, à terme, à l'organisation des connaissances entre elles – ce qui rentre aussi dans la construction du sens. C'est du moins l'hypothèse qui est faite par les auteurs de ce type de séances.

Parmi les tâches, certaines, proposées aux élèves plutôt au début des chapitres concernés, les amènent à travailler les mises en fonctionnement des éléments du cours (théorèmes, propriétés, définitions, méthodes, raisonnements, etc.) Ce peut être un simple travail de remplacement des données générales par des données particulières, de vérification d'hypothèses, ou une reconnaissance de ce qui est à appliquer et/ou de la manière de le faire. Des adaptations variées peuvent intervenir, dont des changements de domaines de travail, jeux de cadres ou de registres, dont l'importance pour les apprentissages a été amplement indiquée en didactique (Douady, 1986 ; Duval, 2001). On réserve le mot registres aux différents modes d'écritures utilisés pour traduire une notion mathématique (par exemple un développement décimal peut être écrit comme un nombre à virgule ou comme une somme de fractions de dénominateur des puissances de 10, et les traitements algébriques peuvent différer d'une écriture à l'autre).

Peuvent suivre des problèmes transversaux, où plusieurs chapitres sont mobilisés, sans indication ni indices des connaissances à mobiliser. Ces problèmes transversaux permettent aux élèves de s'exercer à trouver ce qu'il faut mettre en fonctionnement pour résoudre le problème ; ils amènent aussi

les élèves à mélanger des utilisations de connaissances « d'âge différent » – anciennes et nouvelles.

Comme pour les problèmes d'introduction, un enjeu important au succès de ces activités tient au fait que les élèves travaillent seuls (en petits groupes par exemple), et à ce que l'enseignant réussit à respecter totalement ces phases dites « a-didactiques (note 3) », sans donner d'indication consistante notamment.

2. CE QUI SE PASSE EN CLASSE : DE NOMBREUX OBSTACLES ENTRE L'IDÉAL ET LE POSSIBLE

Plusieurs recherches ont montré que peu de séquences didactiques, pourtant tout à fait séduisantes sur le plan didactique et testées positivement, sont effectivement utilisées en classe (Bolon, 1996 ; Roditi, 2001).

L'évaluation des formations des Professeurs d'École a aussi indiqué que beaucoup d'entre eux renoncent vite à mettre en œuvre ce qu'ils ont pourtant appris en première année de formation et défendu théoriquement pour passer leur concours.

Qu'en est-il ?

2.1. Des généralités sur les activités préconisées en didactique : davantage de travail de préparation et de tension pendant les séances, beaucoup de temps passé sans résultats immédiats

Les activités présentées ci-dessus (problèmes d'introduction ou transversaux par exemple) demandent toujours aux enseignants un double travail, très exigeant : une préparation précise, souvent avec une part de mise au point personnelle des ressources habituelles, une anticipation de ce qui est possible pour les élèves et une vigilance et une tension permanentes pendant le déroulement des séances. Il s'agit en effet de respecter au maximum le travail des élèves tel qu'il a été prévu, tout en improvisant et en s'adaptant aux réalités et aux contraintes de la classe.

De plus, il n'est pas sûr que des résultats immédiats en termes d'apprentissage (et de notes) se remarquent. Même si souvent les élèves sont très satisfaits, notamment du travail en petits groupes, comme c'est l'ensemble du processus, répété, qui intervient, cela prend du temps (temps de chaque séance de ce type, toujours très longue, temps d'apprentissage).

De plus les bénéfiques ne sont pas toujours évaluables sur des tâches données en contrôle classique. Et la conception d'autres moyens d'évaluation demande beaucoup de travail et risque d'être peu reconnue par les autres enseignants.

On conçoit déjà que les enseignants ne peuvent pas se permettre d'user toute leur énergie constamment ainsi.

Nous allons maintenant préciser les difficultés que nous venons d'esquisser en passant successivement en revue les dimensions (non indépendantes) que nous avons mises au point pour analyser les déterminants des pratiques des enseignants en classe (Robert & Rogalski, 2002) : institutionnelle, sociale, personnelle. C'est notre manière de tenir compte et d'aborder la complexité de la classe.

2.2. Des obstacles au respect de l'idéal didactique liés à l'institution : le temps, les programmes, des ressources limitées et des notions de natures variées

Très généralement le premier obstacle, évoqué très unanimement par les enseignants, pour refuser des activités d'introduction ou transversales est le temps, et la pression très forte des programmes. En effet, les enseignants privilégient souvent l'avancée dans des programmes, jugés très longs, et n'ont pas le temps ni de laisser les élèves patauger dans un problème d'introduction, ni d'entretenir les connaissances déjà travaillées. De fait, toutes les enquêtes que nous connaissons indiquent que les professeurs finissent juste les programmes, et encore... De plus tous les travaux analysant des séquences d'introduction ou transversales montrent effectivement que le temps prévu par des enseignants expérimentés et ayant l'habitude de ce type de déroulement est toujours dépassé...

Dans ces conditions, il faudrait, au mieux, choisir, en alternant, les modes d'enseignement, et c'est une difficulté supplémentaire ! Car si on ne respecte pas une certaine logique, un peu longue, des activités d'introduction, on peut en perdre tout le bénéfice. Sinon, il faudrait décider de ne pas finir telle ou telle partie du programme, ce qui représente un grand risque, y compris social (vis-à-vis des collègues, des parents, des examens). Ou faire le pari insensé, qu'en « perdant du temps » sur la recherche en classe, on en gagne sur autre chose...

On voit là des décisions très lourdes pour un enseignant.

Par ailleurs, il n'y a de ressources disponibles que sur un nombre limité de notions, et dans des documents souvent mal diffusés (Roditi, 2001). La plupart des manuels scolaires se ressemblent, et ne propose que peu ou

pas de problèmes directement utilisables. Les activités de début de chapitre ne sont que rarement de véritables problèmes d'introduction, comme cela a déjà été montré (Robert, 1998 ; Robert & Rogalski, 2002). Souvent les séquences disponibles ne s'inscrivent pas dans les programmes tels qu'ils sont, ou demandent des connaissances sur lesquelles les enseignants ne sont pas entièrement à l'aise.

De plus, toutes les notions à introduire sur une année scolaire ne le sont pas toujours comme évoqué génériquement. Des travaux [comme la distinction de différents types de notions (Robert, 1998)] ont suggéré que certaines notions, porteuses d'un nouveau formalisme unifiant des démarches antérieures, sont, de ce fait, trop généralisatrices et, du coup, trop éloignées de ce que les élèves ont déjà fait, pour être mises en fonctionnement avant le cours, même partiellement. On peut penser que l'algèbre du collège, avec l'utilisation des inconnues, relève (aussi) de cette analyse. Mais cette caractérisation des notions reste relative à un programme donné, à un ordre donné, quelquefois à une classe donnée, et ne peut être listé à l'avance, une fois pour toutes.

2.3. Des obstacles liés à ce que les déroulements en classe sont très contraints socialement

On pourrait croire que l'enseignant, lorsqu'il est entré dans sa classe avec ses élèves et en a fermé la porte, y est « libre ». Il n'en est rien, et de nombreux travaux commencent à le montrer (Robert & Rogalski, 2002 ; Clot, 2000, 2001).

On peut noter plusieurs aspects dans ce manque de liberté que nous définissons en termes de contraintes sociales.

À l'extérieur de la classe, dans l'établissement scolaire, se créent des habitudes finalement très contraignantes, qu'il est difficile de transgresser seul. Tout se sait dans un collège ou un lycée, et si des collègues travaillent différemment des autres, ils seront soumis à une certaine interrogation, voire suspicion. De la part des élèves, surtout si leur enseignement est plus difficile et plus lent, des autres collègues, des parents, de l'administration... Par ailleurs la collaboration entre enseignants de mathématiques a fait des progrès certains ces dernières années mais elle porte plutôt sur les contenus (énoncés de contrôles notamment) que sur les formes d'enseignement.

De telles situations sont souvent vécues lors de l'organisation du travail en petits groupes dans une classe – travail vite jugé trop bruyant, même si d'autres sources de bruit analogue sont tolérées (on peut penser alors à un alibi).

Dans la classe aussi jouent de nombreuses contraintes sociales qui restreignent la liberté de l'enseignant.

Les élèves, d'abord, ont des attentes et des habitudes. L'enseignant est là pour enseigner (montrer), les élèves sont là au mieux pour écouter et pour appliquer – pas pour chercher. Ceci est évidemment renforcé par le fait que les élèves de la classe d'à côté ne cherchent pas eux, et « qu'on leur donne plein d'exercices pendant ce temps-là »... !

De plus il faut que le temps didactique (c'est-à-dire le cours) avance, de leur point de vue d'élèves. Qu'il y ait du nouveau. Et que suffisamment d'élèves réussissent suffisamment sur cette nouveauté. De nombreux travaux anthropologiques ont insisté là-dessus. Dans sa thèse Roditi (2001) a montré plus précisément encore que fonctionnent en classe des sortes de principes qui ont force de loi : par exemple, le principe de clôture : « quelque chose » doit pouvoir être identifié comme ayant été obtenu dans une heure de travail.

Il se trouve que le déroulement des séquences didactiques s'inscrit mal dans ces principes, car la recherche « floue » prend du temps et la réussite n'est pas toujours immédiate...

Enfin, des évaluations appropriées à un travail des élèves différent (comme celui que nous évoquons) sont difficiles à concevoir et encore plus à mettre en œuvre, notamment faute de reconnaissance institutionnelle : même donner une note à un travail à deux peut engendrer une suspicion.

2.4. Des obstacles liés à l'exercice personnel de l'enseignant pour mener à bien des activités didactiquement correctes pour les élèves

Plusieurs aspects rendent l'application de séquences, comme celles que nous évoquons au début, très difficiles pour les enseignants.

2.4.1. Une évaluation encore à faire

La preuve de la supériorité des enseignements qui utilisent des séquences didactiques n'est pas faite, ni la preuve du contraire d'ailleurs. Cela entraîne un manque de conviction : pourquoi aller chercher de nouvelles difficultés dans une profession déjà difficile ? Du coup il y a un manque de modèles à imiter, ou au moins à étudier.

2.4.2. La nécessité d'adaptations selon les classes

Il y a certainement des classes où il n'est pas question de faire travailler les élèves seuls – ça serait prendre un trop gros risque de chahut. Quand l'enseignant ne peut plus écrire au tableau pour ne pas avoir à se retourner, il ne va pas faire travailler les élèves en petits groupes.

Il y a d'autres classes, très « bourgeoises », où la concurrence entre les élèves rend inversement aussi difficile ce type de travail collectif.

Mais à partir de quand peut-on essayer ? Dans quels types de classes ?

2.4.3. Des déroulements sous tension

Certes la préparation des séances préconisées dans des travaux didactiques peut être plus importante que celles de séances ordinaires, à partir de manuels par exemple, mais au bout de quelques années on peut penser que ça serait possible pour beaucoup d'enseignants, surtout après quelques années d'expérience. Mais ce sont surtout les déroulements des séances en classe qui posent problème, indépendamment même des habitudes que cela amène à changer (voir ci-dessus).

Quatre activités de l'enseignant nous apparaissent (note 4) particulièrement délicates dans le schéma des problèmes d'introduction (ou transversaux), même en admettant que les élèves jouent bien le jeu et que l'énoncé soit adéquat.

Il y a, en premier lieu, le fait de devoir se taire « activement » au début des activités – c'est-à-dire de ne pas répondre directement aux questions (« à vous de travailler »), de relancer les élèves sur leurs questions (« tu veux dire quoi ? ») sans donner (trop) d'indications. Cependant il faut aussi juger du moment où il faut un peu lâcher pour certains groupes, qui seraient sinon trop découragés et risqueraient de décrocher du travail. Mais il faut en même temps retenir ce que chaque groupe fait, sans en avoir l'air. Or, non seulement relancer est beaucoup plus difficile que répondre, mais en même temps répondre seulement « un petit peu » à certains veut dire répondre à tous (diffusion incontournable). De plus, retenir ce qui se fait dans chaque groupe demande d'avoir des repères et de bien connaître le problème, pour identifier rapidement ce qui est en jeu. Enfin, se taire en classe, en soi, est difficile. Ainsi se taire en classe peut apparaître comme non conforme à la mission de l'enseignant dans les conceptions de certains professeurs ; pour d'autres ce peut être une source d'angoisse, pas nécessairement totalement consciente, liée à une perte du pouvoir total sur la classe.

En second lieu, il faut organiser à un moment donné, à la fin de la première phase de recherche, un changement de contrat : les élèves vont arrêter de travailler entre eux, ils vont devoir écouter. Or écouter après avoir travaillé est très difficile : les élèves renoncent mal à penser et à discuter une fois qu'ils sont partis, ils s'arrêtent difficilement. L'autre changement dans le sens « écouter puis travailler » est difficile aussi, mais plus facile à obtenir malgré tout, si on attend un petit peu (Legrand, 1995, évoque le fait de se remettre à « penser à la première personne »). De plus, le problème se pose toujours pour l'enseignant du moment précis où prendre l'initiative d'arrêter : ce sera toujours trop tard pour les uns (qui n'ont pas encore fini) et trop tôt pour les autres (qui en sont déjà plus loin dans le problème) (note 5) ...

En troisième lieu, l'animation et/ou la réalisation de la synthèse demandent de gros efforts, pour éviter l'ennui d'une éventuelle répétition par exemple.

Enfin l'institutionnalisation (exposition des connaissances) à géométrie variable (improvisée) n'est pas non plus chose aisée, d'autant plus qu'il risque d'y avoir des manques sur ce qui avait été prévu et que certains enseignants ont du mal à faire le deuil de quelque chose qu'ils avaient envie de dire.

3. VERS DES PERSPECTIVES EN TERMES DE TRANSPOSITION ET DE FORMATION

3.1. Recherches complémentaires

Une première perspective est liée à un travail de recherche, de type transposition, sur les points suivants : qu'est-ce qui est incontournable dans les pratiques et qui ne permettra pas d'appliquer tel quel « l'idéal didactique » ? Qu'est-ce qui peut s'aménager sans dénaturer les effets escomptés ?

3.1.1. Du côté des contraintes sociales et du « genre » du métier d'enseignant

Des recherches en cours s'intéressent précisément à ce que nous avons appelé, nous inspirant des travaux de Clot (2000, 2001), le « genre » de la profession enseignante. Ce sont des gestes professionnels, des comportements en classe, des habitudes partagées très largement par des enseignants d'un même groupe, et, du coup, très stables, et reproduites de génération en génération. Nous suggérons qu'à l'origine de ces conduites

communes, il y a des contraintes qui pèsent sur le métier d'enseignant et auxquelles elles permettent de répondre de manière optimale. Cependant il se peut, et c'est ce qui nous intéresse ici, que les contraintes changent. La stabilité déjà évoquée empêche souvent (ou freine) la remise en question utile. Les chercheurs essaient de mettre en évidence des éléments de ce « genre » et ont comme objectif de donner des perspectives pour engager une réflexion sur la manière de faire évoluer les choses.

Ce serait le moyen d'identifier à la fois ce qui est incontournable dans les propositions didactiques et ce qui joue à l'heure actuelle comme obstacle à leur adoption. Et cela permettrait un travail préalable supplémentaire, soit pour modifier les séquences soit pour essayer d'infléchir explicitement les habitudes.

3.1.2. Un exemple

Clairement, par exemple, la grande réticence des enseignants devant le travail en petits groupes d'élèves en classe semble faire partie de cet incontournable scolaire. On peut se demander s'il n'y a pas lieu de faire évoluer le « genre » sur cette question, peut-être en profitant d'ailleurs de l'introduction forcée des moyens informatiques, qui pose aussi un problème (différent) de renouvellement de la gestion en classe, ou même de l'introduction d'autres nouveaux dispositifs.

3.1.3. Le même exemple : suite, ou des recherches à mener sur les déroulements en classe « ordinaire »

Par ailleurs on peut aussi travailler sur la gestion de ces phases idéalement a-didactiques. Ce qui est incontournable pour les didacticiens me semble être le démarrage, qui doit engager les élèves dans une problématique. En revanche la suite, le moment où l'enseignant arrête cette phase est sans doute beaucoup plus négociable, peut-être variable. Si on s'inspire des théories de Vygotski (1997), on peut supposer schématiquement qu'à partir du moment où l'élève a été engagé dans une véritable réflexion qu'il n'a pas pu mener à bien seul, il va bénéficier tout de même des corrections de l'enseignant (si ce dernier réussit à ce que son discours se place dans la Zone Proximale de Développement de l'élève). Du coup, des recherches pourraient creuser le déroulement en classe de cette transition entre la recherche autonome des élèves et la synthèse ou la correction, notamment pour repérer la différence entre une simple attente et un début de réflexion.

3.2. La formation des futurs enseignants : un enjeu pour l'adoption du « didactiquement correct » ?

Une deuxième perspective tient à un certain enrichissement de la formation des enseignants. Il est évident que cela peut constituer un moyen pour faire évoluer le « genre » que nous évoquions ci-dessus. De plus, nous nous demandons si une plus grande familiarité de beaucoup d'enseignants avec certaines des analyses que nous proposons n'aiderait pas à l'adoption du didactiquement correct que nous défendons.

Dans ce paragraphe nos propos sont essentiellement prospectifs, nous connaissons peu de travaux de recherche ayant testé nos affirmations.

Très schématiquement, une formation « idéale » devrait aboutir à des acquisitions de connaissances bien appropriées, disponibles, mathématiques et didactiques, imbriquées à une certaine connaissance des contraintes scolaires et des genres du métier d'enseignant, et comprendre la mise au point d'adaptations individuelles des pratiques en classe, effectuées avec l'aide des formateurs.

Cependant, la formation professionnelle a un premier objectif qui prend beaucoup d'importance, et cela se comprend, c'est l'installation du débutant. C'est difficile de trop en demander quand on a tout à apprendre. Nos suggestions portent donc plutôt sur des compléments qui ont une visée à plus long terme, voire sur la formation continue ou sur celle des formateurs.

3.2.1. Mais comment se forment les pratiques d'enseignants ?

Nos connaissances ne sont pas encore très développées sur cette question, même si nous empruntons à nos « voisins » ergonomes, spécialistes du travail. Nous avons cependant quelques hypothèses, qui s'appuient sur une analyse des pratiques comme système complexe, avec plusieurs composantes imbriquées (voir ci-dessus). Nous complétons les composantes déjà citées, qui donnent accès aux déterminants des pratiques, par des descriptions des pratiques en classes (Robert & Rogalski, 2002) ; nous prenons en compte pour cela une composante cognitive, qui donne accès aux scénarios prévus (contenus et gestion *a priori*) et une composante médiative qui donne accès aux déroulements (formes de travail des élèves, accompagnements des enseignants).

Essentiellement nous pensons qu'une formation aux pratiques se fait en partant des pratiques, et qu'un apport « théorique » est nécessairement reçu en référence au terrain.

En particulier nous suggérons qu'une formation devrait, de ce fait, jouer systématiquement sur deux composantes à la fois (au moins), pour ne

jamais laisser toutes les recompositions à faire au formé. Ainsi, si on travaille sur le « cognitif » (énoncé d'un exercice par exemple), on traite en même temps le médiatif – c'est-à-dire le passage en classe ; ou les contraintes qui empêchent de proposer tel mode de déroulement, etc.

3.2.2. À propos des connaissances mathématiques : en amont de la formation professionnelle

Il nous apparaît qu'une des difficultés des (jeunes) enseignants tient à la trop faible part de leurs connaissances mathématiques disponibles. Pour reprendre l'exemple des problèmes d'introduction, en réfléchissant aux difficultés qui pourraient être aggravées pour un débutant, nous avons signalé celle de s'adapter à certaines séquences qui entraînent en dehors des savoirs habituels. On peut aussi supposer que, parmi les résistances à l'adoption d'un travail en petits groupes, figure la difficulté d'identifier rapidement des propositions des élèves qui vont dans toutes les directions, à la fois par rapport aux relances à improviser et par rapport aux synthèses à élaborer rapidement. De plus, la synthèse et l'institutionnalisation qui suivent le travail des élèves amènent à organiser entre elles différentes procédures, à mettre en relation des connaissances, toutes activités mathématiques qui sont facilitées par une certaine disponibilité de beaucoup de connaissances. Il en est de même pour la facilité d'utiliser à bon escient des connaissances d'un autre niveau (universitaire par exemple) pour un niveau « lycée », ce que les manuels font bien mal...

Pour obtenir des connaissances ainsi appropriées et disponibles, nous suggérons en didacticiens convaincus qu'il faut enseigner autrement à l'université (note 6) – et notamment qu'il y a lieu de privilégier les recherches de problèmes transversaux, en tout cas pour les futurs enseignants (note 7).

L'organisation des connaissances que nous pensons nécessaire aux futurs enseignants peut aussi se construire à travers des enseignements (directs) d'histoire des mathématiques.

3.2.3. Pour travailler simultanément le cognitif et le médiatif : les analyses de tâches et d'activités, la traque de l'illusion de la transparence et des malentendus

Comme nous l'avons indiqué, nous ne nous centrons pas ici sur la question de la prise en compte des élèves à l'installation dans le métier, leitmotiv des instructions officielles et principale obsession des débutants.

Cependant nous suggérons qu'un travail systématique sur les analyses de tâches et d'activités des élèves, qui peut être mené dès la préprofessionnalisation puis en vraie grandeur (à partir de vidéos par

exemple), permet une prise en compte des élèves mieux « outillée ». Cela rendrait aussi éventuellement plus facile, comme nous l'avons supposé plus haut, l'adoption de séquences didactiquement correctes, qui sont justement présentées comme une suite de tâches et d'activités bien précises.

Les analyses des énoncés proposés aux élèves et leur devenir en classe nous semblent présenter plusieurs avantages en termes de formation professionnelle. Il s'agit de réfléchir aux activités potentielles que peut provoquer un énoncé et le comparer à ce qu'il en reste en classe, compte tenu des formes de travail des élèves et des accompagnements de l'enseignant. Ces analyses, qui mettent en lumière le point de vue de l'élève, amènent à mettre en place un vocabulaire spécifique, dont on a besoin pour décrire ce qui nous intéresse. En effet, le lien entre activités et apprentissages, qui est notre fil directeur dans ces analyses, met en jeu, par exemple, le niveau de mise en fonctionnement des connaissances. Celui-ci doit être précisé par des « mots pour le dire », particuliers : applications immédiates, simples, isolées, adaptations diverses des outils mathématiques, disponibilité des connaissances, etc. De plus, pour décrire un énoncé, on est aussi amené à réfléchir à sa place dans le scénario, et à l'ensemble des activités sur la notion visée, ce qui entraîne d'autres descriptions spécifiques (type de notion par exemple).

De plus, l'étude en classe, même si on s'en tient aux traces des activités effectives, amène à mettre en évidence des phénomènes importants : par exemple à repérer des adaptations que les élèves rencontrent et que les enseignants n'ont pas détectées *a priori*, et qui se voient mieux si des analyses poussées ont déjà été faites (note 5).

Plus généralement, et notamment si on essaie d'analyser un peu plus que les traces des activités des élèves, par des analyses de productions d'élèves par exemple, c'est un moyen pour rentrer dans la classe du côté des élèves, même si cela reste partiel. On néglige ainsi en effet bien des aspects, affectifs notamment. C'est cependant un accès à l'illusion de la transparence dont peuvent faire preuve les enseignants, c'est-à-dire le fait de penser qu'une explication claire de l'enseignant implique la compréhension de tous les élèves (c'est cela la transparence). Plus généralement encore, cela peut donner accès à certains malentendus entre enseignants et élèves, dont on connaît l'importance en Zone d'Éducation Prioritaire. Rappelons brièvement qu'il s'agit de repérer si les élèves se contentent d'effectuer les tâches pour elles-mêmes ou les comprennent comme l'enseignant les a conçues, comme un accès aux savoirs (Bautier & Rochex, 1998).

3.2.4. *Contraintes du système éducatif et adaptations individuelles*

Nos analyses de pratiques nous amènent à faire l'hypothèse que, pour chaque enseignant, les pratiques sont non seulement stables (des décisions analogues accompagnent des événements proches), mais encore cohérentes. Il peut exister plusieurs niveaux de lecture de cette cohérence individuelle, qui permet de comprendre les liens entre diverses décisions par exemple, qui explique aussi les hiérarchies adoptées entre différentes logiques d'action de l'enseignant (Robert, 2001), ou les choix devant des contradictions à résoudre. Des recherches sur l'utilisation du tableau (Robert & Vandebrouck, soumis), l'étude sur l'enseignement de la multiplication des décimaux en sixième (Roditi, 2001), les pratiques en Réseau d'Éducation Prioritaire, (Butlen *et al.*, 2002) le confirment : pour un même enseignant, toutes les démarches, même dans le didactiquement correct, ne sont pas possibles *a priori*, il ne choisit pas toutes les alternatives qui ont été mises en évidence dans des classes, même si chaque spectre de conduites est large.

Cela a comme conséquence éventuelle la possibilité (nécessité ?) de prise en compte en formation de cette cohérence (en germe chez les débutants). En particulier les formateurs de terrain pourraient aider ces derniers à la fois à détecter cette cohérence et à intégrer certaines démarches inhabituelles sans que les jeunes y perdent leur âme, en respectant leurs conceptions, leur projet (même en germe). Cela peut justifier l'écriture du mémoire professionnel, ou certains dispositifs mis en place à l'IUFM de Créteil qui proposent des actions de formation répétées, à partir des mêmes situations réelles (voir Butlen, habilitation en cours).

Soulignons la prise de conscience, sans doute nécessaire, de tous les acteurs, de la difficulté d'ébranler, de faire évoluer ce type d'édifice, tellement complexe – les pratiques d'un enseignant de mathématiques dans un établissement scolaire donné.

NOTES

1. Dans la Théorie des situations, on distingue plus précisément une phase d'action, de formulation des solutions élaborées et de validation par les élèves de leurs propositions.

2. Institutionnalisation dans la Théorie des situations (Brousseau, 1998).

3. C'est le qualificatif que G. Brousseau introduit dans la Théorie des situations pour désigner les moments où les élèves travaillent sans être influencés par l'enseignant (Brousseau, 1998).

4. Ce sont encore des hypothèses même si les thèses de Vergnes (2000), et de Masselot (2000) apportent des confirmations précieuses.

5. Un travail de recherche sur ce problème précis a été commencé dans une équipe d'enseignants de Toulouse, avec l'hypothèse que les deux cas de figure peuvent amener à des apprentissages (Groupe Toulouse-Versailles, Brochure, 2002).

6. Une brochure ayant ce titre permet d'avoir des exemples de suggestion pour modifier l'enseignement universitaire (Commission InterIREM Université, 1989).

7. L'écrit du CAPES, examen de recrutement d'une grande partie des futurs enseignants en France, pourrait amener à réaliser ce programme si les énoncés des problèmes étaient rédigés au peu autrement.

BIBLIOGRAPHIE

BAUTIER E., ROCHEX J.-Y. (1998). *L'expérience scolaire des nouveaux lycéens, démocratisation ou massification ?* Paris, A. Colin.

BOLON J. (1996). *Comment les enseignants tirent-ils partie des recherches faites en didactique des mathématiques ?* Thèse de doctorat, Université Paris 5.

BROUSSEAU G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Grenoble, La Pensée sauvage.

BUTLEN D., PELTIER M.-L. & PEZARD M. (2002). Nommés en REP, comment font-ils ? *Revue Française de Pédagogie*, n° 140, pp. 41-52.

COMMISSION INTERIREM UNIVERSITÉ (1989). Enseigner autrement en DEUG première année. *Brochure IREM-Paris 7*.

CLOT Y. (2001). Psychopathologie du travail et clinique de l'activité. *Éducation permanente*, n° 146, pp. 35-49.

CLOT Y. (2001). Clinique du travail et action sur soi. In J.-M. Baudoin & J. Friedrich (Éds), *Théories de l'action et éducation*. Bruxelles, De Boeck, pp. 255-277.

DOUADY R. (1986). Jeux de cadres et dialectique outil-objet. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 5-32.

DUVAL R. (2001). Comment décrire et analyser l'activité mathématique ? Cadres et registres. In *Actes de la journée en hommage à R. Douady, IREM, Université Paris 7*, pp. 83-105.

GRUPE TOULOUSE-VERSAILLES (2002). Les analyses d'énoncés mathématiques, une entrée dans des formations continues d'enseignants. *Brochure IREM n° 41*, Université Paris 7.

HUBERMAN M. & GATHER-THURLER M. (1991). *De la recherche à la pratique*. Berne, Peter Lang.

LEGRAND M. (1995). Mathématiques, mythe ou réalité (2). *Repères IREM*, n° 21, pp. 111-139.

MASSELOT P. (2000). *De la formation initiale en didactique des mathématiques (en centre IUFM) aux pratiques quotidiennes en mathématiques, en classe, des professeurs d'École (une étude de cas)*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.

ROBERT A. (1998). Outils d'analyse des contenus mathématiques à enseigner au lycée et à l'université. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 18, n° 2, pp. 139-190.

ROBERT A. & ROGALSKI J. (2002). Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : une double approche. *Revue canadienne de l'enseignement des sciences, des mathématiques et des technologies*, vol. 2, n° 4, pp. 505-528.

ROBERT A. & ROGALSKI M. (à paraître). Comment peuvent varier les activités mathématiques des élèves sur des exercices – le double travail de l'enseignant sur les énoncés et sur la gestion en classe. *Revue x*.

ROBERT A. & VANDEBROUCK F. (soumis). Des utilisations du tableau par des professeurs de mathématiques en classe de seconde. *Recherches en didactique des mathématiques*.

RODITI E. (2001). *L'enseignement de la multiplication des décimaux en sixième : étude de pratiques ordinaires*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.

VERGNES-AROTÇA D. (2000). *Analyse des effets d'un stage de formation continue en géométrie sur les pratiques d'enseignants de l'école primaire*. Thèse de doctorat, Université Paris 5.

VYGOTSKI L.S. (1997). *Pensée et langage*. Paris, La dispute.

REMERCIEMENTS

À tous les enseignants qui m'ont aidée à faire des liens entre recherche et terrain.

Cet article a été reçu le 10 septembre 2002 et accepté le 12 novembre 2002.

Report of innovation

Apprendre à reconnaître les arbres en CM2 : La situation de jeu « Florex » : compte rendu d'innovation

Recognized trees in primary school : the game situation « Florex » : report of innovation

Patricia MARZIN, Éric TRIQUET, Bruno COMBAZ

LIDSET-IUFM de Grenoble et, Université Joseph Fourier, Grenoble 1
30, avenue Marcelin Berthelot
38100 Grenoble, France.

Résumé

L'article présente une situation créée pour développer un apprentissage de la reconnaissance des arbres en classe de CM2, à l'aide de critères et d'un raisonnement à partir de ces critères. Cette situation a été conçue comme un jeu au cours duquel les élèves ont à reconnaître le plus rapidement et le plus justement possible 18 arbres situés dans un parc naturel en Haute-Savoie. Nous avons voulu créer une situation adidactique, au sens de G. Brousseau. Nous exposons dans cet article la situation et son analyse didactique. Lors de cette analyse nous avons identifié des variables didactiques, des phases

et des stratégies possibles pour les élèves. Dans un premier temps nous présentons le principe du jeu et ses éléments. Dans un second temps nous formalisons l'analyse didactique, en référence, entre autres, à la théorie des situations de G. Brousseau.

Mots clés : *situation adidactique, critères de détermination, variables didactiques, validation, jeu.*

Abstract

In reference of the situation theory of G. Brousseau we have created an adidactic situation in the goal of learning pupil how to recognize trees. This situation was crated like a game which pupils must recognized as quick as possible and as precise as possible 18 trees in a wood in Haute-Savoie. In this paper we want to presente the situation we build and the didactic's analyse we do. After this didactic's ingeniery we have test and analyse the Florex situation at pupils in age of 12. It's the description of this situation and the experimental results that we describe in this paper.

Key words : *adidactic situation, determination keys, validation, game.*

INTRODUCTION

La situation « Florex » correspond à une situation d'apprentissage par le jeu d'une méthode d'identification de végétaux. Cette situation présente la particularité de se dérouler en extérieur. Elle cherche à sensibiliser de jeunes citadins au travail rigoureux d'observation et d'identification de végétaux mené sur le terrain.

L'objectif didactique de ce travail était de construire une situation dans laquelle les élèves pouvaient interagir avec un milieu didactique composé d'un environnement naturel (les arbres du parc) et d'aides didactiques (des fiches de jeu), leur permettant de se familiariser avec des critères spécifiques de reconnaissance des végétaux, et plus particulièrement des arbres.

L'idée était de s'approcher d'une situation adidactique au sens où l'entend G. Brousseau c'est-à-dire : « *une situation à finalité didactique (organisée par l'enseignant en vue d'un apprentissage) où le sujet répond comme si la situation était non didactique (c'est-à-dire indépendamment des attentes de l'enseignant)* » (Brousseau, 1986). Dans ce cas, l'apprenant modifie son rapport au savoir par adaptations successives aux contraintes imposées par un « milieu didactique » organisé par l'enseignant.

L'apprentissage est ici à appréhender en termes d'actions de l'élève sur ce milieu et de rétroactions de ce dernier sur l'élève. Un point fondamental dans cette situation est la mise à distance des intentions didactiques.

1. PRÉSENTATION DU JEU FLOREX

1.1. Les objectifs d'apprentissage

La situation imaginée vise l'apprentissage de la méthode classique d'identification des végétaux supérieurs, fondée sur une observation fine et ordonnée des caractères du végétal. Elle a aussi pour objectif l'apprentissage de connaissances qui sont :

- les principaux critères de détermination des arbres et arbustes, qui concernent, dans le cas présent, le tronc, les feuilles, et les fruits (voir annexe1),
- les éléments concernant les végétaux étudiés : particularités biologiques de l'espèce, aire de répartition, milieu de prédilection, fréquence de l'espèce en France, utilisation par l'Homme.

1.2. La mise en scène de la situation

Le scénario proposé aux élèves

De façon à donner un aspect ludique, et à susciter la curiosité des élèves, nous avons imaginé un scénario d'entrée dans le jeu :

« Un centre de recherche de réputation mondiale cherche à recruter plusieurs jeunes explorateurs afin d'effectuer des études de la flore de la forêt amazonienne. Pour sélectionner ces explorateurs ce centre effectue des tests de compétences dans plusieurs écoles de France. Il s'agit, pour notre classe, de déterminer plusieurs arbres communs en Haute-Savoie répartis dans un parc naturel, et de répondre à différentes questions les concernant ».

Cette mise en scène constitue le point de départ de la situation ; elle fournit aux élèves le but du jeu, le cadre de la situation, la nature des activités consistant à déterminer des arbres et à répondre à des questions.

1.3. Le jeu « Florex »

1.3.1. *Le matériel et l'organisation du jeu*

Dix-huit arbres sont à déterminer : l'Aubépine épineuse, le Chêne sessile, le Chêne pédonculé, le Lierre commun, le Pin cembro, le Charme commun, le Bouleau verruqueux, le Platane commun, l'Orme champêtre, le Noisetier commun, le Châtaignier commun, le Houx commun, le Hêtre commun, l'Érable sycomore, la Ronce commune, le Mélèze d'Europe, l'Épicéa commun, et le Sapin blanc. Chaque arbre se voit attribuer, sur son tronc, une étiquette portant un code spécifique (ex : †, Ò, ‡, f, etc.).

Des équipes de **3 élèves** sont en compétition dans le jeu.

Chaque équipe dispose de **trois types de fiches** :

– un jeu de **fiches vertes** (annexe 2) correspondant chacune à une fiche sommaire de détermination d'un arbre du parc. On y trouve, en haut et à droite, le nom, en français et en latin, des indications sur les dimensions et l'allure générale de l'arbre, puis des informations sur la feuille (type, forme, disposition, particularités) illustrées par un dessin et enfin une description du fruit avec également une illustration ;

– un ensemble de **fiches roses** (annexe 3), comportant le nom, en français et en latin, de chacun des 18 arbres à déterminer, accompagné de trois questions de connaissance concernant cet arbre. Elles renvoient, selon les cas, aux particularités biologiques de l'espèce, à son aire de répartition, son milieu de prédilection, sa fréquence en France, voire son utilisation par l'Homme. Les deux premières questions, qui appellent une réponse simple et brève, rapportent 5 points ; la troisième, qui exige une réponse plus développée, est rétribuée par 10 points. Un emplacement est prévu, à droite du titre, pour l'écriture du code correspondant à l'arbre ;

– un jeu de **fiches bleues** (annexe 4), chacune identifiée par l'un des codes des arbres à déterminer. Elles renferment les éléments de connaissances qui permettent de répondre aux questions de la fiche rose correspondant au même arbre.

1.3.2. *Le dispositif de contrôle du jeu*

Il est constitué de trois adultes, les animateurs de jeu, qui sont assis à une table appelée « table de contrôle » auprès de laquelle les différents groupes viennent retirer les feuilles vertes de détermination. En échange du code repéré sur l'arbre déterminé, les animateurs de jeu délivrent la fiche bleue correspondante. Ils tiennent à jour, sur un tableau visible de tous, l'avancée des différentes équipes dans le jeu. À noter qu'un document d'aide

est à la disposition des équipes qui en font la demande ; on y trouve des rappels de botanique et un lexique.

1.3.3. Le déroulement du jeu

Les élèves sont munies de fiches vertes correspondant aux arbres à déterminer :

- à chaque identification, l'équipe note le code porté par l'arbre ; le code est communiqué au meneur de jeu qui, en échange, donne à l'équipe la fiche bleue correspondante ;

- l'équipe procède ensuite à la validation de sa détermination au moyen de la fiche bleue qui vient de lui être donnée (correspondance questions de la fiche rose/réponses de la fiche bleue).

1.3.4. Les indications données aux élèves au début du jeu

Les indications données aux élèves au début du jeu concernent :

- la délimitation du terrain et les arbres à déterminer,
- le but du jeu,
- le suivi de l'avancée des autres équipes,
- l'enjeu de marquer le plus de points possible, le plus rapidement possible,
- la nature de l'aide apportée par les adultes (uniquement pour préciser le sens d'un mot, mais en aucun cas pour valider une identification).

1.3. 5. L'enjeu de Florex

L'enjeu de florex est de totaliser le maximum de points à l'issue des 90 minutes de jeu. Pour y parvenir il importe, en premier lieu, de reconnaître et d'identifier correctement le maximum d'arbres, en second lieu de répondre le plus rapidement possible, et en commettant le minimum d'erreurs, aux questions des fiches roses.

2. ANALYSE DIDACTIQUE DE LA SITUATION DE JEU « FLOREX »

Pour commencer, il nous faut dégager les grands types de variables didactiques à partir desquelles nous pourrions définir des modalités de jeu et les stratégies gagnantes. Par variable didactique nous entendons les

éléments de la situation sur lesquels l'enseignant peut, potentiellement, agir pour provoquer chez les élèves, des changements de procédures dans la résolution de la tâche proposée. L'idée est de permettre une mise en œuvre progressive de procédures, en l'occurrence de détermination de végétaux, de plus en plus fine et performante au fil du jeu.

2.1. Les variables didactiques

Nous nous limiterons, dans le cas présent, aux variables liées aux objets à déterminer, à savoir les arbres et arbrisseaux. Pour chacune, nous poserons des couples de valeurs comprenant, dans les faits, tous les intermédiaires possibles. Nous les examinerons en référence aux arbres du parc qui sont à déterminer. Nous étudierons ensuite leur croisement possible dans le jeu, au choix de l'enseignant.

Grande taille / petite taille

Parmi les arbres à déterminer dans le parc certains sont à rattacher aux strates herbacées (jusqu'à 1m de haut), arbustive (jusqu'à 3m) et arborescente (plus de 3 m) :

- strate herbacée : le Lierre, le Houx commun, la Ronce commune,
- strate arbustive : l'Aubépine épineuse, le Noisetier commun,
- strate arborescente : le Platane commun, les Chênes (le Chêne sessile, le Chêne pédonculé), le Châtaignier commun, le Sapin blanc, le Pin cembro, Le Charme commun, le Bouleau verruqueux, l'Orme champêtre, l'Érable sycomore, le Hêtre commun, le Mélèze d'Europe, et l'Épicéa commun.

La taille va déterminer ici la possibilité de développer une première procédure de repérage à vue, en s'appuyant notamment sur les indices concernant le port de l'arbre. Mais à l'intérieur de ce groupe, des écarts sont à considérer entre le Noisetier qui dépasse rarement les six mètres et le Sapin pouvant atteindre cinquante mètres.

Familiarité / non-familiarité des arbres à déterminer

Cette variable dépend des connaissances préalables des élèves, liées à la fois aux apprentissages antérieurs et à leur milieu d'origine. On peut néanmoins définir, parmi les arbres à déterminer, ceux qui *a priori* peuvent être perçus comme les plus familiers pour les élèves.

Pour les espèces arborescentes : le Platane (commun) car présent dans de nombreuses écoles, l'Érable (sycomore) en tant qu'emblème du Canada, éventuellement le Bouleau (verruqueux).

Pour les espèces de la strate herbacée : le Houx (en référence aux décorations de Noël), la Ronce commune (présente dans tous les terrains vagues).

Restent les cas ambigus que chacun pense connaître mais que l'on connaît en réalité de façon générique. Le Chêne dont la feuille caractéristique et le fruit sont étudiés depuis l'école maternelle, mais dont personne ne sait immédiatement reconnaître les différentes espèces, ou les conifères (sapin, pin, épicéa, notamment) que chaque élève, dès son plus jeune âge, sait également reconnaître à distance sans toutefois faire la différence entre les différents types. On touche là, en fait, à une autre variable dont il nous faut également tenir compte.

Cette variable est déterminante dans la mesure où c'est sur elle que repose la possibilité pour l'élève d'entrer dans le jeu en engageant, sur un arbre connu, une première procédure d'identification. Par ailleurs, comme la variable « taille » (et en interaction avec elle) elle détermine une exploration visuelle à distance sur la base du critère « physionomie et port » de l'arbre.

Dissemblance / ressemblance des arbres à déterminer

Cette variable apparaît la plus complexe. D'une part, du fait des multiples caractères et attributs pouvant, pour un même arbre, développer des similitudes avec d'autres. Ensuite, par le fait que la ressemblance, quel que soit l'organe concerné, peut affecter, certes des arbres de la même « famille », mais également des arbres de « familles » différentes. Aussi nous faut-il tenir compte de ce point dans notre étude.

• Les arbres qui se distinguent de tous les autres

Comme nous venons de le noter, la singularité d'un arbre, ou d'une catégorie d'arbres est un élément facilitateur lors de son identification, à distance ou de près selon le critère concerné. Sur les exemples à déterminer on peut citer :

- les chênes avec leurs feuilles pluri-lobées et le gland comme fruit,
- les conifères de forme pyramidale et présentant des feuilles en aiguilles,
- les arbrisseaux épineux, par la tige (Aubépine épineuse et Ronce commune), ou par la feuille (Houx).

• Les arbres qui se ressemblent et qui sont de « familles » différentes

À l'inverse du cas de figure précédent, plus un arbre entretient des ressemblances avec un autre, plus la procédure d'identification doit être

poussée et prendre en compte l'ensemble des critères. Néanmoins, il s'agit d'arbres de genres différents et si la détermination exige de la précision, elle ne présente pas, en principe, de problèmes majeurs. Chez le Charme commun, le Hêtre commun, l'Orme champêtre, il existe des similitudes sur la dimension et la forme du tronc, sur la forme des feuilles qui sont, dans les trois cas, ovales, pointues, dentées. Les différences concernant la feuille qui est faiblement dentée pour le Hêtre, ondulée et dentée pour le Charme et doublement dentée pour l'Orme. Il y a des différences sur le fruit : une bogue hérissée à section triangulaire pour le Hêtre, une graine dure entourée de trois longues bractées pour le Charme, un disque vert contenant une graine au centre pour l'Orme.

Chez l'Aubépine épineuse et la Ronce commune il y a des similitudes sur la dimension des rameaux qui comportent des épines dans les deux cas ; mais la feuille est piquante chez la Ronce.

• *Les arbres qui se ressemblent et qui sont de la même famille*

Il s'agit, dans l'échantillon particulier des arbres que l'on se propose de déterminer, des mêmes arbres que ceux rangés dans la première catégorie, ce qui, bien évidemment, ne sera pas toujours le cas. L'étude exige d'être recentrée, au final, sur l'élément spécifique de l'espèce qui ne peut être négligé, au risque de se tromper. La détermination se doit donc d'être extrêmement fine tant les ressemblances peuvent être importantes.

Nous retrouvons ici les cas correspondants aux chênes et aux conifères évoqués plus haut.

* Le Chêne sessile / le Chêne pédonculé

Il existe des similitudes sur la dimension et la forme du tronc, sur la feuille et sur le fruit. Il y a aussi des particularités propres à chaque espèce. Par exemple, chez le Chêne pédonculé, on note la présence de deux oreillettes à la base de la feuille et d'un fruit (gland) à long pédoncule, alors que les feuilles du Chêne sessile sont légèrement poilues sous les nervures.

* Les conifères : Épicéa commun

On observe des similitudes entre les quatre arbres suivants, l'Épicéa commun, le Sapin blanc, le Pin cembro, le Mélèze d'Europe : sur la dimension (grand), sur la forme (pyramidale), la feuille (en aiguille) et sur le fruit (cône).

Néanmoins, sur ces deux derniers aspects chacun apparaît original.

On note des différences au niveau de la feuille :

• l'Épicéa commun possède des aiguilles raides de section arrondie, attachées isolément, disposées tout autour du rameau,

- le Sapin blanc, des aiguilles attachées isolément, souples, plates, disposées sur un seul plan,
- le Pin cembro des aiguilles longues, réunies par cinq dans une gaine,
- le Mélèze d'Europe des aiguilles tendres, groupées en touffes.

Au niveau du fruit :

- l'Épicéa commun possède un cône long et pendan,
- le Sapin blanc un cône long, dressé,
- le Pin cembro un cône ovoïde,
- le Mélèze d'Europe un petit cône, dressé.

Nous nous sommes ici seulement intéressés aux variables didactiques liées aux arbres à déterminer, mais il est bien évident que le contenu des fiches vertes peut également influencer les procédures qui seront mises en œuvre par les élèves. Par exemple, si aucune information n'est donnée sur la silhouette de l'arbre (seulement sur les dimensions), les élèves seront contraints de privilégier l'étude de la feuille et du fruit. *A contrario*, si cette information est donnée, et que l'on ajoute, par exemple, des informations sur l'écorce, les procédures de détermination par les feuilles et/ou les fruits perdent de l'importance.

2.2. Les modalités de jeu

L'espace naturel étant choisi, l'étude des arbres au moyen des critères (critères de variable¹ envisagés ci-dessus) réalisée, il reste à l'enseignant à choisir une modalité de jeu et un type d'organisation dans le temps.

2.2.1. Modalité « naturelle »²

Dans la modalité de base que nous avons testée³, l'ensemble des fiches roses était à la disposition des élèves au départ du jeu, les fiches vertes étant distribuées une à une, à la demande, après chaque détermination. Le jeu se déroulait en une seule fois sur une durée déterminée. C'est cette modalité qui a été testée avec les élèves.

Elle permet d'étudier ici les procédures de détermination mises en œuvre **spontanément** par les élèves et analyser les stratégies développées au sein des groupes. Il peut être intéressant de voir sur quel arbre se porte la première détermination des élèves, s'ils sont attirés ou non vers les conifères, et encore, comment s'opère la détermination des espèces de petites tailles.

Mais dans cette modalité, l'enseignant ne contrôle ni les variables didactiques ni les phases de jeu.

2.2.2. Modalité contrôlée par l'enseignant

Si l'enseignant entend rester maître du déroulement du jeu et, au-delà, disposer d'un contrôle minimal des procédures de détermination tout au long de celui-ci, il lui faut pouvoir agir sur les différentes variables didactiques. Il lui appartient donc de sélectionner les arbres à déterminer sur différents temps de jeu dont il définit la durée et la succession. En pratique il s'agit, pour lui, de définir les arbres à déterminer dans un premier temps, puis d'élargir le jeu à un échantillon plus large sur un second, puis un troisième temps en croisant les variables que nous avons définies plus haut. À chaque fois l'enseignant distribue les fiches vertes correspondant aux arbres à déterminer en ayant pris soin préalablement de placer un code uniquement sur les arbres du parc⁴ correspondant à ces fiches vertes.

Dans cette modalité les groupes disposent du jeu de fiches vertes des arbres à déterminer (marqués par un code à associer au nom de l'arbre). Quand la détermination est terminée ils demandent à la table centrale la fiche rose correspondant au nom de l'arbre déterminé et la fiche bleue portant le code relevé sur l'arbre, de façon à procéder à la validation (par le jeu des questions / réponses) de la détermination.

À noter qu'à l'issue de chaque temps de jeu, l'enseignant provoque un arrêt des recherches permettant aux animateurs de placer d'autres codes sur les nouveaux arbres à rechercher (les groupes qui n'étaient pas parvenus au terme de leurs recherches auront le droit de les poursuivre dans le temps suivant).

Dans cette modalité, l'enseignant reste garant des enjeux d'apprentissage et maîtrise, pour partie, l'environnement didactique (arbres à déterminer, fiches vertes à utiliser) avec lequel les élèves vont (en principe) interagir.

En sélectionnant les arbres à déterminer, l'enseignant organise les conditions du jeu et son déroulement, et définit lui-même les enjeux de chaque temps de recherche au travers des procédures de détermination qu'il sollicite.

Nous proposons ci-dessous une progression possible en prenant soin de pointer, à chaque fois, la stratégie de jeu qui nous semble la plus performante⁵ et les procédures de détermination sollicitées dans cette stratégie. Cette modalité n'a pas été testée avec les élèves. À partir des variables didactiques que nous avons définies ci-dessus nous proposons de faire fonctionner le jeu en trois temps.

Temps 1 – Arbres familiers de grande taille⁶ pour lesquels une seule espèce est présente

Pour commencer, nous proposons aux élèves une recherche des arbres considérés comme les plus familiers et dont une seule espèce est présente dans le parc de façon à lever au maximum les risques d'erreurs. Ce premier temps est essentiel : il permet aux élèves d'entrer dans le jeu, de prendre confiance, et à l'enseignant de s'assurer qu'ils ont compris son fonctionnement, et que tous les groupes se sont bien appropriés les différentes fiches.

Temps 2 – Arbres non familiers de grande taille et qui se distinguent de tous les autres⁷ et les arbres familiers de petite taille⁸

Nous proposons dans un second temps d'élargir la recherche :

– aux arbres non familiers de grande taille se distinguant de tous les autres : nous retrouvons là les cas relativement caractéristiques, familiers pour ce qui concerne l'ensemble du groupe (les conifères, les chênes) mais trompeurs du fait des ressemblances marquées des arbres de genres distincts (conifères) ou d'espèces différentes (chênes) souvent confondues ou assimilées;

– aux arbres familiers de petite taille : il importe de les proposer assez tôt dans le jeu de façon à augmenter les chances d'une rencontre fortuite avec ces arbres en principe aisément reconnaissables par les élèves mais discrets, surtout si le couvert végétal est important.

Temps 3 – Arbres restants : non familiers de grande⁹ et petite¹⁰ taille, appartenant à des groupes distincts mais présentant des similitudes

Il reste une collection d'arbres dont nous avons postulé plus haut qu'ils présentaient – *a priori* – moins de difficultés que ceux très ressemblants et de même groupe. À noter que si ces derniers n'avaient pas, en outre, présenté **des caractéristiques** fortes ils auraient constitué un groupe à étudier dans un dernier temps, de façon à respecter une chronologie dans la difficulté.

2.3. Les différentes phases de la situation et les stratégies optimales pour l'apprentissage

Dans la logique de la théorie des situations nous distinguons trois phases correspondant à trois moments différents de la situation, chacun déterminant un type de rapport au savoir que nous allons tenter de caractériser.

2.3.1. La phase « dévolution »

Cette phase est initiée par la situation d'entrée du jeu Florex, qui d'une part propose une contextualisation de la situation, d'autre part délègue aux élèves la responsabilité de l'identification des arbres du parc. Cette délégation a pu se faire grâce au scénario que nous avons imaginé et qui place les élèves en situation de recherche : les élèves doivent passer un test (reconnaître des arbres de leur région) afin d'être sélectionnés pour être chercheurs et explorateurs (reconnaître des arbres dans une région inconnue). La dévolution s'opère également au travers de la mise en jeu de la procédure (reconnaissance à vue) de base. C'est là une condition fondamentale pour que les élèves entrent dans la situation et se l'approprient. Mais il est aussi impératif que cette procédure se révèle insuffisante pour qu'ils éprouvent la nécessité de développer une méthode d'identification basée sur des critères de reconnaissance formalisés sur la fiche verte. Cette phase peut s'illustrer par la stratégie suivante.

Stratégie(s) 1 :

- recherche des arbres familiers : mise en place d'une procédure « de base » (reconnaissance à vue des arbres connus) ;
- vérification (ou non¹¹), à distance au moyen de la fiche verte à partir du critère « port de l'arbre » ;
- étude (ou non) de la feuille ou du fruit pour confirmation au moyen de la fiche verte ;
- relevé du code porté par l'arbre déterminé et validation au moyen des fiches roses et bleues.

Cette stratégie a effectivement été utilisée par les équipes immédiatement ou tout de suite après un temps de tâtonnement.

2.3.2. La phase « situation d'action à caractère didactique »

Il y a ici utilisation des critères de détermination de la fiche verte pour identifier les arbres listés sur la fiche rose. Deux démarches sont alors possibles : soit une démarche de vérification pour les arbres familiers, soit une démarche de découverte pour les arbres non familiers. Dans les deux cas de figure, il peut s'agir uniquement d'une mobilisation « en acte » des critères, sans recours à leur explicitation.

Stratégie(s) 2 :

- repérage à vue des conifères (plus faciles à localiser à distance que les Chênes, surtout si ces derniers sont peu familiers) ;

– identification des différents spécimens au moyen de la fiche verte : mise en place d'une procédure de détermination par l'étude de la feuille et du fruit ;

– relevé du code porté par l'arbre déterminé.

Même déroulement pour les Chênes après avoir déterminé les conifères.

Pour les espèces familières de petite taille, il est nécessaire de procéder à une recherche systématique¹² lors des déplacements, puis de procéder à leur détermination.

2.3.3. La phase « temps de validation »

Il y a association des réponses contenues dans la fiche bleue aux questions posées dans la fiche rose. En cas d'impossibilité, il y a remise en cause de l'identification de l'arbre et retour des recherches à partir de la fiche verte. Soulignons qu'il s'agit d'une validation que nous qualifierons d'indirecte (Margolinas, 1989). En effet elle passe par des caractéristiques autres que celles visées dans la situation et concernant les caractères morphologiques des végétaux (voir la fiche bleue en annexe). Et comme le souligne B. Combaz « *en matière de vivant, il y a peu de milieux réagissant toujours de façon identique (...) La validation par le milieu purement naturel semble très difficile à assurer à 100 %* » (Combaz, 1997, p. 55).

2.3.4. Phase de formulation suite à l'invalidation de la détermination d'un arbre

La remise en cause de l'identification d'un arbre *via* son code **peut faire apparaître**, au sein du groupe, la nécessité d'une explicitation à la fois de la procédure utilisée et des critères mobilisés, de façon à repérer à quel moment le groupe a commis une erreur.

Le changement de procédure, comme choix du groupe, peut être le résultat d'un temps de confrontation de différents points de vue au cours duquel apparaît la nécessité de formuler oralement certains critères.

Pour que le groupe gagne, il est nécessaire que l'élève qui « sait jouer » parvienne à convaincre ses partenaires du bien fondé de sa stratégie (par exemple, de mobiliser les critères dans un certain ordre, de privilégier sur un exemple particulier un critère particulier).

Les deux conditions d'une situation de formulation apparaissent ici : la nécessité de communication entre des élèves coopérants, l'existence de positions dissymétriques à l'intérieur du groupe.

CONCLUSION

Il apparaît que les stratégies et les procédures mises en place effectivement par les élèves correspondent, en partie, à celles proposées dans l'analyse *a priori*, même si d'autres stratégies ont aussi été inventées par les élèves. Dans les interactions des élèves avec le milieu, les connaissances sur les végétaux et sur la méthode de détermination sont apparues comme des outils pour construire des stratégies de plus en plus performantes. Les variables didactiques familiarité/non-familiarité, ressemblance/dissemblance, familles identiques/familles différentes ont également fonctionné de façon efficace, même si, dans une situation de terrain comme celle-ci, elles ne sont pas toutes facilement contrôlables.

La première difficulté, on l'a vue, est de définir les variables didactiques et de mettre en place les conditions nécessaires pour que se développent les apprentissages, la seconde étant de s'assurer que les élèves puissent d'une part satisfaire ces conditions, et d'autre part disposer d'un moyen de validation de leurs stratégies ; difficultés déjà en partie pointées par Robardet (1997) en sciences physiques.

Une évolution possible de la situation pourrait être de proposer aux élèves un véritable temps d'action. Dans le premier temps de jeu, la détermination se ferait alors sans la fiche verte et pourrait s'appuyer uniquement sur les conceptions des élèves. Ce temps pourrait être prolongé par une phase de formulation provoquée, cette fois, par l'enseignant, et qui permettrait l'explicitation des stratégies développées par chaque équipe ainsi que les procédures de détermination associées à ces stratégies.

Ce travail était pour nous, avant tout, une occasion d'expérimenter la théorie des situations formalisée par G. Brousseau, et non de l'ériger en modèle pour l'enseignement de la biologie. Il nous a permis de réfléchir à une situation en biologie qui s'approche le plus possible d'une situation adidactique. Cette approche, fondée sur un apprentissage **par et dans l'action**, n'est pas courante dans l'enseignement de la biologie, que ce soit au primaire ou dans le secondaire.

Néanmoins les résultats de l'expérimentation menée en DEA par B. Combaz (1998) font apparaître une grande efficacité, en termes d'apprentissage, de cette situation. La plupart des élèves ont appris à utiliser des critères de détermination chez les végétaux et ils ont su réinvestir cet apprentissage chez les animaux. Elle a permis, en effet, de faire vivre et d'opérationnaliser la méthode d'identification et de reconnaissance des plantes, par la mise en place d'une situation ludique et interactive, ce qui était l'objectif premier de son concepteur.

NOTES

1. Au sens où ils pourront fonctionner comme les variables didactiques de la situation.
2. Au sens où elle se rapproche le plus de la « situation naturelle » du promeneur en forêt.
3. Mémoire de DEA de Bruno Combaz.
4. Dans la mesure du possible plusieurs spécimens du même arbre de façon à permettre une meilleure répartition des groupes d'élèves au moment de la recherche.
5. Avec entre parenthèses, éventuellement, des éléments de la stratégie alternative.
6. Le Platane (commun), l'Érable (sycomore), le Bouleau (verruqueux).
7. Chênes et conifères.
8. Le Houx, la Ronce commune (présente dans tous les terrains vagues).
9. Charme commun, le Hêtre commun, l'Orme champêtre.
10. Aubépine épineuse et la Ronce commune.
11. Selon la stratégie choisie et/ou le degré de familiarité de l'arbre.
12. Dès qu'il y a rencontre avec l'un des spécimens recherchés la procédure d'identification-vérification est lancée.

BIBLIOGRAPHIE

- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *RDM*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- COMBAZ B. (1997). *Étude de la théorie des situations appliquée à la biologie à travers un jeu traitant de la détermination florale : Florex*. Mémoire de DEA de didactique des disciplines scientifiques, Université Grenoble1.
- COMBAZ B. (1998). Florex : jeu de détermination des végétaux ; analyse d'une situation d'apprentissage. *Grand N*, n° 62, pp. 85-102.
- MARGOLINAS C. (1989). *Le point de vue de la validation : essai de synthèse et d'analyse en didactique des mathématiques*. Thèse de doctorat, Université Grenoble 1.
- ROBARDET G. (1997). Le jeu de résistors : une situation visant à ébranler des obstacles épistémologiques en électrocinétique. *Aster*, n° 24, pp. 59-79.

Ce travail a fait l'objet d'un mémoire de DEA soutenu par B. Combaz (Combaz, 1997) dirigé par P. Marzin, et a donné lieu à un TD de DEA, dans le cadre d'une réflexion sur l'utilisation de la théorie des situations en didactique de la biologie, préparé et réalisé par P. Marzin et É. Triquet.

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement nos collègues du LIDSET, Bernard Darley et Guy Robardet qui ont accepté de faire la relecture de l'article, ainsi que les collègues enseignants qui ont permis l'expérimentation.

ANNEXE 1

Critères de détermination d'un arbre ou arbuste

Tronc

- Dimensions, déterminant la catégorie : arbre, arbrisseau, plante grimpante.
- Allure générale : cime pointue, arrondie, étalée ; tronc en une seule partie ou ramifié, branches pendantes, redressées, tordues.
- Pied de l'arbre : avec ou sans jeunes pousses.
- Écorce : couleur, présences de crevasses, de reliefs, etc.

Feuilles

- Type de feuilles : feuilles à limbe large et aplati soutenu par des nervures ; feuilles très étroites en aiguilles ou en écailles.
- Forme :
 - simples ou composées ; composées palmées, pennées,
 - rondes, ovales, allongées
- Disposition : alternes, opposées, groupées.
- Particularités : dentées ou non ; poilues ou non.

Fruits et Graines

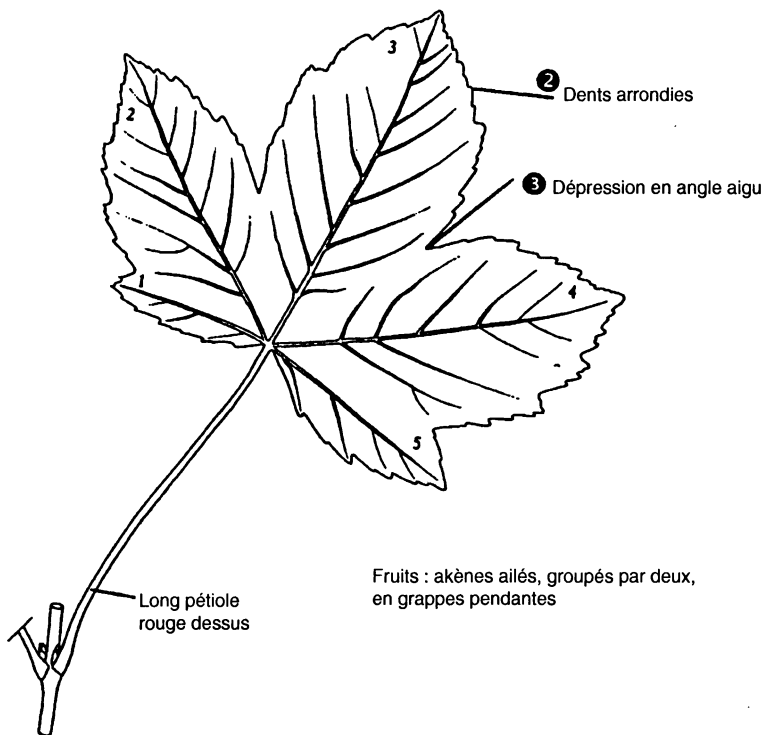
- Dimensions
- Forme
- Couleur
- Consistance
- Présence d'éléments annexes : écailles, bractées, piquants, poils.

ANNEXE 2

Fiche verte

Arbre de 25 a 30 m
Feuilles opposées

ÉRABLE SYCOMORE
Acer pseudoplatanus



ANNEXE 3

Fiche rose

ÉRABLE SYCOMORE (*Acer pseudoplatanus*)

CODE

Questions

- ☞ Jusqu'à quelle altitude peut-on le trouver ?
- ☞ Par qui était très apprécié ce bois autrefois ?
- ☞ Pourquoi dit-on que c'est le géant de la famille ?

RONCE COMMUNE (*Rubus fruticosus*)

CODE

Questions

- ☞ Quelle vitamine contient le fruit de cet arbuste ?
- ☞ Quels sont les points communs de toutes ces variétés ?
- ☞ Pourquoi seuls les spécialistes arrivent-ils à les distinguer ?

MÉLÈZE D'EUROPE (*Larix decidua*)

CODE

Questions

- ☞ Citer trois espèces de mélèze.
- ☞ Comment sont disposées les aiguilles ?
- ☞ Pourquoi est-il facile de le reconnaître en hiver et en automne ?

ANNEXE 4

Fiche bleue



Caractéristiques distinctives

Fleurs jaune – vert, généralement d'un diamètre inférieur à 1 cm, disposées en grappes pendantes de 5-15 cm de long, plutôt allongées qu'ovales.

Description

Feuilles à 5 lobes, dentées, échancrées sans pointe allongée. Echancrure pointue entre les lobes.

Habitat, Fréquence

Demande un sol humide, riche en substances nutritives, argileux ou caillouteux, contenant de l'humus, tout au moins en surface. Habite les forêts des ravins, les forêts mixtes de moyenne montagne jusqu'à l'altitude des forêts feuillus (1 600 m environ). Il est souvent cultivé.

Particularités

Fournit un bois autrefois très apprécié des tourneurs et des sculpteurs. De nos jours, il est encore utilisé en menuiserie d'ameublement.

Le plus grand de la famille

C'est le géant de sa famille : non seulement par sa taille, mais aussi par la grosseur de son tronc qui peut atteindre 1 à 2 m de diamètre. Originaire des montagnes méditerranéennes, il est planté dans toute la France, depuis des siècles, dans les parcs et en bordure des routes. Les arboriculteurs ont créé de nombreuses variétés en développant le pigment rouge naturellement présent dans les feuilles.

Cet article a été reçu le 6 juin 2002 et accepté le 30 septembre 2002.

BOOK REVIEWS

CHEIKHO M. (2002). *Pluridisciplinarité et foresterie : recherche, gestion, pédagogie de projet et formation des ingénieurs forestiers*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1.

Ce travail relève de la Didactique des Sciences forestières.

Une première partie définit les termes « disciplines », « pluridisciplinarité » et « interdisciplinarité », et propose le terme « antédiscipline » pour désigner un champ scientifique qui, au cours de l'histoire, éclate ensuite en plusieurs disciplines. Initialement liée à des pratiques qui se transmettaient par compagnonnage, la formation des ingénieurs forestiers s'est progressivement disciplinarisée. Aujourd'hui, seul l'élève ingénieur doit faire une synthèse pluridisciplinaire des différents contenus qui lui sont enseignés. Le travail de recherche proprement dit comprend deux phases complémentaires, centrées sur l'analyse de la pluridisciplinarité dans toute approche de la forêt. Lors de ces deux phases, sont mises en jeu les mêmes méthodes d'analyse : identification des contenus disciplinaires, analyse des discours par une approche lexicale (logiciel Alceste) et réalisation de conceptogrammes quantifiant, pour chaque acteur ou situation analysés, la fréquence de sous-systèmes identifiés dans le système forêt.

La première phase s'inscrit dans le contexte théorique de la transposition didactique, en recherchant des références possibles pour la pluridisciplinarité de la foresterie dans des entretiens avec des responsables de programmes pluridisciplinaires sur la même forêt (le Mont Ventoux), programmes de recherche et de gestion de cette forêt. Les résultats

montrent la rareté de pratiques interdisciplinaires, ces programmes se limitant le plus souvent à juxtaposer des approches très disciplinaires. Ils montrent aussi que chaque acteur a sa conception de la « même » forêt : c'est par sa pratique qu'il définit « sa » forêt. La formation doit donc perdre son illusion d'une forêt objective qui serait à enseigner, et doit clairement annoncer les pratiques de référence qui finalisent un enseignement. Tout comme Martinand le fait pour l'enseignement technologique, nous insistons donc sur l'importance des pratiques sociales forestières comme références de la transposition didactique, à côté des connaissances scientifiques, pour la formation des ingénieurs forestiers.

La seconde phase de notre recherche analyse des stages de terrain, lors de la formation des ingénieurs forestiers. L'objectif de ces stages est de pratiquer une pédagogie de projet pour introduire les futurs ingénieurs à la complexité pluridisciplinaire de leur futur métier. Les résultats montrent que la pluridisciplinarité dépend du type de stage : soit elle est uniquement centrée sur des contenus scientifiques disciplinaires, soit elle intègre aussi des questions de terrain qui exigent des approches relevant plus des sciences humaines et sociales, qui ne sont que partiellement présentes dans le cursus antérieur de ces futurs ingénieurs forestiers.

En conclusion, un nouveau schéma de la transposition didactique est proposé, qui prend en compte l'organisation de stages de terrain au cours desquels les futurs ingénieurs forestiers sont confrontés à des degrés de complexité que les enseignements disciplinaires de leur cursus n'ont pas pu intégrer : d'une part la complexité de toute forêt qui est à bien des égards unique ; d'autre part la

complexité de leur future pratique professionnelle, qui doit intégrer la singularité des acteurs et situations locales, et la gestion pertinente de questions urgentes. Ce qui nécessite des habiletés non réductibles aux savoirs scientifiques disciplinaires enseignés, dont la mobilisation pluridisciplinaire reste cependant indispensable.

P. Clément

VIENNOT L. avec la collaboration de Besson U., Chauvet F., Colin P., Hirn-Chaine C., Kaminski W., Rainson S. (2002). *Enseigner la physique*. Bruxelles, Paris, De Boeck, 248 p.

Ce texte est fondé sur les recherches didactiques conduites au Laboratoire de didactique des sciences physiques par L. Viennot, professeur à l'Université Denis Diderot (Paris 7) et ses collègues. Il présente une synthèse de réflexions et résultats de nombreuses années de travail. Il s'articule sur l'ouvrage du même auteur, *Raisonner en physique* (publié en 1996 chez le même éditeur, traduction anglaise en 2001, Kluwer) tout en adoptant une perspective bien distincte. L'introduction précise clairement les directions suivies pour la mise en œuvre, les objectifs et la trame conceptuelle de la rédaction. Dans cet ouvrage dense, l'objectif fixé, qui me semble tout à fait atteint, est d'établir les liens essentiels entre la recherche didactique et la pratique de classe dans l'enseignement de la physique de base. Cela est fait principalement à travers une discussion très détaillée de séquences d'enseignement qui se fondent sur des recherches et des expérimentations auprès d'élèves, d'étudiants et d'enseignants (en formation et en activité). Deux questions remarquables du livre concernent des aspects importants de la didactique qui – cela ressort aussi de mon expérience de recherche et d'expérimentation didactique en Italie – se relèvent toujours parmi les plus cruciaux : « Comment proposer une information exploitable à des enseignants qui, quotidiennement, ont à prendre des décisions dans des situations aussi complexes à analyser qu'à gérer, et que, peut-être, ce qu'ils appellent de belles théories ont déçus ? » – comment comprendre et pratiquer les

« détails critiques », c'est-à-dire ces « aspects apparemment mineurs de l'enseignement qui peuvent en fait changer le cours des choses et affecter l'apprentissage ». Les cinq thèmes de physique de base (forces de contact et relation entre frottement et propulsion, pression dans les fluides, superposition des champs électriques, superposition d'ondes cohérentes et imagerie optique, couleur), bien qu'ils n'épuisent pas tous les sujets qui se présentent dans la didactique de la physique, sont emblématiques pour l'enseignement de la physique à la fin de l'école secondaire ou au début de l'enseignement supérieur, car ils touchent à des aspects conceptuels cruciaux, révélateurs de difficultés générales et fortes. De plus, ces sujets ont fait l'objet de beaucoup d'expériences d'enseignement et de résultats de recherche. L'analyse des séquences d'enseignement proposées dans le livre explique aussi les aspects importants de la réaction des enseignants à l'égard de toute innovation didactique qu'on leur propose ; en effet, dans la dynamique même du processus d'enseignement et de l'interaction avec la classe, les enseignants transforment toute innovation et il faut bien tenir compte de l'interprétation à laquelle ils se livrent. Pour chaque thème, la mise en œuvre proposée présente des éléments dont le principe (pas forcément les résultats particuliers) fait déjà l'objet d'un consensus et des éléments nouveaux, soit du point de vue théorique soit sur le plan des procédures. Parmi les premiers : l'attention aux idées *a priori* des élèves (un champ de recherche notoirement bien pratiqué) ; l'importance de fournir des éléments d'évaluation plus ou moins détaillés ; le principe du centrage sur certains aspects de contenu et méthodologiques de la discipline, par exemple ici une modélisation au niveau mésoscopique pour les interactions de contact telles que celles mises en jeu pour le frottement entre solides et la pression dans les fluides (chap. 2, 3) ; parmi les secondes : l'accent sur les détails critiques ; les négliger ou les interpréter de manière inappropriée peut conduire à une transformation de la proposition, en discordance avec sa logique et ses intentions didactiques, tandis que leur gestion adroite et informée peut servir pour amorcer un processus de construction ou de reconstruction de la connaissance ; l'impact des documents graphiques utilisés, qui sont

beaucoup employés comme moyen de communication et d'explication, mais qui suscitent souvent des difficultés de lecture et d'interprétation, lesquelles sont souvent sous-évaluées ou même ignorées. Ici on pose clairement ce problème et on en discute certains aspects importants. Chaque chapitre est suivi de nombreuses références, qui peuvent aider celui ou celle qui voudrait approfondir le sujet ou s'orienter dans les recherches s'y rapportant ; de plus ces chapitres comportent plusieurs annexes qui aident à saisir certains aspects particuliers ou donnent des instruments de travail, tels que des questionnaires ou des résultats sur l'acquisition des connaissances. La conclusion présente une discussion, conduite à partir de l'ensemble des études présentées, sur l'évaluation des séquences d'enseignement en tant que fondation de résultats de recherche. Les difficiles questions de la séparation des variables et du rôle de l'enseignant y sont particulièrement traitées, et font l'objet de points de vue clairement argumentés. En conclusion, ce livre se présente comme une contribution précieuse pour établir des liens entre la recherche didactique et la pratique de l'enseignement. Sa structure et ses contenus sont tels qu'ils rendent bien véridique l'affirmation posée en quatrième de couverture : « L'ouvrage s'adresse aux chercheurs en didactique des sciences, aux professeurs d'IUFM et d'écoles normales, aux formateurs d'enseignants ainsi qu'aux enseignants en physique ». Tous ces groupes peuvent en effet trouver ici de précieux points de réflexion, des suggestions très riches et aussi beaucoup de détails sur des manières de faire. Il faut souhaiter que ce livre puisse servir pour initier des changements de perspective et de pratique : ses lecteurs, comme l'écrit Guy Aubert dans la conclusion de sa préface, sortiront de ce livre « plus éclairés » qu'avant d'y être entrés et attendront le suivant avec impatience, car « la recherche continue ». Souhaitons aussi que cet ouvrage fasse école et que de plus nombreux chercheurs en didactique s'attachent à concilier, comme ici, une recherche approfondie et l'objectif d'en mettre les produits à disposition pour un usage critique dans la pratique enseignante ordinaire.

E. Sassi

WITKOWSKI N. (Dir.) (2001). *Dictionnaire culturel des sciences*. Paris, Éditions du Regard et Seuil, 441 p.

Par ce magnifique *Dictionnaire*, ses éditeurs tentent de « renouer les liens perdus entre les sciences et la culture » (p. 13), dans l'espoir de rapprocher la science de son public, de la rendre intelligible pour tout un chacun. Cette tentative de clarté du propos, exercice difficile, est souvent réussie. Le regard croisé qui nous est proposé entre les sciences et leurs ancrages culturels apparaît nettement lorsqu'on parcourt les différentes notices de cet ouvrage. C'est ainsi par exemple que le Big Bang et l'ADN y sont présents aux côtés de l'alchimie, du rêve et de la poésie, d'écrivains aussi différents que Georges Perec et Goethe. Plus loin, la notice sur « l'eau » est éclairée avec autant de rigueur qu'on l'aborde sur un plan mythique, poétique, chimique ou biochimique. Une centaine de collaborateurs nous proposent ainsi des notices ordonnées alphabétiquement, éclairant les aspects culturels de différents faits scientifiques et les contextes particuliers où ont évolué des écrivains et inventeurs de leur temps.

Bien souvent, les inventions ont été rêvées avant que d'être conçues. Le dessinateur Hergé, et avant lui le romancier Jules Verne, les cinéastes Georges Méliès et Fritz Lang avaient déjà raconté de manière détaillée et plausible des voyages dans l'espace et sur la Lune. Le mot « fusée » existait bien avant que l'on puisse en construire de véritables. Les androïdes et les machines humaines ont été évoqués par le roman *Frankenstein* de Mary Shelley (p. 184) et l'*Ève future* de Villiers de L'Isle-Adam (p. 425), longtemps avant les expériences génétiques que nous connaissons.

Faire référence au contexte culturel des inventions scientifiques représente une dimension généralement sous-estimée mais essentielle d'un enseignement des sciences ayant plus de sens. Ce dictionnaire constitue une source documentaire stimulante à cet effet.

La liste des notices (noms propres et noms communs) du *Dictionnaire culturel des sciences* est invitante et très variée : on passe

aisément des mots « acronyme » où l'on apprend la signification du mot « Laser », à Welles (Orson), pour évoquer la radiodiffusion, en 1938, d'une émission de radio qui – involontairement – fit croire durant quelques heures que l'Amérique était attaquée par des Martiens. La caractéristique commune de toutes les entrées réside dans l'aspect familier des objets scientifiques qui y sont décrits : l'Atlantide, le Saint-Suaire de Turin, la téléportation. Peu importe que certains de ces objets n'existent pas vraiment, ils portent en eux un attrait indéniable, peut-être parce qu'on sait que le rêve technicien trouve souvent les moyens de sa concrétisation, pour le pire et parfois pour le meilleur. Les controverses que certains objets alimentent à l'occasion ne font qu'augmenter la pertinence sociale de leur étude.

Je soulignerai l'intérêt particulier des notices rédigées par Jean-Marc Lévy-Leblond qui proposent en quelques paragraphes des descriptions synthétiques de différents personnages et notions scientifiques rattachés à des éléments importants de leur ancrage culturel. En ce sens, son texte sur la « culture » retrace admirablement l'évolution des liens entre les sciences et la culture au fil des siècles. Au xvii^e siècle, les arts et les sciences étaient considérés comme un tout cohérent et ce, jusqu'à l'époque de l'*Encyclopédie* (cette imbrication peut être illustrée par le cas de Galilée, qui était à la fois dessinateur et physicien ; mentionnons également la notice sur Goethe). La rupture s'est imposée par la suite : « Au xix^e siècle, le divorce est consommé ; l'institutionnalisation de la science dans les universités et les académies les sépare des arts et des lettres », écrit Jean-Marc Lévy-Leblond (p. 121). Certaines exceptions devraient pourtant nous amener à questionner cette conception dichotomique. Pensons à Gaston Bachelard qui a cultivé une réflexion épistémologique et une méditation poétique, ou au poète et inventeur Charles Cros (p. 120). Sciences et culture... le côté jour, le

côté nuit, d'une même invention et parfois d'un même inventeur.

Ce livre d'une grande originalité est une porte qui s'ouvre généreusement sur tout un univers imaginaire qui habite les sciences. L'iconographie de l'ouvrage nous enchante en bien des endroits par la pertinence et la beauté des œuvres choisies (personnages importants, toiles célèbres, photographies de l'espace), bien que certaines photos ne soient pas légendées convenablement, laissant quelquefois un mystère sur la date et la provenance de leurs représentations, comme cette étonnante image ancienne des « zones de l'inconscient » (p. 229). Les illustrations transportent le lecteur de sa lecture à la rêverie, une rêverie qui peu à peu le conduit à mieux saisir que les créations artistiques qu'on lui propose interprètent et nourrissent le fait scientifique. L'esthétique proposera même un regard plus ou moins critique sur le développement des sciences. Manquent cependant des aspects politiques et éthiques que l'on pourrait associer à ces moments d'histoire et de sociologie des sciences. Ceux-ci peuvent, bien entendu, être rattachés aux intentions des éditeurs qui se proposent de rapprocher sciences et citoyens, de par la facture même de l'ouvrage. On pourrait souhaiter que l'équipe de collaborateurs qui s'est réunie autour de la création de ce dictionnaire nous enchante à nouveau, mais à partir de points de vue plus critiques.

Cet ouvrage exceptionnel servira certainement aux enseignants, aux professeurs de sciences et aux chercheurs en didactique des sciences, tout comme aux universitaires qui s'intéressent aux sciences d'un point de vue interdisciplinaire. On ne peut que souhaiter qu'il se trouve disponible rapidement sur les tablettes des bibliothèques publiques, institutionnelles et scolaires.

B. Bader