

Lancer une revue internationale de didactique des sciences et des techniques fut un pari réussi grâce à la volonté d'une équipe au sein de laquelle Andrée Tiberghien joua un rôle majeur. Qu'elle trouve ici l'expression des remerciements de tous ceux qui participent à Didaskalia.

Martine Méheut, nouvelle co-présidente du comité de rédaction, a, en tant que rédactrice en chef, favorisé l'insertion de la revue dans la communauté francophone des didacticiens des sciences et techniques. Je n'entends pas, en lui succédant, apporter des bouleversements majeurs ; et l'absence dans ce numéro d'un compte rendu d'innovation est à mettre sur le compte de problèmes techniques et non sur un changement d'orientation. Les articles dans ce domaine sont toujours les bienvenus.

Jean-Michel Dusseau
Rédacteur en chef



Mise au point d'un instrument d'analyse de l'évolution des représentations du problème pendant la résolution de problèmes de mécanique en groupes

An analysis tool for following the problem representation elaborated by pupils working in small groups

Andrée DUMAS-CARRÉ

IUFM d'Aix-Marseille et CIRADE Université de Provence
32 rue Eugène Cas
13004 Marseille, France.

Leonidas GOMATOS

Associé au GDSE P7
Institut de Formation Professionnelle de Sparte
Leoforos Gythiou
23100 Sparte, Grèce.

Résumé

La résolution de problèmes est un des grands axes de recherche de la didactique des sciences. Or, on ne trouve que relativement peu de travaux sur la résolution en groupes. Les difficultés méthodologiques d'approche et

d'analyse de telles activités doivent avoir contribué à ce que le champ ci-dessus soit peu exploré. Dans cet article nous décrivons la mise au point d'un instrument d'analyse qui nous a servi dans le but de suivre l'évolution des représentations du problème construites par des élèves au cours de la résolution en groupes de problèmes de mécanique et nous discutons sur ses possibilités et ses limites.

Mots clés : *méthodologie, analyse, représentations du problème, résolution, groupe.*

Abstract

Problem solving is one of the main research axes in science education. However, one can find only few works on group problem solving. The methodological difficulties of approach and analysis of such activities must have contributed to the fact that this field is not well explored. In this paper we describe the construction of an instrument of analysis that helped us in following up the evolution of students' problem representations during group problem solving in mechanics and we investigate its possibilities and its limits.

Key words : *instrument, analysis, problem solving, group, problem representation.*

Resumen

Ahora, la resolución de problemas esta una de las mas importantes orientaciones de las investigaciones en didactica de la ciencias. Pues, existant relativamente poco trabajos sobre la resolución de problemas en pequenos grupos. Las dificultades metodologicas para observar y analizar estan, seguramente, responsables de eso. En este articulo vamos a presentar un instrumento establecido para analizar y para seguir la evolucion de la « representacion del problema » que los estudiantes construyen durante la resolución de problemas de mecanica. Despues, discutimos de sus posibilidades y de sus limitaciones

Palabras claves : *instrumento, analisis, resolución de problemas, grupo, representacion del problema.*

1. DES ACTIVITÉS DE RÉOLUTION DE PROBLÈMES EN GROUPES

Les activités de résolution de problèmes, que ce soit dans la classe ou dans le travail à la maison, occupent une grande partie du temps de

l'enseignement des sciences physiques. Elles sont aussi l'objet de nombreuses recherches en didactique des sciences physiques. Les problèmes étudiés par ces recherches sont de deux types (Goffard, 1990) :

- d'une part, des recherches visant à mettre au point des techniques et à enseigner des procédés de résolution pour des problèmes classiques, comme ceux que l'on trouve dans les manuels scolaires,
- d'autre part, des recherches qui explorent la possibilité d'utiliser des problèmes pour faire apprendre les concepts de physique aux élèves, en redéfinissant les problèmes eux-mêmes ainsi que les rôles respectifs du maître et des élèves.

Nous nous situons dans ce deuxième courant. Nous suivons de près des élèves qui résolvent des problèmes ouverts dans un environnement particulier, caractérisé par le fait que les élèves résolvent en petits groupes de trois ou quatre.

Pourquoi des problèmes ouverts et pourquoi en petits groupes ? Ces choix s'appuient à la fois sur un courant actuel de recherches en matière de résolution de problèmes de physique et sur les théories actuelles de la psychologie cognitive.



Figure 1 : **Changement de référence**

Prenons d'abord la littérature de recherche concernant la résolution de problèmes de physique. Certains chercheurs (Gil Perez & Martinez Torregrossa, 1983, 1987) ont proposé un changement de la référence servant à analyser les activités des élèves (figure 1).

Ce changement, fondé sur une analyse épistémologique et didactique, conduit à définir de nouvelles activités pour les élèves dans la classe, activités qui doivent être homologues à ce qui est essentiel et déterminant dans le travail du chercheur scientifique.

Ceci conduit à modifier le type des tâches traitées : pour un chercheur scientifique il s'agit de problèmes ouverts. Une autre modification est liée au caractère social du travail ; un chercheur scientifique participe à des groupes de recherche (il est très rare, en physique, qu'un chercheur travaille seul) ; cela fait partie de la recherche que de communiquer ses idées et ses résultats de telle façon qu'ils puissent être discutés. Pour être cohérent avec la pratique de référence « chercheur scientifique » il faut donc modifier le type des tâches proposées aux élèves et prévoir des activités de travail en commun dans la classe.

Du côté de la psychologie cognitive : selon un point de vue constructiviste des apprentissages, les connaissances ne se transmettent pas tout élaborées. Les connaissances d'un individu résultent d'un processus de construction personnelle. Le processus de construction des connaissances passe par l'expérimentation avec les objets et avec l'environnement. Ce point de vue néglige l'aspect social de l'environnement. Cette non prise en compte, repérée dans la psychologie cognitive et dans l'œuvre de Piaget, a été critiquée par le courant de la psychologie sociale du développement cognitif (Mugny, 1985). Dans leurs travaux, les représentants de ce courant marquent le passage d'une psychologie bipolaire (sujet-objet) à une psychologie tripolaire (sujet-autrui-objet). Les fondateurs de la psychologie sociale génétique s'inspirent largement des travaux de Vygotsky. Selon Vygotsky « *un processus interpersonnel se transforme en un processus intrapersonnel* » puisque « *chaque fonction apparaît deux fois dans le développement culturel de l'enfant : d'abord entre individus (interpsychologique) et, ensuite, dans l'enfant (intrapychologique)* » (Vygotsky, 1978, p.18). Le même auteur critiquant le livre de Piaget « *Le langage et la pensée chez l'enfant* » (Piaget, 1989) souligne : « *la vraie direction du développement de la pensée ne va pas de l'individuel au social, mais du social à l'individuel* » (Vygotsky, 1985, p. 21).

L'interaction sociale est donc génératrice du progrès cognitif ; deux mécanismes ont été spécialement étudiés : le conflit sociocognitif (Mugny, 1985) et la coopération pure (Amigues, 1988).

Les recherches sur la résolution collective des problèmes en sciences présentent une orientation différente de celles menées par la psychologie sociale. Dans ces dernières on trouve souvent un effort de mise en relation de l'efficacité du groupe avec des paramètres tels que la structure du groupe, le leadership, la compétitivité (Faucheux & Moscovici, 1960 ; Georgeas, 1986). Dans ces recherches, l'efficacité est mesurée facilement grâce au caractère fermé des tâches proposées. Pour la résolution de problèmes en sciences l'« *efficacité* » est plus compliquée à définir et à mesurer. Bien qu'on trouve des recherches sur le thème esquissé plus haut (Gayford, 1992), les tendances actuelles sont plutôt soit d'analyser les énoncés des élèves durant la résolution collective (Amigues, 1988 ; Kempa & Ayob, 1991) soit de porter une attention spéciale à la préparation et la mise en place de séances d'apprentissage qui comportent des phases de résolution collective et des phases de discussion collective des propositions des différents groupes (Dumas-Carré & Goffard, 1993, 1997).

Nous nous intéressons particulièrement à la **représentation du problème** que se font les élèves. Cette notion occupe une place centrale dans les recherches en résolution de problèmes. La représentation du problème est une analyse de la situation physique. Cette analyse n'est pas

en termes mathématiques, elle est plutôt qualitative. De plus elle n'est pas statique, elle évolue chez l'individu tout au long de la résolution. Élaborer la représentation d'un problème ou d'une situation c'est « traduire » ; c'est passer d'une description en termes d'événements à une description impliquant les concepts de la physique.

La phase d'élaboration de la représentation du problème est supposée exister chez l'expert mais être absente chez le novice pour certains auteurs (Larkin & Reif, 1979). Par contre chez d'autres auteurs (Chi et al., 1982) elle est considérée comme présente, même chez les novices. Quel que soit le résolveur, sa complétude et sa qualité jouent un rôle déterminant pour la résolution du problème.

La question que nous posons est la suivante :

« Comment évoluent les représentations du problème que se font les élèves engagés dans un travail de résolution de problèmes en groupes ? »

2. TYPE DE MATÉRIEL RECUEILLI

Nous avons conçu une expérimentation afin de répondre à cette question. Pour ce faire il est indispensable de procéder à une analyse fine, qualitative des interactions verbales aussi bien entre élèves qu'entre élèves et professeur.

L'expérience a lieu dans une classe de seconde d'un lycée à Athènes durant toute l'année scolaire 1991-92 (Gomatos, 1996). L'un de nous était chargé des cours de sciences physiques dans cette classe. Il procédait à deux types de séances : des cours de présentation des concepts et des lois et des séances, plus nombreuses, de résolution de problèmes. Ces problèmes ont été, dans leur quasi-totalité, des problèmes ouverts. Voici certains exemples d'énoncés.

« **Le cube** »

Quelle est la force minimale qu'il faut exercer pour tenir un cube en bois contre le mur ?

« **Objet sur un plan incliné** »

Nous plaçons un objet Σ sur une surface inclinée d'un angle ϕ par rapport à l'horizontale et nous le laissons libre. Prévoir sa situation cinétique à partir du moment où il est lâché.



Il est évident que de tels problèmes ne sont pas aussi ouverts que ceux des chercheurs scientifiques. Mais il existe une ouverture en ce qui concerne certaines conditions (de fonctionnement ou initiales), il est à la charge des élèves de les préciser, en ce qui concerne les données (il n'y en a pas du tout ou il en manque certaines) et en ce qui concerne la modélisation (plusieurs sont possibles ; par exemple pour le contact entre le plan incliné et l'objet, il peut ne pas y avoir de frottement ou il peut exister différents types de frottements), c'est aux élèves de choisir et de préciser quelle modélisation ils adoptent. De plus cette ouverture est pertinente par rapport à ce que nous cherchons car elle met les élèves en situation d'exprimer, de rendre publiques leurs représentations de la situation.

L'avancement de la résolution n'est ni facile ni synchrone dans tous les groupes. Des difficultés pour préciser la situation à étudier, des retours en arrière etc. sont très souvent remarqués. Le professeur n'est pas absent par rapport à tous ces événements, il écoute au maximum les discussions au sein des groupes ; il ne répond aux questions que posent les élèves que par de nouvelles questions qui peuvent conduire leur investigation. **Il évite de proposer des chemins plus courts ou d'effectuer des corrections.** En effet, il s'agit, pour les élèves, de phases de recherche qui, même si elles paraissent longues, sont indispensables (dans le modèle d'activités cognitives de résolution de problèmes que nous avons retenu). Elles sont indispensables pour la mobilisation cognitive des élèves et pour la construction des connaissances.

Les séances sont enregistrées sur magnétophone. Pendant les phases de travail en petits groupes le magnétophone est placé sur la table du groupe concerné et enregistre toute la discussion ; ensuite, pendant les phases de discussion de classe, toutes les interventions (du professeur et de tous les élèves) sont enregistrées. Le magnétophone est accueilli avec une certaine hésitation au début. Aux questions des élèves sur la raison de la présence du magnétophone nous répondons que, de cette façon, nous pourrions dépister leurs difficultés et que ceci n'a rien à voir avec une quelconque évaluation. Chemin faisant la présence du magnétophone n'impressionne plus les élèves. Ceux-ci nous donnent l'impression de se comporter naturellement, comme en témoignent les passages où ils ne font aucun effort pour dissimuler leurs discussions hors sujet.

Les séances sont par la suite transcrites intégralement¹. Ces transcriptions sont faites dans un format particulier : une colonne est réservée aux énoncés de chaque élève tandis que la colonne de gauche accueille le temps écoulé depuis le début de la discussion du groupe (voir l'annexe 1). Cette forme présente des avantages concernant l'exploitation du matériel. On peut suivre aisément, simultanément, l'avancement du groupe et l'avancement de chaque élève séparément.

Le lecteur peut se faire une idée de ces discussions en groupes en lisant la transcription d'une partie d'une séance présentée dans l'annexe 1. Le problème que résolvent ces élèves est le « PLAN INCLINÉ » cité plus haut. Dans cette séance les élèves ont travaillé en groupes d'abord puis ils ont donné une réponse individuelle, par écrit, à la fin. Dans sa réponse écrite, après le travail de groupe, une des filles de l'équipe, V, prévoit que le mouvement du corps sera décéléré et ceci est donné comme prévision globale sans tenir compte des différentes phases du mouvement. Prévision bizarre du point de vue de l'expert que nous essayerons d'éclairer un peu à partir de la transcription. Dans l'annexe 1 (14 min < t < 15 min) nous retrouvons la prévision erronée de V :

« Accéléré non. Il est décéléré »

mais en allant un peu plus haut (12 min < t < 13 min) nous trouvons une idée qui peut éclairer un peu ce que V prévoit :

« À un certain instant sa vitesse deviendra zéro, n'est-ce pas ? »

Il est intéressant de voir comment cette idée, cette conception de V que le corps doit s'arrêter dans tous les cas, l'amène à changer d'avis (elle a auparavant déclaré que le corps, dans le cas sans frottement, aurait un mouvement accéléré). Ceci est aussi la source d'une confrontation entre R et V (t = 15 min) qui aboutit à ce que R accepte aussi la prévision de V :

« Donc il sera décéléré ».

Par contre C n'est pas déstabilisé, de plus, il est le seul à avoir explicitement fait un découpage en différentes phases de mouvement.

Prenons un autre exemple qui montre l'influence d'une intervention du professeur. Il s'agit de la séance « UN GROS MONSIEUR SUR LA LUNE ». À la 21^e minute de la discussion, L, une des filles, dit au professeur de la part du groupe :

« Non parce que la masse de la Terre est plus grande que celle de la Lune, ce qui conduit à ce que la force d'attraction qu'exerce la Terre sur l'homme est plus grande que la force d'attraction qu'exerce la Lune sur l'homme. »

Le professeur essaye de rappeler aux élèves la loi de l'attraction universelle :

« Elle nous dit alors que la force d'attraction entre deux corps dépend de leurs masses mais aussi de la distance entre eux. »

L réagit immédiatement :

« Mais attends... Si la distance de la Lune... De l'homme et de la Lune, la distance diffère de la distance sur la Terre, de sorte que, comment

l'expliquer, de sorte que la Terre exerce d'un côté une plus grande force d'attraction du fait qu'elle est une plus grande surface, mais en même temps elle se trouve à un rayon plus petit avec l'homme que sur la Lune. Comment va-t-on calculer alors ? »

Le souci de L de prendre en compte un deuxième paramètre est apparent. Une discussion s'amorce autour de cette idée. Les élèves n'en sortent pas. Ils finissent par prétendre que ce deuxième paramètre joue dans le même sens que la masse quant à la détermination de la force d'attraction ! L'essentiel est pourtant qu'ils se soient intéressés à cette question et qu'il y ait eu un « écho » à l'intervention du professeur.

3. MISE AU POINT D'UN INSTRUMENT D'ANALYSE

Pour systématiser toutes ces observations nous avons mis au point un ensemble de grilles d'analyse, un instrument de suivi de l'évolution de la représentation du problème que se font les élèves.

3.1. Les représentations intermédiaires du groupe PROPHY

La proposition du groupe PROPHY² (Caillot & Dumas-Carré, 1987) a été centrale dans la construction de notre instrument. Le groupe, s'appuyant sur le présupposé de l'importance critique de la représentation du problème pour la résolution de celui-ci, propose des *représentations intermédiaires* et met au point des *aides métacognitives* pour guider l'élaboration de chacune d'elles.

Une représentation intermédiaire se situe entre la description verbale de l'énoncé, qui comporte principalement des objets et des événements, et la description formelle en termes de concepts physiques quantitatifs. Chacune des représentations intermédiaires proposées par le groupe ne prend en compte qu'un seul aspect de la situation à la fois, un seul type de descripteur soit une seule grandeur physique. Chaque fois que ceci est possible, la représentation intermédiaire est faite au moyen de concepts intermédiaires, par exemple en termes d'interactions (concept semi-quantitatif et précurseur de celui de force) et non pas en termes de forces.

Nous pouvons repérer dans l'approche de PROPHY un double mouvement

– analytique d'abord car, par la focalisation sur un seul descripteur à chaque étape, on procède à un « éclatement » de la situation, à une réduction de la difficulté de l'élaboration et ceci permet un repérage fin des difficultés des élèves ;

– synthétique, par la suite, car ces représentations intermédiaires ne restent pas isolées mais sont articulées dans un schéma unique. Il s'agit là d'une **structuration** des représentations isolées dans laquelle tous les descripteurs apparaissent ensemble et reliés.

Les quatre représentations intermédiaires proposées par le groupe sont, la représentation temporelle ensuite complétée en représentation spatio-temporelle, la représentation cinétique et le diagramme objets-interactions.

La représentation temporelle consiste en un repérage des instants caractéristiques du déroulement du phénomène (elle ne concerne donc pas les problèmes de statique). Une fois les instants repérés, le phénomène est découpé en phases (la durée entre deux instants caractéristiques).

La représentation spatio-temporelle consiste à associer les configurations spatiales des différents objets aux instants caractéristiques et pendant les phases.

La représentation cinétique résulte d'une analyse des mouvements. Il est demandé aux élèves de repérer les objets qui sont au repos et ceux qui sont en mouvement ; de repérer les objets qui « bougent ensemble » (analyse des contraintes de la situation) ; de repérer, autant que faire se peut à ce niveau de description préalable, les vitesses constantes et les vitesses variables.

La représentation interactionnelle consiste à dessiner tous les objets présents dans la situation décrite par le problème et les interactions entre ceux-ci, en différenciant (par un code graphique) les interactions de contact des interactions à distance. Cette représentation intermédiaire privilégie l'emploi du concept d'interaction au lieu de celui de force car il présente certains avantages : il n'exige pas la définition préalable d'un système, comme c'est le cas pour la force, et il fait apparaître la symétrie des interactions.

Ces représentations sont partielles par rapport aux descripteurs mais complètes par rapport à l'évolution, au déroulement dans le temps du phénomène. Une représentation partielle est composée de plusieurs éléments.

Les productions de représentations intermédiaires des élèves sont concrétisées dans la *bande dessinée*. La figure 2 donne un exemple de bande dessinée et précise les codes du Diagramme Objets Interactions (appelé DOI dans la suite) (extrait de Dumas-Carré & Goffard, 1993)

Étudions le système suivant :

Deux blocs A de masse m_A et B de masse m_B sont reliés par un fil. Ce fil est inextensible et sa masse est négligeable devant m_A et m_B .

Le bloc A est sur une table horizontale et le contact est sans frottement. Le fil passe par une poulie parfaite (sans frottement et de masse négligeable) fixée à l'extrémité de la table. Le bloc B pend au bout du fil.

À l'instant désigné par t_1 , le bloc B touche le sol. Déterminer l'accélération du bloc A pour $t < t_1$ et $t > t_1$

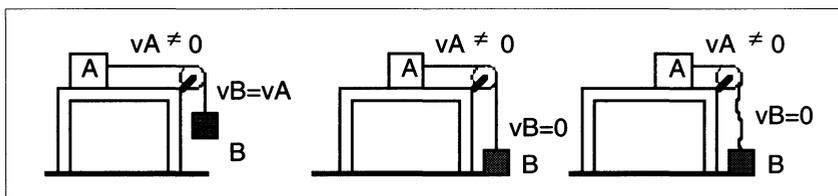
Représentation temporelle

$t < t_1$

$t = t_1$

$t > t_1$

Représentation spatio-temporelle et cinétique



Diagrammes Objets Interactions Associés⁴

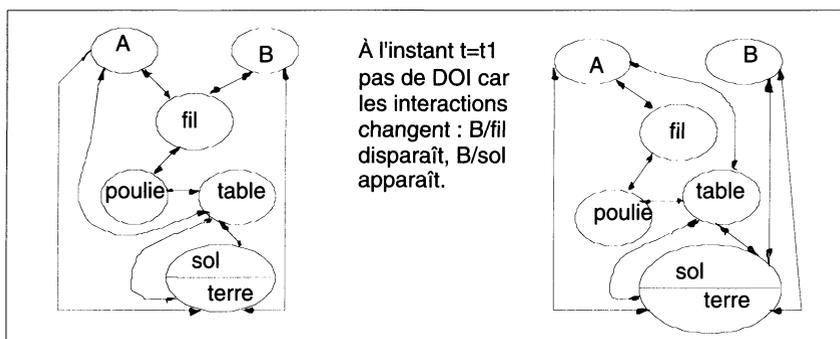


Figure 2 : La bande dessinée de la situation

Les propositions du groupe PROPHY ont été essayées dans des classes de lycée et ont été positivement évaluées (Dumas-Carré, 1987).

3.2. Suivi de l'élaboration de la représentation

Nous cherchons à caractériser comment, pour chaque élève et pour l'ensemble du groupe, évolue la représentation du problème. Dans la transcription de la discussion de groupe nous retenons, pour chaque élève, les énoncés « porteurs d'information sur sa représentation du problème » c'est-à-dire presque tous les énoncés sauf ceux complètement hors sujet (par exemple quand ils parlent du fonctionnement du magnétophone) ou ceux de pur traitement mathématique en fin de résolution (nous considérons qu'alors la représentation n'évolue plus et que l'activité intellectuelle des élèves est d'un autre ordre). Pour cela nous définissons différentes dimensions de l'évolution de la représentation en utilisant le découpage en descripteurs différents du groupe PROPHY.

Un axe d'analyse est l'axe **partialité-globalité**. Pour les problèmes de mécanique considérés, la représentation concerne quatre descripteurs différents : Espace (E), Temps (T), Interactions (I), Mouvements (MV). Chaque énoncé d'élève peut constituer un élément de l'une des représentations partielles (se référant à un seul descripteur à un seul instant ou pour une seule phase). Par exemple, pour le problème du plan incliné, un élève qui parle de la force exercée par le plan sur l'objet pendant la descente (une seule phase considérée, un seul descripteur envisagé ; c'est un élément de la représentation partielle concernant les interactions). Un énoncé d'élève peut aussi comporter plusieurs de ces éléments de représentations partielles (référence à plusieurs descripteurs ou au même descripteur à des instants différents) en les juxtaposant ou en les articulant.

Élaborer une représentation globale qualitative du problème passe par la mise en place des représentations partielles. L'apparition, pour la première fois, chez un élève donné, d'un élément nouveau d'une représentation partielle sera qualifiée de **développement** de la représentation.

Mais ni les éléments de représentations partielles ni même les représentations partielles complètes seules ne suffisent pour construire la représentation globale. Il faut qu'un mouvement « synthétique » s'effectue aussi, de façon que les représentations partielles s'articulent. Ceci sera qualifié de **structuration** de la représentation que se fait l'élève. Nous parlerons de structuration chaque fois que, dans un même énoncé, un élève utilisera plusieurs descripteurs différents ou le même descripteur à des instants différents⁵.

Un élève peut expliciter plusieurs fois le même élément de la représentation qu'il se fait du problème. Il s'agit de répétitions qui ne constituent pas un développement. Parfois ce même élément peut concerner deux cas, deux modélisations différentes de la situation étudiée. Par exemple, pour le problème du plan incliné, un élève parle de la force plan/corps dans un cas sans frottements et il parle plus loin de la force plan/corps dans un cas avec frottements. Dans les deux cas il s'agit du même élément de la représentation interactionnelle mais chacune de ces forces concerne une modélisation différente. Nous dénommons ce cas là **changement de modélisation**. Il se peut aussi que ce même élément de la représentation de l'élève soit exprimé à un niveau de formulation différent. Dans ce cas nous parlons de **changement de registre de formulation**⁶. Finalement il arrive qu'un élément de la représentation de l'élève soit exprimé de façon telle qu'il contredise un énoncé précédent du même élève. Nous parlons dans ce cas de **remplacement** de cet élément par un nouvel élément.

En résumé notre analyse de l'évolution de la représentation d'un élève consistera à catégoriser chaque énoncé porteur d'information sur la représentation dans l'une des cinq catégories définies ci-dessus **développement, structuration, changement de modélisation, changement de registre de formulation** ou **remplacement**.

Pour suivre l'évolution de la représentation du problème nous allons utiliser les catégories élaborées au paragraphe précédent. Mais pour cela il est nécessaire de décrire et caractériser davantage chaque élément de représentation ainsi que son contexte d'apparition. Nous avons donc procédé à un recueil systématique des informations concernant la représentation du problème que se fait chaque élève au moyen de grilles d'analyse⁷ dans lesquelles les catégories précédentes figurent en colonne 4, les autres colonnes décrivant et caractérisant le contexte (voir la forme de ces grilles en annexe 2).

Dans la colonne de gauche nous notons le temps.

Dans la colonne suivante nous écrivons intégralement les phrases porteuses d'information sur la représentation du problème que se fait l'élève concerné ; ce sont les données brutes sur lesquelles nous allons travailler. La seule différence entre la transcription et cette colonne est la suppression de ce qui ne concerne pas la représentation du problème et la partition élève par élève. Chaque phrase est numérotée de façon à pouvoir y faire référence vite et sans ambiguïté.

3.2.1. Colonne « *descripteur* »

Dans cette colonne nous extrayons l'information « physique » : de quel(s) descripteur(s) est-il question ? Ceci est nécessaire pour faire la différence entre un simple développement et une structuration.

Notre grille est celle décrite par le groupe PROPHY : TEMPS (T), ESPACE (E), INTERACTIONS (I), MOUVEMENT (MV). Si l'énoncé étudié comporte des références à deux descripteurs, nous notons les deux par exemple MV+E ou T+MV etc.

3.2.2. Colonne « *contextualisation* »

La « contextualisation » constitue notre réécriture de ce que l'élève a dit, à savoir ce que nous inférons de la phrase correspondante écrite dans la deuxième colonne. C'est une reprise résumée et synthétisée de l'énoncé correspondant de l'élève⁹.

Cette réécriture implique une certaine interprétation de notre part que nous essayons de minimiser à chaque fois en restant au plus près de ce qu'a dit l'élève et en validant par ce qui est dit ensuite. Cette réécriture (bien que dangereuse, en ce sens qu'elle introduit une part d'interprétation) est nécessaire compte tenu du caractère « verbal » (phrases mal construites et incomplètes) des données brutes. Étant plusieurs analystes nous avons besoin de nous mettre d'accord sur ce que nous allions interpréter, cette phase de synthèse/réécriture servait à cela.

3.2.3. Colonne « *type d'approche* »

Nous distinguons deux types d'approche de l'élève quant à ce qu'il exprime. Soit il évoque simplement un objet sans proposer quoi que ce soit concernant cet objet (qualité, propriété, valeur etc), soit il parle d'un objet particulier en exprimant une proposition à son sujet. Par conséquent, dans cette colonne, nous caractérisons les énoncés recensés selon deux qualifications :

– des propositions (**PR**) ; il s'agit d'un énoncé qui révèle une idée de l'élève, par exemple : « *il ira vers le bas* » (R), « *Alors... ceci est perpendiculaire* » (C) ;

– des références (**RF**) ; il s'agit des énoncés qui dévoilent le point d'intérêt de l'élève au moment de l'énoncé mais rien de plus (exemple, lors de la séance des DISQUES TOURNANTS un garçon dit « *C'est S que nous avons appelé la distance* » ce qui montre que le point d'intérêt concerne la distance entre les deux disques mais ne dit rien de plus).

Toute proposition est aussi une référence mais une référence n'est qu'une simple référence. Cette caractérisation nous a semblé importante car, vis à vis de l'avancement de la construction de la représentation du problème ces deux approches ne jouent pas le même rôle. Seules les propositions sont efficaces pour l'élaboration. Les références (pour tous les problèmes et pour tous les élèves) sont beaucoup plus nombreuses que les propositions.

3.2.4. Colonne « type d'évolution de la représentation »

Dans cette colonne nous retrouvons les catégories élaborées précédemment qui caractérisent la façon dont la représentation évolue, élève par élève, que nous codons respectivement DEV pour développement, STR pour structuration, CRF pour changement de registre de formulation, CDM pour changement de modélisation et RPL pour remplacement.

Enfin, dans cette grille, nous allons aussi tenter d'analyser les interactions entre élèves, les effets que certaines déclarations d'un élève donné (ou du professeur) peuvent avoir sur l'évolution de la pensée des autres. Pour cela, nous notons, éventuellement, dans une dernière colonne les influences de ce qui a précédé sur l'énoncé de l'élève. En ce qui concerne les influences deux points sont à rapporter : la personne qui est à l'origine de l'influence et le type d'influence. Nous caractérisons pour la suite deux types d'influence :

- même référence (MR) ; l'élève est amené à penser à un élément sous l'influence d'un autre élève sans nécessairement adopter son point de vue. Il y a, en quelque sorte, entraînement vers une même focalisation ;
- même idée (MI) ; l'élève adopte l'idée d'un autre [R par exemple a adopté l'idée de V (que le mouvement sera décéléré), dans la partie de la discussion présentée auparavant].

Comme pour la caractérisation précédente celle-ci ne concerne pas un énoncé pris isolément : c'est une interprétation qui prend en compte toutes les interventions qui ont précédé, de la part des autres élèves du groupe et aussi du professeur.

Le lecteur trouvera en annexe 3 les catégorisations des énoncés d'une élève (V) effectuées en employant l'instrument d'analyse mis au point. Ces énoncés proviennent de la partie de la séance du PLAN INCLINÉ que nous présentons dans l'annexe 1.

4. LES RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons déclaré vouloir suivre l'évolution de la représentation construite par les élèves en groupe. Ceci s'appuie sur l'hypothèse qu'il y a effectivement une évolution c'est-à-dire que, pour chaque nouvelle intervention, il existe un minimum de prise en compte de ce qui a précédé ; la conversation entre les élèves doit présenter un minimum de continuité, de fluidité, ne pas être un enchaînement de déclarations isolées et personnelles.

4.1. Continuité de la construction

À la simple lecture des transcriptions on constate que la conversation est effectivement fluide, les interventions des différents élèves s'enchaînent sans rupture, sans longs silences, sans efforts apparents pour maintenir le contact et que tous les élèves du groupe y sont impliqués.

Pour juger de la continuité, c'est-à-dire du fait que, en intervenant au temps *t*, un élève prend en compte ce qui a précédé, c'est la dernière colonne : « influence » de la grille d'analyse qui va être exploitée en utilisant d'une part la différence faite pour caractériser un énoncé entre proposition et référence et, d'autre part, la différence faite à propos des influences entre « même idée » et « même référence ».

Les tableaux 2, 3 et 4, correspondent à trois séances différentes. Ils sont constitués de la façon suivante :

- dans la colonne **I** est reporté le nombre total d'énoncés de l'élève concerné ;
- dans la colonne **II** est noté le nombre d'énoncés « influencés » : ceux qui sont en continuité avec un énoncé précédent d'un autre élève ;
- la colonne **III** donne le nombre d'énoncés qui peuvent être caractérisés comme proposition ;
- la colonne **IV** donne le nombre de propositions que l'on peut considérer comme « influencées » ;
- enfin, la colonne **V** donne le nombre de propositions « influencées » et qualifiées de « Même Idée » c'est-à-dire le nombre d'énoncés de l'élève concerné reprenant une proposition déjà énoncée par un autre élève.

Les colonnes suivantes présentent en pourcentages :

- le rapport énoncés « influencés »/énoncés totaux qui donne une idée globale de la continuité ;
- le rapport propositions « influencées »/propositions totales qui donne une idée de l'importance des influences sur ce qui participe efficacement à l'élaboration de la représentation (les propositions) ;
- le rapport propositions « influencées » même idée/propositions totales qui donne une idée de l'efficacité de ces influences (celles qui entraînent l'adhésion).

ÉLÈVE	I	II	III	IV	V	II/I	IV/III	V/III
M	7	2	6	2	0	28,5 %	33,3 %	0
Ch	8	5	5	4	1	62,5 %	80 %	20 %
A	7	3	6	3	2	43 %	50 %	33 %
J	4	3	4	3	0	75 %	75 %	0
ÉQUIPE	26	13	21	12	3	50 %	57 %	14 %

Tableau 1 : Séance « LES DISQUES TOURNANTS »

Le lecteur peut remarquer le faible nombre d'énoncés porteurs d'informations par élève et par séance. Ceci est dû au fait que souvent les énoncés ne sont pas entiers, ils sont coupés (interruption par un camarade ou phrase non finie) de telle façon que nous ne pouvons pas leur attribuer un sens bien déterminé. On trouve aussi des phrases qui ne sont pas bien articulées d'un point de vue syntaxique et dont l'interprétation est risquée. De telles phrases n'ont pas été recensées. De plus nous rappelons que nous ne recensons ici que ce qui se réfère aux descripteurs choisis. Les phrases portant sur la stratégie ou sur l'organisation du travail de l'équipe n'apparaissent donc pas dans les tableaux.

ÉLÈVE	I	II	III	IV	V	II/I	IV/III	V/III
S	11	7	4	2	0	64 %	50 %	0
C	23	12	19	12	4	52 %	63 %	21 %
R	17	11	15	11	4	65 %	73 %	27 %
V	9	5	7	4	0	56 %	57 %	0
ÉQUIPE	60	35	45	29	8	58 %	64 %	18 %

Tableau 2 : Séance « PLAN INCLINÉ »

ÉLÈVE	I	II	III	IV	V	II/I	IV/III	V/III
J	7	4	7	4	1	57 %	57 %	14 %
I	2	2	2	2	0	100 %	100 %	0
L	9	7	9	7	2	78 %	78 %	22 %
A	4	1	4	1	0	25 %	25 %	0
ÉQUIPE	22	14	22	14	3	64 %	64 %	14 %

Tableau 3 : Séance « UN GROS MONSIEUR SUR LA LUNE »

La lecture des tableaux montre que le pourcentage des énoncés et des propositions « influencées », tous élèves confondus, va de 50 % à 64 %. Cela signifie que plus de la moitié des énoncés des élèves se situent dans la continuité d'énoncés précédents. On peut aussi remarquer qu'il y a, à chaque séance, un élève moins « influencé » que les autres (M, C et A). On peut l'interpréter en disant que cet élève est celui qui dans le groupe est le « meneur » : c'est lui qui fait progresser la représentation en faisant des propositions nouvelles. Mais son pourcentage de propositions « influencées » n'est jamais inférieur à 25 % ce qui montre qu'il écoute les autres et reste présent dans la discussion. Le pourcentage de **propositions « influencées » même idée/propositions** est généralement assez faible. On peut interpréter en disant que les élèves discutent du même objet (la représentation du problème) mais qu'ils ne se rallient pas facilement à un point de vue unique. Malgré le nombre élevé des influences il est rare qu'elles débouchent sur l'adoption de l'idée d'un autre.

Cette première analyse va dans le sens de notre hypothèse selon laquelle il y a effectivement évolution de la représentation du problème et construction commune de la part des élèves travaillant en groupes.

4.2. Les remplacements

Poursuivons un peu plus l'analyse concernant l'adoption d'idées venant d'un autre. Notre grille d'analyse nous permet de repérer les **REMPACEMENTS** dans la colonne **type d'évolution de la représentation**. Nous rappelons que nous recensons là toute opinion qui en contredit une autre, du même élève, sur le même sujet, exprimée auparavant. Qu'est-ce qui a pu conduire à ce remplacement ? La dernière colonne du tableau **INFLUENCE** nous fournit des informations sur l'origine possible de ce remplacement.

Les tableaux qui suivent décrivent combien de fois nous rencontrons des remplacements, indépendamment de leur origine (la colonne **P** accueille le nombre de propositions et la colonne **R** celui des remplacements).

ÉLÈVE	P	R	R/P
M	6	1	16 %
Ch	5	0	0
A	6	0	0
J	4	0	0
TOTAL	21	1	4,7 %

Tableau 4 : Remplacements dans la séance « LES DISQUES TOURNANTS »

ÉLÈVE	P	R	R/P
S	4	0	0
C	19	2	10,5 %
R	15	3	20 %
V	7	0	0
TOTAL	45	5	11 %

Tableau 5 : Remplacements dans la séance « PLAN INCLINÉ »

ÉLÈVE	P	R	R/P
J	7	1	14 %
I	2	0	0
L	9	2	22 %
A	4	0	0
TOTAL	22	3	13,6 %

Tableau 6 : Remplacements dans la séance « UN GROS MONSIEUR SUR LA LUNE »

On voit que le pourcentage de remplacements est bas, un signe de plus montrant que, malgré les influences, les élèves ne changent que rarement d'avis.

Nous avons cherché les origines des neuf remplacements qui apparaissent dans les tableaux ci-dessus. Nous avons constaté que, pour six d'entre eux, l'élève a adopté l'idée d'un autre, camarade ou professeur. Un, parmi les trois autres, est un changement personnel de conception de la situation, sans influence extérieure (V, PLAN INCLINÉ), que nous avons décrit plus haut. Pour les deux autres remplacements, nous n'avons pas pu trouver une origine claire dans la transcription.

4.3. Les développements et les structurations

Si on remarque des influences tout au long de la discussion et si cette multitude d'expressions aide le développement de la représentation comme nous l'avons déjà montré, ceci n'est pas, pour autant, suffisant pour que les élèves accèdent aux structurations décisives qu'exige chaque tâche. Prenons ici la séance « PLAN INCLINÉ ».

Cette séance est très riche en évolutions. De fait, on ne peut pas nier qu'il y ait, dans cette séance, des structurations au niveau individuel et des influences bénéfiques. Pourtant certaines des actions décisives (des structurations pertinentes et des changements de niveaux de formulation) n'ont pas été entreprises. Les élèves considèrent deux cas différents, sans et avec les frottements, ce qui est indispensable car les forces exercées sur le corps changent d'un cas à l'autre, mais ces élèves n'arrivent pas à relier inventaire des forces et type de mouvement⁹. Dans notre cas la situation de départ est connue, le corps est immobile, la prévision peut donc être faite à partir de l'inventaire des forces. Or, cette idée que c'est l'inventaire des forces qui peut nous donner les réponses dans chaque cas, n'est ni énoncée ni discutée. Seule V aborde partiellement cette idée lorsqu'elle compare T (force de frottement) et B_x (composante du poids sur un axe parallèle à la surface inclinée) pour décider si le corps va bouger dans le cas « avec frottements ». À aucun moment, ni pendant la discussion ni dans les produits finaux¹⁰, n'est évoquée la liaison entre l'inventaire des forces et le type de mouvement. Suivons la discussion suivante entre C, R et V :

C	R	V
Oh là ! Mais on n'a pas du tout examiné si le corps bouge dans ces cas ou non.		
	Mais il le dit qu'il bouge.	
		C'est notre question C, s'il bouge ou pas.
		Il est laissé libre, il est laissé libre le corps. Je veux dire qu'il bouge.
	Oui, nous allons tout simplement noter les forces.	

La discussion montre que les élèves parlent de deux choses distinctes, comme si l'inventaire des forces n'avait rien à voir avec la prévision

du mouvement du corps et avec le type du mouvement. L'absence de cette formulation physique, l'absence d'un découpage temporel dans la représentation que V se fait du problème, ainsi que la présence de la forte conception que le corps doit s'arrêter quoi qu'il arrive, conduisent V à cette prévision aberrante que le mouvement sera décéléré. Les mêmes causes conduisent à ce que l'argumentation de V finisse par être convaincante, ce qui nous donne la prévision « décéléré » dans les produits finaux de trois élèves sur quatre. Il ne s'agit pas ici de continuer la recherche des filiations entre les propositions des élèves mais de constater que les représentations des élèves n'ont que partiellement évolué pendant la discussion de groupe. Il y a peu de structurations et très peu d'entre elles sont au niveau formel. L'évolution se limite essentiellement à la dimension du développement.

Il faut noter qu'une comparaison purement quantitative entre développements et structurations ne suffit pas à éclairer cet aspect du travail en groupe. En effet, dans l'analyse faite ici, les différentes structurations sont considérées toutes de la même façon. Or, comme nous l'avons déjà dit, il existe des structurations de nature et d'ampleur différentes et qui ne jouent pas le même rôle par rapport à la résolution. Ce qui est absent ce sont les structurations « décisives », nécessaires pour résoudre le problème comme nous l'avons analysé auparavant. Cette absence des structurations entre les représentations partielles concernant différents descripteurs (comme on le voit très clairement dans le problème du plan incliné où mouvement et somme des forces ne sont jamais mis en relation) est révélatrice de difficultés conceptuelles et du fait que les connaissances de ce domaine ne sont pas encore complètement construites. Une analyse du type de celle décrite ici permet de situer finement ces difficultés, cet instrument peut donc servir au diagnostic pour mettre en place des remédiations efficaces.

5. DISCUSSION

Notre expérimentation va dans le sens de l'hypothèse selon laquelle le travail en groupes peut être un moyen efficace d'apprentissage et que **la construction en commun est possible**. En effet nous avons constaté :

- une grande continuité dans la pensée des élèves ; il est clair que les interventions des élèves ne sont pas « n'importe quoi », elles s'enchaînent et tiennent compte de ce qui a été dit précédemment. Idées nouvelles, pensées antérieures du même élève et interventions des autres sont les éléments des enchaînements de pensée qui se forment ;

- une multitude d'influences à l'intérieur du groupe ; ceci prouve que les interventions d'autrui ne « tombent pas dans le vide » ; il y a écoute

des autres, élément nécessaire pour que le travail en groupes puisse être efficace et riche en ce qui concerne l'apprentissage.

La continuité dans la pensée des élèves indique qu'il est possible d'intervenir efficacement pendant l'élaboration de la représentation du problème puisque les idées émises par les autres sont prises en compte. De telles interventions – destinées à aider les élèves à bien se représenter des points précis de la situation ou à mettre en relation des éléments déjà construits – pourraient avoir des conséquences décisives sur les chemins suivis par la suite, par l'élève concerné et par le groupe. De telles interventions sont à la charge du professeur. Bien les maîtriser exigerait, d'une part, une préparation détaillée de chaque tâche à proposer (Dumas-Carré & Goffard, 1997) comportant une liste de prévisions à propos des difficultés et des erreurs que les élèves sont susceptibles de rencontrer ou de commettre (s'appuyant sur la connaissance des préconceptions) et, d'autre part, un souci permanent de prise d'informations sur l'état d'avancement de la représentation, durant la résolution collective. C'est là que notre grille pourrait servir d'outil de prise d'informations.

Du point de vue de l'évaluation, l'étude des séances de résolution collective, telle que nous l'avons menée, permet de mettre en évidence les points sensibles, les points de difficulté, d'instabilité ou de fragilité, par l'étude des remplacements et des manques de structurations. C'est donc un instrument de diagnostic permettant de déterminer ce qui est bien acquis et ce sur quoi il faudra retravailler avec les élèves.

Reste à affiner à l'intérieur de la catégorie « structuration ». En effet, nous avons considéré comme « structuration » toute évocation de deux éléments différents de représentation dans une même intervention. Or, existent des structurations d'ampleur et de nature différentes. Certaines sont locales, d'autres plus globales ; certaines concernent un même descripteur considéré pour différents instants de l'évolution (par exemple la comparaison des forces pendant la descente et sur le plan horizontal pour le problème « PLAN INCLINÉ »), d'autres concernent plusieurs descripteurs au même instant ou pour la même phase (par exemple la mise en relation des forces et de la variation de la vitesse pendant la descente, toujours pour le problème « PLAN INCLINÉ ») ; il faudrait analyser plus finement les différences de nature et de statut de ces différentes structurations pour les relier aux difficultés des élèves et pouvoir, ensuite, concevoir des aides spécifiques. Selon les situations étudiées, certaines structurations sont plus « décisives » (pour une bonne résolution) que d'autres ; cet aspect devrait faire partie de l'analyse de la tâche, préalable à son utilisation en classe. La grille d'analyse présentée dans cet article a permis de révéler l'importance des structurations dans l'élaboration de la représentation, les difficultés des élèves à ce sujet et, ainsi, d'ouvrir un champ de questions nouvelles à ce sujet.

Finalement une des limites dans notre approche méthodologique est qu'elle ne prend en compte que ce qui a été verbalisé ; il peut exister des évolutions et/ou des influences fortes qui restent non dites. Mais là nous ne voyons pas comment on pourrait y accéder !

NOTES

1. Les séances se déroulent en grec ; une première transcription en grec est établie puis traduite en français. La traduction de ce type de corpus est très difficile, en effet, les phrases mal construites ou non terminées y sont nombreuses. Pour rester au plus près de la signification initiale, le traducteur (L. GomatOS) a parfois choisi un presque « mot à mot » qui donne des constructions que l'on ne trouverait pas chez des élèves s'exprimant en français.

2. Le groupe PROPHY est un groupe de recherche qui, au bout d'un projet de quatre ans, a mis au point un enseignement d'une méthodologie de résolution de problèmes (au lycée, pour la mécanique) s'appuyant sur des représentations intermédiaires du problème.

3. Ce problème n'est pas un problème « ouvert », tout y est précisé. Ceci est dû au fait qu'il s'agissait d'une autre recherche (antérieure) ne s'appuyant pas sur les mêmes présupposés.

4. Pour le deuxième DOI l'interaction entre le bloc A et le fil ne pourra être reconnue comme nulle qu'après un certain traitement du problème, donc, à ce niveau de description initial, nous la laissons figurer.

5. Il existe des structurations d'ampleurs différentes et d'importances différentes pour l'élaboration de la représentation globale. Nous avons retenu ce critère simple pour sa pertinence par rapport à nos analyses. Cette notion de structuration pourrait être affinée en sous-catégories pour donner une description plus fine de l'évolution de la représentation.

6. Nous considérons deux registres de formulation :

– une formulation concrète, événementielle, exprimée en termes d'objets et d'événements ;

– une formulation physico-mathématique, exprimée en termes de concepts et de lois physiques.

7. Une grille par élève et par problème.

8. Par exemple dans la séance « LES DISQUES TOURNANTS » (énoncé en annexe 4), tout au début de la séance, un des garçons dit : « *La balle ne va pas frapper au même point* » nous en inférons que

l'argument qu'il veut rendre explicite est « *Les deux trous ne se trouvent pas sur une droite parallèle à l'axe* ». Ceci est soutenu par l'énoncé suivant du même garçon « *Mon vieux, lorsqu'elle frappe ici, elle va tarder la balle... ne va-t-elle pas tarder en plus ?* »

9. En fait, nous pouvons prévoir exactement la situation cinétique d'un corps si nous connaissons sa situation cinétique initiale et les forces qu'il subit.

10. Les élèves ont rédigé, après leur travail en groupes, une réponse individuelle, un produit final individuel.

BIBLIOGRAPHIE

- AMIGUES R. (1988). Peer interaction in solving physics problems : sociocognitive confrontation and metacognitive aspects. *Journal of Experimental Child Psychology*, n° 45, pp. 141-158.
- CAILLOT M. & DUMAS-CARRÉ A. (1987). PROPHY : un enseignement d'une méthode de résolution de problèmes de physique. *Collection des rapports de recherche INRP*, n° 12, pp. 199-244.
- CHI M.T.H., GLASER R. & REES E. (1982). Expertise in problem solving. In R.J. Sternberg (Éd.), *Advances in the psychology of human intelligence*, vol. 1. Hillsdale, Erlbaum.
- DUMAS-CARRÉ A. (1987). *La résolution de problèmes en physique au lycée ; le procédural : apprentissage et évaluation*. Thèse d'État, Université Paris 7.
- DUMAS-CARRÉ A. & GOFFARD M. (1993). Des activités de résolution de problèmes pour l'apprentissage. *Les sciences de l'éducation*, n° 4-5, pp. 9-32.
- DUMAS-CARRÉ A. & GOFFARD M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*. Paris, A. Colin.
- FAUCHEUX C. & MOSCOVICI S. (1960). Études sur la créativité des groupes : tâche, structure de communication et réussite. *Bulletin du centre d'études et de recherches psychologiques*, n° 9, pp. 11-12.
- GAYFORD C. (1992). Patterns of groupe behaviour in open-ended problem solving in science classes of 15 years old students in England. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 1, pp. 41-49.
- GEORGAS J. (1986). Cooperative, Competitive, and Individualistic Goal Structures With Seventh-Grade Greek Children : Problem Solving Effectiveness and Group Interactions. *The Journal of Social Psychology*, n° 126 (2), pp. 227-236.
- GIL PEREZ D. & MARTINEZ TORREGROSSA J. (1983). A model of problem solving in accordance with scientific methodology. *European Journal of Science Education*, vol. 5, n° 4, pp. 447-455.
- GIL PEREZ D. & MARTINEZ TORREGROSSA J. (1987). La résolution de problèmes comme activité de recherche. Un instrument de changement conceptuel et méthodologique. *Petit X*, n° 14-15, pp 25-38.
- GOFFARD M. (1990). *Modes de Travail Pédagogique et Résolution de Problèmes de Physique*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- GOMATOS L. (1996). *Résolution de problèmes de physique en petits groupes : Apports et difficultés*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.

KEMPA R.F. & AYOB A. (1991). Learning interactions in group work in science. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 3, pp. 341-354.

LARKIN J. & REIF F. (1979). Understanding and teaching problem-solving in physics. *European Journal of Science Education*, vol. 1, n° 2, pp. 191-203.

MUGNY G. (1985). *Psychologie sociale du développement cognitif*. Berne, Peter Lang.

PIAGET J. (1989). *Le langage et la pensée chez l'enfant*. Delachaux et Niestlé.

VYGOTSKY L.S. (1978). *Mind in society : the development of higher psychological process*. Cambridge (Massachusetts), Harvard University Press.

VYGOTSKY L.S. (1985). *Pensée et langage*. Paris, Éditions Sociales.

Annexe 1

S	CS	R	V
Ça dépend de. (suite inaudible)			
	Rectiligne, uniformément accéléré. Uniformément accéléré		
*(professeur) Pour quelles raisons ?			
		Pourquoi uniformément accéléré ?	
12 min	Peu à peu il va développer de la vitesse.		Parce que... il ira en descendant donc sa vitesse ira en changeant.
		Mais est-il un avion pour développer ? C'est un corps ! Je crois que le mouvement sera rectiligne uniforme.	
	Moi aussi. Rectiligne... non... rectiligne uniforme accéléré.		
* Rectiligne uniforme...tu veux dire à vitesse constante ?			
		Oui.	
	Uniforme accéléré		
			À un certain instant sa vitesse deviendra zéro, n'est-ce pas ?
	Uniforme accéléré. Voyons le deuxième cas. Uniforme accéléré. Je le déclare.		

	Rectiligne uniforme.				Beh, oui ! Puisque sa vitesse change. Qu'est-ce qui change ? La vitesse.
<i>Discussions inaudibles</i>					
				Non il peut aller à vitesse constante.	
13 min	<i>Discussions - Plaisanteries</i>				
14 min		Voyons, que va-t-il faire dans le deuxième cas ?			
				Pourquoi est-il rectiligne uniformément accéléré ?	
*Avez vous conclu ?					
		Il est rectiligne uniforme accéléré.			
				Monsieur est-il rectiligne uniformément accéléré ?	
					Accéléré non. Il est décélééré.
		Non pas décélééré, tant qu'il roule.			
					Eh oui, mais à un certain instant sa vitesse <u> </u> nulle.
				N'importe quelle...	
		Non			
				Mais quel que soit son mouvement, Vicky, il va s'arrêter à un certain moment.	

Annexe 2

FORME DES TABLEAUX

SÉANCE :

ÉLÈVE :

(Les énoncés d'élèves recueillis dans des tableaux comme celui-ci ont été exprimés durant la discussion du groupe)

min	ÉNONCÉ PORTEUR D'INFORMATION	DESCR.	CONTEXTUALISATION	APP	EV	INFLUENCE

Annexe 3

UN EXEMPLE

SÉANCE : PLAN INCLINÉ

ÉLÈVE : V

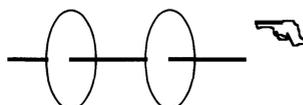
(Énoncés de V porteurs d'information parmi ce qu'elle a dit dans la partie de la discussion présentée dans l'annexe 1)

12	3. Parce que... il ira en descendant donc sa vitesse ira en changeant.	MV+E+T	Puisqu'il descend, sa vitesse doit changer (va augmenter)	PR	STR	R (MR)
12,5	4. À un certain instant sa vitesse deviendra zéro, n'est-ce pas ?	T + MV	Elle considère qu'à un certain instant la vitesse du corps deviendra nulle.	PR	STR	
14,5	5. Accélééré non. Il est décélééré.	MV	Elle prévoit que le mouvement sera décélééré.	PR 3	RPL	R (MS)

ANNEXE 4

LES DISQUES TOURNANTS

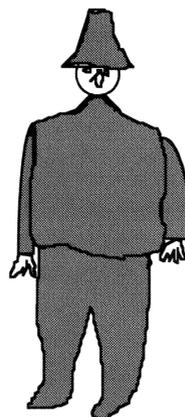
Les deux disques tournent à la même vitesse angulaire autour du même axe, comme le montre la figure. La balle traverse les deux disques. Peut-on, à l'aide de cette manipulation, calculer la vitesse de la balle ?



UN GROS MONSIEUR SUR LA LUNE

Supposez que vous vous trouviez sur la surface de la lune, et que l'un de vos compagnons est le monsieur de la photo.

- Vous imaginez-vous qu'il serait également difficile que sur la terre de le soulever au-dessus du sol ?
- Vous imaginez-vous qu'il serait également difficile que sur la terre de le mettre en mouvement en le poussant avec vos mains, s'il vous arrive d'être fâché contre lui ? Justifier vos réponses.



Cet article a été reçu le 12/03/98 et accepté le 18/03/99.

La dynamique élémentaire dans l'enseignement fondamental marocain : analyse des difficultés d'apprentissage de la notion de force

Introductory dynamics in Moroccan teaching at the junior high school level : analysis of learning difficulties concerning the notion of force

Abdeljalil MAAROUF, Mohammed KOUHILA

Groupe GIREST
École Normale Supérieure
BP 2400
Marrakech, Maroc.

Résumé

Ce travail tente d'analyser les difficultés rencontrées par des élèves marocains (15-17 ans) lors de l'étude de situations mécaniques scolaires modélisables en termes de force. Basée essentiellement sur une méthode qualitative, et plus particulièrement sur l'analyse des productions recueillies à l'issue de la passation d'un questionnaire et lors d'entrevues individuelles, la présente étude a permis, d'une part de mettre en relief les difficultés qui

se rapportent à des activités de modélisation, d'autre part d'en élucider les causes.

Mots clés : *force, physique, difficulté d'apprentissage, activité de modélisation, conception.*

Abstract

This research attempts to analyse difficulties encountered by Moroccan pupils (15-17 years) in solving school mechanical situations involving modelling that requires the use of the concept of force. Using a qualitative method, and in particular analysis of productions obtained through a questionnaire and individual interviews, this study has permitted in a way to detect learning difficulties due to modelling activities and to elucidate in other way the sources explaining these difficulties.

Key words : *force, physics, learning difficulties, modelling activities, conception.*

Resumen

Este trabajo intenta analizar las dificultades encontradas por alumnos Marroquies (15-17 años) a partir del estudio de situaciones mecánicas escolares modelizables en terminos de fuerza. El mismo estuvo basado esencialmente en un método cualitativo, particularmente en el analisis de producciones recogidas mediante la aplicación de un cuestionario y de entrevistas individuales, el presente estudio permitió, por una parte, poner en relieve las dificultades que se presentan en actividades de modelización, y por la otra, dilucidar sus causas.

Palabras claves : *fuerza, física, dificultad de aprendizaje, actividad de modelización, concepción.*

1. INTRODUCTION

Au cours des deux décennies qui s'achèvent, plusieurs travaux de recherche en didactique de la physique ont montré que les élèves, qui reçoivent les premiers cours de mécanique et même ceux qui en ont reçu un enseignement plus approfondi, se heurtent à des difficultés lors de l'apprentissage des concepts clés de cette discipline.

Clement (1982) a montré, entre autres, que la conception pré-galiléenne « *le mouvement implique la force* » résiste à l'enseignement et

constitue une source de difficultés persistantes qui entravent l'appropriation de la 2^e loi de Newton.

Quant à Viennot (1986), elle a décelé une typologie de réponses systématiques à propos de situations élémentaires qui font intervenir le concept de force. Les conceptions qui sous-tendent cette typologie reposent le plus souvent sur des raisonnements naturels cohérents. Les principales réponses fournies sont :

- adhérence entre la notion de force et celle de vitesse (Viennot, 1996) ;
- attribution de la force aux objets ;
- indifférenciation entre force, énergie, élan et impulsion ;
- capitalisation de la force : la force est stockée dans les objets ;
- inégalité de l'action et de la réaction : l'action l'emporte toujours sur la réaction.

Mohapatra (1989) a montré, pour sa part, que les différentes formulations de la loi d'inertie sont mal comprises par les élèves. Certaines expressions employées dans l'énoncé de cette loi n'aident pas les élèves à en saisir le contenu physique. Il a conclu, en outre, que certaines extrapolations erronées et généralisations abusives induisent des erreurs lors de l'étude des situations élémentaires de mécanique.

Twigger et al. (1994) ont étudié les conceptions de la force et du mouvement chez des élèves entre 10 et 15 ans. Ils ont conclu que la conception dominante chez leurs sujets est qu'un objet en mouvement possède un capital de « force » qui lui permet de se mouvoir. Si ce capital de « force » s'épuise, l'objet s'arrête.

Dans une étude portant sur une population pluriculturelle, Enderstein & Spargo (1996) ont validé la conception prédominante selon laquelle la force résultante exercée sur un système agit toujours dans le sens du mouvement en vue de le maintenir.

Le dénominateur commun des travaux cités et de bien d'autres (Fine Gold & Gorsky, 1991 ; Pfundt & Duit, 1991 ; Palmer, 1997 ; etc.), réside dans le fait qu'ils s'inscrivent tous dans le cadre d'un programme de recherche qui prend en compte uniquement les conceptions spontanées des élèves pour expliquer leurs difficultés d'apprentissage. À notre connaissance, peu de travaux ont eu recours aux activités de modélisation pour comprendre l'origine de ces difficultés dans le but de les surmonter.

Cet article présente une expérimentation dont l'objectif est de décrire les difficultés rencontrées par des élèves marocains au terme de

l'enseignement fondamental (grade 9) face à des situations scolaires familières dont la modélisation nécessite le recours au concept de force.

C'est ainsi que nous nous sommes appuyés sur les concepts de conception et d'activité de modélisation pour donner sens aux difficultés d'apprentissage de l'un des concepts les plus fondamentaux de la mécanique : la force. Comme le soulignent plusieurs auteurs (Maarouf & Benyamna, 1997 ; Mc Closkey, 1983), certaines difficultés d'apprentissage de la physique ne sont pas de simples accidents de parcours, au contraire elles reposent sur des raisonnements naturels bien établis.

L'objectif principal de ce travail est de répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les difficultés rencontrées par les élèves de la 9^{ème} année du Fondamental (dernière année du collège en France) lors de l'étude des situations mécaniques modélisables en termes de « force » ?
- Quelles sont les conceptions sous-jacentes à ces difficultés ?

2. POURQUOI S'INTÉRESSER AUX DIFFICULTÉS D'APPRENTISSAGE DE LA FORCE ?

Le concept de *force* a fait couler beaucoup d'encre au sein de la communauté des chercheurs en didactique durant les vingt dernières années (Viennot, 1979 ; Clement, 1983 ; Galili & Bar, 1992). Selon Lemeignan & Weil-Barais (1993), les difficultés d'acquisition du concept de *force* tiennent surtout aux spécificités de cette notion. Contrairement à la quantité de mouvement ou à l'énergie qui sont des grandeurs transférables et conservées décrivant un système, la *force* est une grandeur non transférable et non conservée qui décrit un certain type de relation entre systèmes, relation à caractère symétrique (réciprocité des interactions). La *force* n'est pas une propriété intrinsèque d'un objet. Un objet n'a pas de « force » en lui-même. C'est un outil conceptuel qui permet de modéliser l'interaction entre au moins deux systèmes.

Les difficultés éprouvées par les élèves dans l'acquisition des premières notions de mécanique sont souvent attribuées à une insuffisance dans leurs connaissances mathématiques. Nous pensons plutôt que ces difficultés sont dues au fait que les élèves ne sont pas initiés aux processus intellectuels spécifiques à la physique, notamment aux activités de modélisation.

En regardant du côté des manuels d'enseignement (Ministère de l'Éducation Nationale, 1992, 1994), nous constatons que la *force* est toujours

introduite comme un concept qui décrit une catégorie d'objets, alors qu'il s'agit d'un concept formel (annexe 1). La catégorisation de la *force* (force à distance, force de contact, force localisée, force répartie, etc.) est à l'origine de certaines conceptions d'origine anthropomorphique (Kouhila, 1991). Dans la même veine, Lemeignan & Weil-Barais (1993) affirment que lorsqu'on introduit des classifications au début de l'enseignement d'une grandeur physique fondamentale telle que la *force*, on renforce implicitement chez les élèves l'idée selon laquelle les concepts de la physique sont de même nature que ceux avec lesquels ils sont familiers soit dans le langage courant soit en sciences naturelles. En effet, l'assimilation de la *force* à un concept classificatoire est d'autant plus aisée que la *force* est désignée par un vocable familier ayant une polysémie accentuée dans le langage quotidien.

Ainsi, pour aider les élèves dans l'apprentissage des concepts clefs de la physique, nous pensons qu'il est souhaitable de mettre en évidence la différence entre le sens commun et le sens conventionnel du concept enseigné. Le but étant de veiller à ce que les apprenants puissent créer par eux-mêmes des structures nouvelles de pensée (Kouhila, 1998).

3. ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES

Notre expérimentation a été entreprise auprès de 20 élèves âgés de 15 à 17 ans poursuivant leurs études en 9^{ème} année du Fondamental (équivalent à la 3^{ème} dans le système français) durant l'année scolaire 96/97.

Les élèves en question ont suivi les premiers et les seuls cours de mécanique en 8^{ème} année. Ces cours ont porté essentiellement sur la notion de *force*, sa classification et sa représentation vectorielle (annexe 1).

Le but de cette expérimentation était de mettre en relief les difficultés éprouvées par les élèves dans des situations mécaniques simples qui font appel à la représentation vectorielle des forces exercées sur un système au repos ou en mouvement.

L'expérimentation s'est déroulée en deux phases. Dans une première étape, les élèves ont été invités à répondre individuellement et par écrit à un questionnaire comportant six situations (annexe 2). La question posée pour toutes les situations consistait à représenter schématiquement les forces exercées sur le corps C (système étudié). Nous avons varié les situations pour pouvoir faire des comparaisons entre les réponses des élèves. Ainsi, nous avons choisi des situations où le système étudié est au repos ou en mouvement dans différentes directions (horizontale, verticale ou inclinée).

Dans une deuxième étape, les élèves ont passé des entretiens individuels pour expliciter certaines de leurs réponses présentant des ambiguïtés. Chaque entrevue, réalisée sous forme d'une séance d'une demi-heure environ, a été enregistrée puis transcrite.

Puisque nous avons à traiter des réponses sous forme de discours et de représentations schématiques, nous avons eu recours à l'analyse de contenu de ces productions discursives et schématiques. Le premier travail d'analyse a consisté à subdiviser les productions des élèves en trois catégories en se plaçant dans la perspective des activités de modélisation. En effet, les trois catégories de réponses obtenues s'inscrivent dans trois types d'activités de modélisation que nous avons jugées nécessaires pour conceptualiser la notion de *force* :

- l'activité intellectuelle qui consiste à découper par la pensée l'univers physique en système à étudier et milieu extérieur ;
- l'activité de modélisation qui consiste à répertorier les actions mécaniques en termes de forces qui s'appliquent sur le système étudié ;
- l'activité physico-mathématique qui consiste à représenter par des vecteurs les forces modélisant les actions mécaniques qui s'exercent sur le système étudié.

Ces trois types d'activités de modélisation, couramment pratiquées en mécanique, nous ont servi de grille d'analyse des difficultés rencontrées chez les sujets de notre population.

Pour repérer les dites difficultés, nous avons procédé de la manière suivante, et ce pour chaque catégorie de productions :

- repérer les traits communs présents dans les réponses des élèves pour chaque situation. Par exemple, pour la situation 1, nous avons trouvé que 12 élèves sur 20 mettent dans le bilan des forces des actions exercées par le système sur d'autres corps ;
- repérer les traits communs présents dans les réponses des élèves pour les six situations.

Le croisement entre les réponses des élèves nous a permis de cerner les difficultés qui se rapportent à chaque type d'activité. Par exemple, pour les situations 3, 4, 5 et 6, nous avons trouvé que, pour 13 élèves sur 20, le bilan des forces est représenté par une flèche unique orientée suivant la direction et le sens du mouvement.

4. PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

L'analyse des données recueillies après passation du questionnaire et lors des entrevues, nous a permis de repérer d'une part les difficultés dues aux conceptions spontanées et d'autre part celles dues à la non initiation des élèves aux activités de modélisation. Il s'agit des activités de modélisation suivantes :

- définition du système à étudier ;
- inventaire des forces qui agissent sur le système ;
- représentation de ces forces à l'aide des entités vectorielles.

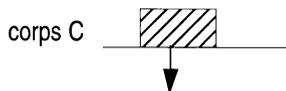
En effet, lors de l'étude d'un système lié mécaniquement à d'autres corps, la modélisation des interactions en termes de *force* entre le système à étudier et le milieu extérieur, nécessite la pratique des activités de modélisation susmentionnées dans l'ordre cité ci-dessus. Il s'ensuit qu'on ne peut faire l'inventaire des forces qui s'exercent sur un système qu'on n'a pas bien défini au préalable. De même, on ne peut représenter les forces qui modélisent des interactions qu'on n'a pas répertoriées auparavant.

4.1. Difficultés liées à certaines activités de modélisation

4.1.1. Difficultés liées à la définition du système étudié

Dans le cas où les élèves ne préciseraient pas explicitement le système étudié (en l'entourant de pointillés par exemple), le bilan des forces est un indice qui va nous permettre de repérer les difficultés des élèves à l'égard de cette activité de modélisation. De cette façon, nous avons pu distinguer les difficultés suivantes :

- le bilan des forces comporte des forces exercées par le système sur d'autres corps (12/20) ;



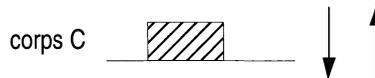
« Le corps C exerce une force sur la table. » (E3 ; S1)

(Le code (E3, S1) désigne un extrait de la réponse de l'élève 3 à la situation 1.)

Cette difficulté peut s'expliquer par la non-assimilation de la notion d'interaction, concept précurseur nécessaire à l'acquisition de la notion de *force*. En effet, le corps (C) est perçu par les élèves comme un agent d'action alors qu'on lui demande de le percevoir comme subissant l'action ;

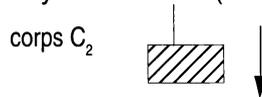
– le bilan des forces comprend des forces qui modélisent les actions réciproques entre le système étudié et d'autres corps en liaison directe ou indirecte avec le système en question (3 sur 20).

Cette difficulté tient au fait que même si certains élèves ont pris conscience de la réciprocité des interactions, ils l'appliquent aux corps qui ne sont pas en liaison directe avec le système étudié. Nous avons noté chez le sujet 16 la confusion entre la loi d'équilibre et la loi de l'action et de la réaction ;



« Le corps C exerce une force sur la table et la table exerce une force sur le corps C, c'est pour cela que le corps C est au repos. » (E 16 ; S 1) ;

– le bilan des forces comprend des forces qui s'exercent sur des systèmes autres que le système étudié (4 sur 20)



« La flèche représente la force exercée par le corps C_2 sur le fil et les poulies P_2 et P_1 ». (E18 ; S4)

Même si la question précise bien le système sur lequel va porter l'étude, certains élèves ont du mal à faire, par la pensée, un découpage de l'univers physique en milieu extérieur et en système étudié. Ainsi, ils ne font pas la distinction entre milieu extérieur et système étudié.

4.1.2. Difficultés liées à l'inventaire des forces exercées sur le système étudié

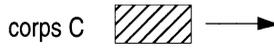
Lorsque les élèves réussissent à préciser le système à étudier, ils butent sur les difficultés se rapportant à l'inventaire des forces. À ce propos, nous avons pu repérer les difficultés suivantes :

– l'inventaire des forces est réduit aux forces de contact (11/20) ;



Il apparaît que l'interaction à distance n'est pas encore acquise chez la moitié des sujets de notre population. Ils estiment que les forces n'interviennent que si les systèmes mécaniques sont en liaison directe ou indirecte. Cette difficulté, due au sens commun, est à rapprocher de la conception aristotélicienne qui nie les actions à distance (Koyré, 1980 ; Hammou & Kouhila, 1996) ;

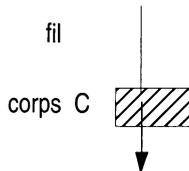
– le bilan des forces qui s'exercent sur le système étudié est réduit à une force unique qui agit dans le sens et la direction du mouvement (13/20) ;



(E14 ; S5)

Cette difficulté a été repérée par plusieurs chercheurs dont Enderstein & Spargo (1996). Elle est due au fait que, dans l'enseignement, la *force* est souvent associée à la mise en mouvement (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Ce type de difficulté nous paraît normal à ce niveau d'enseignement où la *force* est étudiée dans son aspect statique, et surtout où la vitesse et la *force* ne sont pas encore distinguées ;

– l'inventaire des forces se réduit à la force d'attraction exercée par la Terre (2/20) ;



(E8 ; S2)

– l'inventaire des forces est nul, autrement dit l'existence des forces agissant sur un système au repos est niée (1/20) ;



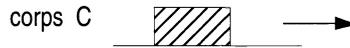
« Le corps C est en parallèle avec la table. Puisque celle-ci est horizontale, elle n'exerce donc aucune action sur C. » (E4 ; S1)

Ce type de difficulté a été repéré par Brown (1994) dans un travail sur le changement conceptuel. Enderstein & Spargo (1996) ont décelé cette même difficulté dans des situations où le système étudié est en mouvement (balle en chute verticale au sommet de son ascension).

4.1.3. Difficultés liées à la représentation vectorielle des forces

Plusieurs difficultés sont éprouvées par les élèves lors des activités relatives à la représentation vectorielle des forces. Nous nous contentons ici de présenter celles rencontrées chez la majorité des sujets de notre population :

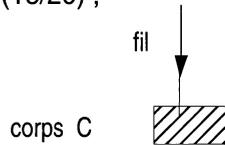
– le bilan des forces est représenté par un segment orienté suivant la direction et le sens du mouvement ;



« La force exercée va de C vers la poulie P_1 , » (E10 ; S4)

Nous constatons que cette difficulté est compatible avec celle citée au paragraphe 4.1.2. et qui consiste à ramener le bilan des forces à une seule et unique force qui agit dans le sens et la direction du mouvement (Clement, 1982, 1983) ;

– le sens du vecteur-force est orienté du corps qui exerce la force vers celui qui la subit (16/20) ;



« La flèche représente la force exercée par le fil sur le corps C. » (E6 ; S2)

Cette difficulté, déjà soulignée par Viennot (1986, 1996), consiste à faire figurer, sur le corps A par exemple, une *force* désignée par « *force de A sur B* ».

En somme, l'activité de modélisation consistant à conceptualiser une notion intuitive telle que la *force*, par le biais d'une notion mathématique abstraite (le vecteur) est loin d'être acquise par la plupart de nos sujets. En effet, les élèves représentent la *force* par une flèche tracée n'importe comment et n'importe où. Ceci montre à l'évidence que les élèves se heurtent à des difficultés lorsqu'il s'agit de faire fonctionner le « *modèle vecteur-force* », même dans des situations scolaires qui leur sont familières.

Rappelons une fois de plus que les difficultés esquissées ci-dessus s'expliquent par le caractère spécifique de la *force*. Celle-ci décrit, comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises, non pas un système mais les interactions réciproques entre systèmes. Cet état de fait est nouveau pour les élèves qui conçoivent la *force* comme un capital stocké dans un objet qui le cède à un autre (idée d'impétus) (Mc Closkey, 1983 ; Koyré, 1980). Les expressions « *avoir de la force* », « *donner de la force* » ne sont-elles pas souvent évoquées dans le langage quotidien ? Ainsi, la *force* est conçue comme une caractéristique inhérente aux objets. Ne peut-on pas conclure de ces propos que les difficultés liées aux activités de modélisation dépendent partiellement des difficultés dues aux conceptions spontanées ?

4.2. Conceptions sous-jacentes aux difficultés susmentionnées

Une analyse attentive des productions écrites de nos sujets ainsi que de leurs discours, nous a permis de repérer une typologie de réponses

en désaccord avec les modèles de la mécanique. Les difficultés éprouvées par les élèves ne sont pas d'ordre mathématique contrairement à une idée couramment reçue, mais elles sont plutôt dues, à notre avis, à différentes catégories de conceptions que les élèves se font à l'égard de la *force*.

La première catégorie concerne les conceptions inhérentes aux difficultés liées à l'activité consistant à délimiter le système à étudier. Il s'agit ici d'une seule conception : à savoir *la non-assimilation de la notion d'interaction*, concept précurseur nécessaire à l'acquisition de la notion de *force*. Nous pensons que cette conception est à l'origine des difficultés suivantes :

- les corps qui assurent la liaison entre le système étudié et d'autres corps, sont considérés comme support de transfert des interactions ;
- la non-distinction entre les forces s'exerçant sur un corps et celles exercées par ce dernier.

Dans la même veine, nous avons noté, dans certaines productions écrites, *une séparation spontanée entre la représentation vectorielle des forces et la représentation des objets matériels*. En effet, le vecteur force est un glisseur qu'on peut déplacer (dans le cas des situations de translation) sur la droite d'action ou sur toute droite qui lui est parallèle. Cependant, dans le cas de situations de rotation où interviennent les moments des forces, on ne peut glisser le vecteur force que le long de sa droite d'action.

La deuxième catégorie de conceptions concerne celles liées aux difficultés relatives à l'activité consistant à faire le bilan des forces. Il s'agit de deux conceptions :

- la première consiste à considérer que l'action à distance nécessite un milieu intermédiaire qui transmet l'interaction. Nous pensons que cette conception est à l'origine de *la difficulté consistant à réduire le bilan des forces aux actions de contact*. En effet, on dirait que *le poids n'est fonctionnel que dans les situations où le système étudié est en mouvement*. Ainsi, 14 des sujets interrogés sur 20 n'ont pas évoqué le poids du corps C dans le bilan des forces. Autrement dit, *le poids d'un corps est une force mal perçue surtout dans les situations 1 et 2 où le système étudié est au repos* ;
- la deuxième conception consiste à considérer que *la force implique le mouvement (ou pas de mouvement implique pas de force)*. Cette conception serait à l'origine des difficultés consistant soit à réduire le bilan des forces à une *force* unique agissant dans la direction et le sens du mouvement, soit à le considérer comme étant nul (cas de l'immobilité).

Quant à la troisième catégorie de conceptions, elle concerne deux conceptions qui engendrent les difficultés liées à l'activité consistant à représenter vectoriellement les forces :

– la première conception consiste à considérer la *force* comme cause efficiente du mouvement. Cette conception est à l'origine de la difficulté qui consiste à représenter les forces par une flèche unique orientée suivant la direction et le sens du mouvement.

En fait, la *force* n'est pas la cause de la modification du mouvement ou de la déformation d'un objet. Le « *responsable* » est un autre objet physique et la *force* n'est que l'agent causal. La *force* n'est pas liée à l'objet déformé mais à sa déformation. Ce type de conception, ancrée dans la pensée commune, explique la tendance spontanée à donner une importance prépondérante et parfois exclusive à la *force* qui met en mouvement.

– la deuxième conception consiste à considérer que *les objets matériels ont de la force (idée de capitalisation)*. Ainsi, la *force* est conçue comme un capital stocké dans un objet qui le cède à un autre (*idée d'impétus*). Cette conception est sous-jacente à la difficulté qui consiste à représenter la *force* de telle façon que son sens soit toujours orienté du corps qui exerce la *force* vers celui qui la subit. Cette conception exprime une idée de latence à propos de la *force*, alors qu'en mécanique, la *force* exprime une idée d'interaction entre au moins deux systèmes.

Le tableau 1 ci-dessous résume les relations qui existent entre les difficultés éprouvées par les élèves dans les trois activités de modélisation susmentionnées et les conceptions qui les sous-tendent.

Activité de modélisation	Sources de difficultés	Conceptions sous-jacentes
Définir le système à étudier	<ul style="list-style-type: none"> le bilan des forces comprend des forces agissant par le système sur d'autres corps (12/20) ; le bilan des forces comprend des forces traduisant des actions réciproques entre le système et les autres corps (3/20) ; le bilan des forces comprend des forces s'exerçant sur des systèmes autres que le système étudié (4/20). 	La non-assimilation de la notion d'interaction concept précurseur nécessaire à l'acquisition de la notion de force.
Faire le bilan des forces s'exerçant sur un système.	<ul style="list-style-type: none"> Le bilan des forces est réduit aux forces de contact (11/20). le bilan des forces est réduit à une force unique agissant dans la direction et le sens du mouvement (13/20) ; le bilan des forces est nul (dans le cas de l'immobilité) (1/20). 	<p>L'action à distance nécessite un intermédiaire matériel qui transmet l'interaction.</p> <p>La force implique le mouvement (ou pas de mouvement implique pas de force).</p>

Représenter les forces par des vecteurs.	Le bilan des forces est réduit à une force unique représentée par une flèche orientée suivant la direction et le sens du mouvement (13/20).	La force implique le mouvement.
	Le sens de la force est orienté toujours du corps qui exerce la force vers celui qui la subit (16/20).	Les objets ont de la force : la force est considérée comme un capital stocké dans un objet (<i>idée d'impétus</i>).

Tableau 1 : Les conceptions qui sous-tendent les difficultés liées aux activités de modélisation

À la lumière des commentaires et analyses ci-dessus, nous pensons que l'explicitation de ces difficultés en situation de classe, aide les élèves à percevoir la différence profonde entre une approche causale en termes de propriétés et une démarche de modélisation en termes de concepts et de relations entre ces concepts. La première démarche consiste à *mettre en relation les propriétés des objets avec les effets*. La seconde démarche consiste à *se représenter les objets dans les termes d'un modèle et à ne retenir que ce qui est pertinent au regard de celui-ci* (Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Selon ces mêmes auteurs, *les inférences causales n'interviennent dans la démarche naturelle que sur le plan empirique ; tandis que dans la démarche de modélisation, les inférences exigent le recours à une représentation de nature hypothétique et à des calculs mathématiques sur cette représentation*.

Nous pensons, avec les auteurs cités ci-dessus, que les deux modes de fonctionnement, spontané et scientifique, doivent être explicités aux élèves lors des situations d'enseignement/apprentissage afin qu'ils en prennent conscience en vue d'accéder aux processus de pensée propres aux sciences physiques.

5. CONCLUSION

En guise de conclusion, nous pouvons avancer que les sources de difficultés rencontrées par les élèves marocains de la 9^{ème} année du Fondamental lors de l'apprentissage des premières notions de mécanique, peuvent s'expliquer par la non-intégration des processus de modélisation et de conceptualisation dans les structures cognitives des élèves. Les activités de modélisation sont quasiment absentes dans la pratique didactique. En effet, nous constatons que dans l'enseignement actuel de physique, que ce soit dans le Fondamental (9 ans) ou dans le Secondaire (3 ans), les expériences sont réalisées dans le seul but de correspondre à des modèles préfabriqués. En outre, *les représentations symboliques des concepts de la physique sont souvent parachutées par l'enseignant sans*

être discutées avec les élèves. Ainsi, l'élève est amené à accepter des modèles tout faits sans qu'il soit impliqué dans les processus intellectuels (problématisation, conceptualisation, modélisation, formalisation, etc.) qui mènent à leur élaboration. Il est tout simplement sollicité pour appliquer ces modèles afin de répondre à des questions écrites sur des situations elles-mêmes décrites.

Ainsi, les concepts et les modèles se présentent sous forme d'énoncés qui sont déconnectés des processus intellectuels qui les ont produits. Ces arguments nous permettent d'inférer que la physique, telle qu'elle est enseignée au Maroc, à l'instar de plusieurs pays à travers le monde, se ramène à des formules stéréotypées commentées par des phrases récitées dans les manuels scolaires ou dans les cahiers d'élèves.

Pour surmonter les difficultés d'apprentissage de la physique, nous pensons que les activités de conceptualisation et de modélisation devraient être au cœur de tout enseignement de la physique du Fondamental à l'Université.

Quant aux conceptions spontanées, nos résultats corroborent une fois de plus l'hypothèse couramment admise par les didacticiens : « *l'enseignement formel tel qu'il se pratique actuellement (inductivisme) a peu d'impact sur la déstabilisation des conceptions initiales* ». En effet, les conceptions spontanées sont tenaces car elles résistent à l'enseignement. La typologie de réponses évoquée au paragraphe 4.2., est probante à ce sujet.

On comprendra dès lors que, si on présente à l'élève des notions contradictoires avec ce qu'il pense ou s'il n'en perçoit pas l'intérêt, il n'aura pas tendance à les prendre en considération. Ceci explique, par exemple, que, même après un enseignement relatif à la *force*, les élèves continuent à penser la *force* comme une caractéristique intrinsèque d'un système et qu'elle agit dans le sens du mouvement.

Dans les situations d'enseignement, l'élève est rarement invité à expliciter ses idées initiales afin d'en prendre conscience. Il est rarement invité à prendre en compte clairement la différence entre ce qu'il pense et ce qu'on lui expose. Ceci le conduit à faire abstraction des idées nouvelles qu'on lui transmet car elles ne s'intègrent pas dans ses structures cognitives. Comme on l'invite à utiliser un nouveau symbolisme pour représenter les forces, il a tendance à croire qu'il ne s'agit que d'une façon de s'exprimer. Ainsi, il ne change ni de paradigme explicatif ni de registre conceptuel : il projette son arsenal notionnel spontané sur les situations physiques sans sentir la nécessité de changer de grille de lecture. L'élève pourra être ainsi capable de maîtriser le calcul vectoriel sans saisir en quoi la *force*, en physique, est différente sur le plan sémantique des *forces* qu'il connaît déjà à partir de son expérience personnelle.

Ces quelques considérations nous poussent à développer une réflexion à propos de la façon dont la *force* est présentée dans les manuels marocains d'enseignement. En effet, une analyse attentive et approfondie du manuel de la 8^{ème} année du Fondamental (3^{ème} année du collège), montre que la définition de la *force* est fondée sur la 2^{ème} loi de Newton. Le contenu de cette définition peut en effet être traduit par :

– dire que « *la force change l'état de repos d'un corps* » est équivalent à dire que

$$\begin{array}{ccc} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ \text{état 1 : } V_1 = 0 & \Rightarrow & \text{état 2 : } V_2 \neq 0 \end{array}$$

– dire que « *la force change le mouvement d'un corps* » est équivalent à dire que

$$\begin{array}{ccc} \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow & \rightarrow \\ \text{état 1 : } V_1 \neq 0 & \Rightarrow & \text{état 2 : } V_2 \neq 0 & (\text{avec } V_1 \neq V_2). \end{array}$$

Ceci résulte, dans les deux cas, du fait que la *force* est proportionnelle à la variation de vitesse par rapport au temps. En réalité, c'est par principe que la *force* est une grandeur vectorielle responsable du changement du mouvement, alors que les manuels scolaires présentent cette hypothèse comme une évidence empirique.

Notons en outre que la plupart des manuels suggère une démarche inductive là où la démarche devrait être, à notre sens, partiellement hypothético-déductive. En effet, l'attraction terrestre, les surfaces parfaitement lisses, les fils sans masse, sont autant d'hypothèses fertiles posées par les physiciens pour construire leurs modèles. Cependant, même si l'approche inductive des concepts physiques est beaucoup plus accessible aux élèves que la démarche basée sur l'émission d'hypothèses, nous estimons, avec Lemeignan & Weil-Barais (1993), que l'adoption d'une démarche hypothético-déductive pour enseigner la *force* est incontournable.

À l'issue de l'analyse que nous venons de développer à propos de la dynamique élémentaire telle qu'elle est présentée dans les manuels scolaires marocains, nous sommes en mesure de poser les questions qui suivent (Kouhila, 1995).

La dichotomie effet statique / effet dynamique introduite pour définir la *force* n'inculque-t-elle pas la fameuse opposition d'Aristote entre le repos et le mouvement ?

La diversité et la non-concordance entre les notions précurseurs de cause, d'action mécanique, d'interaction et de vecteur-force ne sont-elles pas autant de facteurs qui embrouillent l'élève dans son acquisition du concept de *force* ?

Comment peut-on concilier l'émergence historique tardive des entités vectorielles avec leur introduction hâtive dans le contexte de l'enseignement ?

Les mathématiques enseignées permettent-elles aux élèves une modélisation correcte et aisée des grandeurs physiques vectorielles ?

Le terme « *cause* » évoqué dans la définition de la *force* ne renforce-t-il pas la conception pré-galiléenne « *la force implique le mouvement* » ?

Autant de questions qui nous préoccupent et qui suscitent débats et controverses et pour lesquelles nous n'avons pas encore de réponses satisfaisantes.

BIBLIOGRAPHIE

- BROWN D.-E. (1994). Facilitating conceptual change using analogies and explanatory models. *International Journal of Science Education*, vol. 16, n° 2, pp. 201-214.
- CLEMENT J. (1982). Students' preconceptions in introductory mechanics. *American Journal of Science Education*, vol. 50, n° 1, pp. 66-70.
- CLEMENT J. (1983). *Students' alternative conceptions in mechanics : a coherent system of preconceptions ?* Proceedings of conference on Students' Misconceptions in Science and Mathematics, Cornell University, New York.
- ENDERSTEIN L.-G. & SPARGO P.-E. (1996). Beliefs regarding force and motion : a longitudinal and cross cultural study of south african school pupils. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 4, pp. 485-492.
- FINE GOLD M. & GORSKY P. (1991). Students' concepts of force as applied to related physical systems : a search for consistency. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 1, pp. 97-113.
- GALILI I. & BAR V. (1992). Motion implies force : where to expect vestiges of the misconceptions ? *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 63-81.
- HAMMOU B. & KOUHILA M. (1996). Contribution à une approche historique et didactique du concept de force. In *Actes du 1° Colloque Franco-maghrébin de Didactiques des Sciences, Faculté des sciences Dhar Elmahraz, Fès, Maroc*, pp. 157-159.
- KOUHILA M. (1991). Aspects linguistiques et épistémologiques dans l'émergence du concept de force. *Séminaire de lecture dans le cadre du 3^{ème} cycle de didactique des disciplines scientifiques, École Normale Supérieure, Rabat, Maroc*. (Inédit).
- KOUHILA M. (1995). Approche épistémologique et didactique des rapports Mathématiques/Physique à travers le concept de vecteur-force. *1ères Journées Franco-marocaines de Didactique de la Physique, Faculté des Sciences Dhar Elmahraz, Fès, Maroc* (Inédit).
- KOUHILA M. (1998). Les problèmes langagiers et conceptuels posés par la terminologie utilisée dans l'enseignement des sciences physiques. *Bulletin n° 12, Faculté des Sciences Semlalia de Marrakech, Publication du Groupe de Didactique des Sciences de Marrakech (GDSM)*, pp. 17-22.
- KOUHILA M. (2000). Quelles activités de formation pourrait-on mettre à l'œuvre avec les stagiaires de l'E.N.S. en vue d'assurer une adéquation entre la formation à la didactique et la pratique professionnelle ? *Didaskalia*, n° 17, pp. 173-202.
- KOYRÉ A. (1980). *Études galiléennes*. Paris, Hermann.

- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en Physique*. Paris, Hachette.
- MAAROUF A. & BENYAMNA S. (1997). La construction des sciences physiques par les représentations et les erreurs. *Didaskalia*, n° 11, pp. 102-118.
- MC CLOSKEY M. (1983). L'intuition en Physique. *Pour la Science*, n° 68, pp. 68-76.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Physique, 1^{ère} année du Secondaire*. Casablanca, Imprimerie Ennajah Eljadida.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). *Sciences Physiques, 8^{ème} année du Fondamental*. Casablanca, Imprimerie Almadariss.
- MOHAPATRA J.-K. (1989). Pupils, teachers, induced incorrect generalization and the concept of force. *International Journal of Science Education*, vol. 11, n° 4, pp. 429-436.
- PALMER D. (1997). The effect of context on students' reasoning about forces. *International Journal of Science Education*, vol. 19, n° 6, pp. 681-696.
- PFUNDT H. & DUIT R. (1991). Bibliography : students' alternative frameworks and science education, *I.P.N, In - Brief*.
- TWIGGER D., BYARD M., DRIVER R., DRAPER S., HARTLEY R., HENNESSY S., RAMZAN M., O'MALLEY C., O'SHEAT T. & SCANLON E. (1994). The conception of force and motion of students aged between 10 and 15 years : an interview study designed to guide instruction. *International Journal of Science Education*, vol. 16, n° 2, pp. 215-229.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1986). Bilans des forces et loi des actions réciproques : analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 951-971.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en Physique, la part du sens commun*. Bruxelles, De Boeck.

ANNEXE 1

Le modèle « force » à travers le manuel de la 8^{ème} année du Fondamental (Kouhila, 2000)

1. Les objectifs d'enseignement

L'élève doit être capable à l'issue de ce cours de :

- définir un système à étudier ;
- classer les différentes forces ;
- faire l'inventaire des forces exercées sur un système ;
- représenter la force par un vecteur.

2. Le champ empirique

À l'aide de plusieurs situations de la vie quotidienne, la notion de force est introduite à partir de ses effets statiques et dynamiques.

Ensuite, on donne la définition suivante :

La force est toute cause capable de :

- *changer l'état de repos ou de mouvement d'un corps (effet dynamique) ;*
- *déformer un corps ou le maintenir en équilibre (effet statique).*

Une première catégorisation des forces est fournie : forces de contact et forces à distance.

Ensuite, une deuxième classification des forces est donnée : forces intérieures et forces extérieures.

Cette classification est suggérée par l'introduction de la notion importante de système étudié qui consiste à séparer, par la pensée, le système étudié et le milieu extérieur.

3. Le champ théorique

Après avoir esquissé ses caractéristiques, la force est représentée par un vecteur-force dont les propriétés sont :

- le point d'application ;

À ce propos, les traits de modélisation suivants suggèrent une 3ème classification :

- si la surface de contact est réduite en un point, on parlera de forces localisées ;
- si la surface de contact est non négligeable, on parlera de forces réparties ;
- si la surface de contact est lisse, on négligera les forces de frottements ;
- si la surface de contact est rugueuse, on parlera des forces de frottements.

- la droite d'action ;
- le sens ;
- l'intensité.

ANNEXE 2

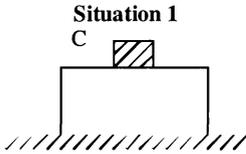
Questionnaire

Dans chacune des six situations présentées ci-dessous, représentez les forces s'exerçant sur le corps C. On donne :

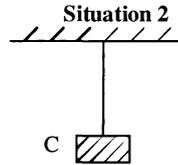
masse du corps C, $m = 1 \text{ kg}$; masse du corps C_1 , $m_1 = 0,5 \text{ kg}$;

masse du corps C_2 , $m_2 = 1,5 \text{ kg}$; intensité de la pesanteur, $g = 10 \text{ N/kg}$

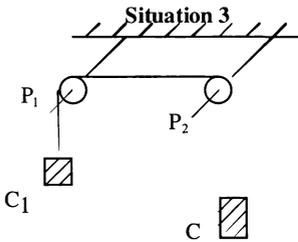
Les frottements entre le corps C et les plans π_1 et π_2 sont négligés. On suppose que le fil utilisé dans les situations 3, 4, 5 et 6 est inextensible.



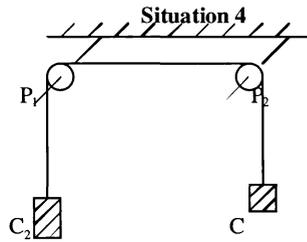
Le corps C est posé sur une table horizontale.



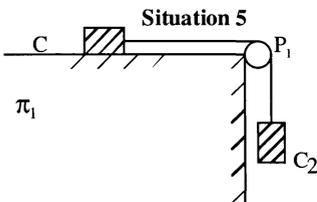
Le corps C est suspendu par un fil.



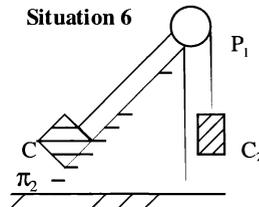
Le corps C se déplace vers le bas.



Le corps C se déplace vers le haut.



Le corps C se déplace de gauche à droite.



Le corps C se déplace vers la poulie P_1 .

Cet article a été reçu le 21/10/98 et accepté le 01/04/99.

Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité

Study in inter-didactics of mathematics and physics about acquisition of Ohm's law in high school : change of frame

Didier MALAFOSSE, Alain LEROUGE,
Jean-Michel DUSSEAU

Laboratoire ERES de l'Université Montpellier II
Groupe IUFM
2, place M. Godechot, BP 4152
34092 Montpellier cedex 5, France.

Résumé

La loi d'Ohm est une des premières lois physiques écrite sous forme mathématique que les élèves français rencontrent dans leur cursus scolaire. L'obtention de cette relation fonctionnelle par induction à partir d'un nombre discret de mesures repose sur un homomorphisme supposé entre le concept de proportionnalité dans le cadre des mathématiques, et la loi d'Ohm dans le cadre de la physique. Pour comprendre les raisons des difficultés rencontrées par les élèves au cours de cette phase de modélisation, une

séquence d'ingénierie didactique a été construite. L'analyse des résultats de cette expérimentation, articulée autour des notions de registre sémiotique, de cadre de rationalité et d'espace de réalité, interprète ces difficultés en termes de rupture de rationalité entre les mathématiques et la physique pour trois éléments particuliers : la dimensionnalité des nombres, le concept de proportionnalité et la différence de nature des règles de validation.

Mots clés : *inter-didactique mathématiques/physique, cadre de rationalité, registre sémiotique, loi d'Ohm.*

Abstract

Ohm's law is one of the first laws of physics written in mathematical form which pupils find in a french high school. This functional relation is obtained from a discrete number of measurements by a process built on a supposed homomorphism between the concept of proportionality in the mathematical frame, and Ohm's law in the physical frame. To understand the reasons of the difficulties encountered by pupils in this phase of mathematical modelling, a didactic engineering sequence has been built. The analysis of the experimental results, based on the didactical notions of semiotic register, frame and space of reality interpret these difficulties in term of a break in rationality for three particular elements : the dimensionality of numbers, the transportability of the concept of proportionality and the difference in kind of the laws of ratification.

Keys words : *physics and mathematics inter relation, frame, semiotic register, Ohm's law.*

Resumen

La ley de Ohm es una de las primeras leyes físicas escritas en forma matemática que los alumnos franceses encuentran en sus cursos escolares. La obtención de esta relación funcional por inducción a partir de un número discreto de medidas reposa sobre un homomorfismo supuesto entre el concepto de proporcionalidad en el marco de las matemáticas, y la ley de Ohm en el marco de la física. Para comprender las razones de las dificultades encontradas por los alumnos en cursos de esta fase de modelización, una secuencia de ingeniería didáctica fue construida. El análisis de los resultados de esta experimentación, articulada alrededor de las nociones de registro semiótico, del marco de la racionalidad y del espacio de realidad, interpreta esas dificultades en terminos de ruptura de racionalidad entre las matemáticas y la física para tres elementos particulares : la dimension de los numeros, el concepto de proporcionalidad y la diferencia de naturaleza de las reglas de validacion.

Palabras claves : *interdidáctica matemática/física, marco de racionalidad, registro semiótico, ley de Ohm.*

1. INTRODUCTION

La loi d'Ohm a été introduite dans l'enseignement français, à la fois en classe de troisième moderne (sans langues anciennes) [14-15 ans] et en classe de première scientifique (section C et D) [16-17 ans] en 1902. Elle était récemment enseignée en classes de troisième et de seconde. Aujourd'hui presque tous les élèves français la rencontrent dans leur scolarité puisqu'elle figure explicitement aux programmes des classes de troisième des collèges et de BEP, et qu'elle est ensuite généralisée au lycée à l'occasion de l'étude des circuits en courant alternatif.

La loi d'Ohm établit la relation de proportionnalité $U = R \cdot I$ entre la tension U aux bornes de dipôles électriques d'un certain type (les « conducteurs ohmiques » ou « résistors ») et l'intensité I qui les traverse. C'est, en fait, une des premières lois physiques écrites sous forme mathématique que les élèves rencontrent dans leur cursus, même s'ils ont fréquenté à l'école primaire les surfaces, les volumes, les vitesses, etc. qui font aussi intervenir des relations mathématiques entre grandeurs physiques. La loi d'Ohm donne lieu à une étude expérimentale au cours de laquelle les élèves construisent des circuits électriques et procèdent à un nombre discret de mesures d'intensités et de tensions, puis à un travail de modélisation reposant sur une généralisation de type inductif des résultats expérimentaux pour obtenir une relation fonctionnelle entre grandeurs physiques (toute approche déductive étant impossible à cause du manque de connaissance des élèves à propos des propriétés microscopiques de la matière). Son étude nécessite de faire appel aux notions mathématiques de proportionnalité et d'application linéaire qui sont antérieurement enseignées en cours de mathématiques. Cette opération de « mathématisation » est réalisée dans un but évident de modélisation, mais aussi, semble-t-il, pour aider l'élève dans la compréhension du phénomène physique. Une coordination entre l'enseignement des sciences physiques et celui des mathématiques est donc prônée depuis près d'un siècle par les programmes officiels et les recommandations qui les accompagnent, mais elle semble reposer uniquement sur l'idée de complémentarité des deux disciplines dont les enseignements simultanés seraient source de synergie au cours des apprentissages. Cependant, dans la pratique, il semble que l'écart entre la réalité expérimentale et sa présentation épurée sous forme d'une relation fonctionnelle mathématique puisse générer un certain nombre de difficultés pour les élèves, et donc aussi pour leurs enseignants de sciences physiques,

qu'ils soient novices ou experts. Ces difficultés constatées par de nombreux didacticiens de la discipline se situent aussi bien au moment de l'établissement de la relation fonctionnelle entre U et I à partir des données expérimentales qu'au moment de son emploi pour résoudre des problèmes de physique, et il faut donc se résoudre à admettre « *la fréquente mauvaise compréhension de la loi d'Ohm* » qui est « *plutôt utilisée comme une formule, que comme un modèle traduisant des événements qui se passent dans le circuit* » (Clavel-Marinacce, 1997, p. 130). Ainsi, au delà des difficultés rencontrées par les élèves dans la gestion des relations faisant intervenir simultanément deux variables (Viennot, 1992), la question de la présentation de la loi d'Ohm sous forme mathématisée en fin de collège est posée.

Pour notre part, nous émettons l'hypothèse que ces difficultés reposent en partie sur la différence de nature des objets conceptuels manipulés dans les deux disciplines mais aussi, et surtout, sur une divergence de rationalité entre le cadre des sciences physiques et celui des mathématiques. La question générale de cette divergence, jamais évoquée dans les documents d'accompagnement des programmes, n'apparaît non plus à aucun moment dans les manuels scolaires qui semblent postuler la transparence des « outils mathématiques » lorsqu'ils sont utilisés par les élèves en sciences physiques. Nous avons cherché à mettre à l'épreuve notre hypothèse par l'analyse d'une séquence d'ingénierie didactique centrée sur le thème de la loi d'Ohm en classe de troisième, à l'aide des notions déjà présentées (Malafosse et al., 2000) d'**espace de réalité**, de **cadre de rationalité**, et de **registre sémiotique**.

2. RAPPELS SUR LES NOTIONS D'ESPACE DE RÉALITÉ, DE CADRE DE RATIONALITÉ, ET DE REGISTRE SÉMIOTIQUE

2.1. Notion d'« espace de réalité »

Le didacticien de la physique est amené à réfléchir sur la différence entre les objets de la réalité, les concepts et quantités abstraits élaborés par la communauté scientifique, et les représentations sémiotiques qui en sont faites dans l'enseignement. Cette réflexion de nature didactique, différente de celle menée par les philosophes (qui s'intéressent à la nature épistémologique du monde, aux mécanismes de sa perception et à la structure des théories scientifiques), a pour objectif la production d'outils d'analyse du fonctionnement des apprentissages en sciences expérimentales. Elle repose néanmoins sur un postulat épistémologique implicite mais commode, celui d'un réalisme objectif que d'Espagnat décrit

comme « *la foi – indémontrable, bien entendu, mais acceptée comme évidence – en une réalité physique définie qui existerait même s'il n'existait aucun observateur et qui, d'autre part, est accessible à la recherche, à la connaissance quantitative et au calcul* » (D'Espagnat, 1956, p. 24).

Pour construire un modèle théorique, rendant compte des processus de conceptualisation en physique, situant à la fois les objets et événements postulés réels du monde matériel, les signifiés associés dans leurs cadres théoriques d'interprétation de la réalité, et leurs signifiants dans les registres concernés, nous avons été conduits à introduire un élément faisant référence épistémologiquement au monde dont l'individu, comme la collectivité scientifique, cherche à s'approprier une description raisonnée, et auquel ils cherchent tous deux à se référer pour valider leurs productions. Nous avons appelé cet élément « espace de réalité » (Malafosse et al., 2000). Nous posons que l'**espace de réalité** est l'ensemble des objets réels et des événements hors de tout espace psychique. C'est sur ses constituants que vont porter aussi bien l'activité mentale de construction de modèles mentaux et de conceptions de tout individu que la réflexion collective d'une communauté conduisant à la production de concepts et de théories scientifiques.

2.2. Notion de « cadre de rationalité »

Cette notion a été construite par Lerouge (1992) à partir de celle de « cadre » (Douady, 1984) pour tenir compte de la dualité familier/scientifique mise en évidence par Vygotski (1934) au sujet des processus de conceptualisation. Nous posons qu'un **cadre de rationalité** est un ensemble cohérent du fonctionnement de la pensée caractérisé essentiellement par son monde d'objets et ses règles de raisonnement et de validation. C'est au sein de cette structure que prennent sens, de manière dialectique, les informations sémiotiques et situationnelles. Dans notre propos, nous aurons recours à trois types de cadres de rationalité : les cadres culturels (des mathématiques ou des sciences physiques), les cadres didactiques construits dans un but de transposition des savoirs entre une communauté scientifique et l'élève en situation d'apprentissage scolaire, et enfin, les cadres personnels des élèves.

Les cadres culturels des mathématiques et des sciences physiques ont un statut de cadre scientifique dans la mesure où leurs mondes d'objets sont constitués de concepts scientifiques et où les règles de raisonnement et de validation mises en œuvre sont reconnues par une communauté scientifique. On verra plus loin ce qui distingue ces deux cadres, mais on peut déjà noter que les objets du cadre culturel des sciences physiques

doivent être construits en référence aux objets et événements de l'espace de réalité, le devoir de proposition d'une représentation du réel étant un des objectifs premiers de cette discipline. Le fait que les conceptions antérieures à un apprentissage continuent à fonctionner, parallèlement aux concepts « *acquis* » (Giordan & De Vecchi, 1987) semble indiquer que ce que l'on considère habituellement comme le cadre personnel de l'apprenant, n'est pas un véritable cadre de rationalité car il est le lieu d'expression de rationalités différentes, voire contradictoires. On admettra donc que l'espace psychique de l'apprenant est constitué de cadres disciplinaires personnels, dont les concepts et la rationalité sont co-produits par les relations de l'individu avec l'espace de réalité et par la médiation didactique, et d'un cadre de rationalité personnel du sens commun. Le cadre personnel de la physique sera différent d'un élève à l'autre et, *a fortiori*, d'un élève à son professeur.

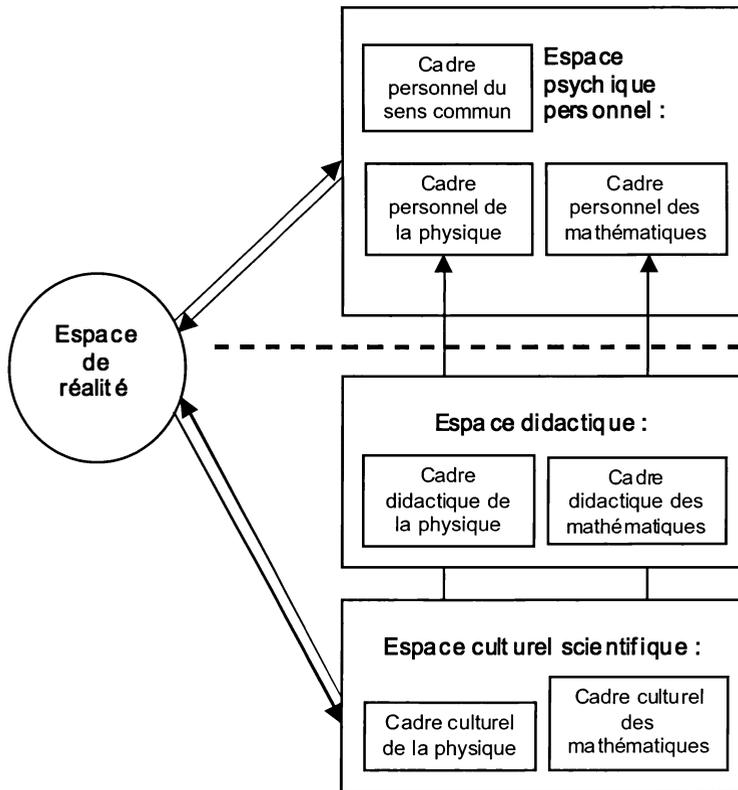


Figure 1 : Espace de réalité et cadres de rationalité

Le modèle de l'espace psychique personnel ainsi modifié permet d'interpréter plusieurs constats :

– la parcellisation de l'espace de pensée en plusieurs cadres entraîne la coexistence de conceptions concurrentes et, comme le soulignent Johsua & Dupin, « *ceci peut aboutir à de très fortes contradictions logiques entre les raisonnements utilisés dans chaque cas, un raisonnement pouvant, par exemple, et en toute rigueur, invalider l'autre. Mais alors que l'exigence de cohérence interne est constitutive du discours scientifique, elle ne l'est pas au même titre dans le comportement d'un individu donné. La règle ici est au contraire celle de la cohabitation de conceptions différentes, relativement étanches entre elles, correspondant à une classe de problèmes semblables (au yeux de l'élève), conceptions qui appellent des registres différents de fonctionnement cognitif* » (Johsua & Dupin, 1993, pp. 127-128), le terme « *registres de fonctionnement cognitif* » recouvrant exactement notre notion de cadre personnel de rationalité, mais présentant l'inconvénient d'une possible confusion avec la notion de registre sémiotique ;

– la médiation didactique, même quand elle cherche à tenir compte des structures cognitives en place dans l'espace psychique de l'apprenant, ne modifie dans un premier temps que le seul cadre personnel disciplinaire. Elle est donc sans effet sur les concepts et la rationalité du sens commun. Il faudra donc attendre un certain temps et une certaine sollicitation intellectuelle de l'individu pour que les produits de la médiation didactique soient consolidés puis intégrés et qu'ils diffusent dans la totalité de l'espace psychique, ce qui correspond alors à un niveau croissant d'expertise de l'individu dans la discipline concernée ;

– les processus de conceptualisation mis en œuvre par un élève en classe de mathématiques et/ou de sciences physiques sont donc gérés à un instant donné par deux cadres de rationalité inter-réagissant : le cadre personnel du sens commun de l'élève (ou « familier » selon la terminologie de Vygotski) et son cadre personnel des mathématiques et/ou son cadre personnel des sciences physiques.

2.3. Notion de « registre sémiotique »

En mathématiques, l'objet sur lequel s'appuie le processus de conceptualisation n'a pas de réalité matérielle et doit être appréhendé par le biais de ses représentations sémiotiques culturelles. L'approche sémiotique de l'étude de l'acquisition de connaissances scientifiques, qu'elles soient mathématiques, physiques ou autres, amène donc à se poser la question de la représentation des signifiés de façon systémique. C'est tout le sens du travail de Duval (1993), pour qui un **registre** est un système sémiotique permettant les trois activités fondamentales de la pensée :

- la formation d'une représentation identifiable ;
- le traitement de cette représentation dans le registre même où elle a été formée ;
- et la conversion de cette représentation en une représentation d'un autre registre.

Nous verrons intervenir dans cet article les registres suivants : le registre de la langue maternelle (les élèves auront souvent à expliciter oralement ou par écrit leurs représentations dans ce registre), le registre numérique (ici les nombres seront souvent présentés sous forme de tableaux), le registre de l'écriture symbolique de type analytique (expression littérale des fonctions mathématiques et des lois physiques, relation de proportionnalité, etc.), le registre graphique (représentation cartésienne de l'application linéaire, tracé de caractéristiques de dipôles).

3. OBJECTIF DE RECHERCHE ET ANALYSE *A PRIORI*

3.1. Objectif de recherche

Nous avons cherché à tester la pertinence de notre modèle associant les notions d'espace de réalité, de cadre de rationalité et de registre sémiotique, dans l'analyse d'une séquence d'électricité montée en classe de troisième d'un collège classé en « zone d'éducation prioritaire » (ou ZEP : zone géographique dont la population socialement défavorisée nécessite et bénéficie de moyens pédagogiques supplémentaires). La méthodologie retenue a été celle de l'ingénierie didactique (Artigue, 1988). Notre objectif n'étant pas l'optimisation d'une séquence d'apprentissage, l'ingénierie a consisté à organiser une séquence support sur le thème de l'établissement de la loi d'Ohm et de la construction du concept de résistance, autour des trois points particuliers suivants, que nous avons identifiés par analyse *a priori* :

- l'influence de la perception de la nature des objets sur l'activité de production d'un schéma de circuit électrique ;
- la recherche de régularités numériques et le passage traditionnellement fait par induction à une « formule physique » traduisant la loi d'Ohm, à partir d'un ensemble de groupes de nombres correspondant aux mesures expérimentales des diverses tensions et intensités d'un circuit série simple ;
- la représentation graphique de la loi d'Ohm sous forme d'une droite passant par l'origine du plan (U, I) et la détermination graphique de la résistance du résistor.

Chacune de ces étapes a permis la mise en œuvre de notre modèle sur un point particulier :

- passage de l'espace de réalité au(x) cadre(s) de rationalité familier(s) et/ou scientifique(s) (Malafosse et al., 2000) ;
- choix de cadres de rationalité et passages entre cadre physique et cadre mathématique ;
- changement de registres sémiotiques (numérique, analytique, graphique).

Dans cet article, nous ne présentons que les résultats concernant le deuxième point, c'est-à-dire que nous centrons notre travail sur les cadres choisis spontanément par l'élève au cours du passage de l'espace de réalité à son espace psychique, puis sur les changements de cadres de rationalité nécessaires pour arriver à la formulation usuelle de la loi d'Ohm. Bien que cette analyse soit centrée sur le concept de cadre de rationalité, les notions d'espace de réalité et de registre nous seront nécessaires à tout moment. Les résultats concernant le troisième point seront prochainement publiés.

3.2. Hypothèses de recherche

Tout sujet appréhende les objets et événements de l'espace de réalité par l'entremise d'observables qui, pour prendre un sens, ont besoin d'un cadre de rationalité dans lequel des modèles peuvent être conçus et des concepts élaborés. On se propose donc d'étudier le comportement des élèves au cours des diverses phases qui les conduisent des mesures à la loi physique (ici la loi d'Ohm), et en particulier, au moment de la projection des observables quantifiées issues de l'expérience. Cette étape est déterminante par le choix du cadre de rationalité retenu car c'est en grande partie de lui que dépendent la nature des concepts et la forme (qualitative et quantitative) des lois, mais surtout leur pertinence. Par exemple, en cours de sciences physiques, la projection d'une observable dans le cadre des sciences physiques peut conduire à une quantité physique, ce qui est équivalent, dans le cas particulier où elle est mesurable, au doublet (mesure, grandeur) associé à la quantité physique. Par contre, si cette même observable est projetée dans le cadre de rationalité des mathématiques, la mesure est interprétée comme un nombre pur, et la perte d'information dimensionnelle qui s'ensuit peut conduire à des lois physiques fausses. Ainsi, la mobilisation d'un cadre de rationalité inadapté dès l'étape de projection d'éléments de l'espace de réalité peut conduire à des règles en contradiction avec les lois du cadre de rationalité scientifique adéquat. Notre première hypothèse consiste à supposer que les élèves choisissent

spontanément leur cadre personnel des mathématiques pour effectuer le traitement sur les observables quantifiées accessibles lors de l'activité expérimentale menée en cours de sciences physiques. Quant aux raisons de ce choix inadapté de cadre de rationalité, nous émettons l'hypothèse qu'il est dû à une surdétermination de la rationalité des mathématiques qui conduit à oublier la spécificité de la rationalité du cadre physique et en particulier son indispensable référence à l'espace de réalité. Cette surdétermination du cadre des mathématiques que Gil-Perez (1985) qualifie d'« *opérativisme mécanique* », souvent encouragée par le choix des situations de classe proposées par les enseignants et les manuels scolaires, repose implicitement sur l'idée abusive d'un homomorphisme des registres d'un cadre à l'autre : le tableau du cadre mathématique serait le même que le tableau en sciences physiques ; de même pour le graphique. Nous montrerons que cela n'est pas vrai car tout traitement dans un registre donné dépend de la rationalité du cadre choisi. Nous montrerons aussi que les contraintes de traitement imposées par la spécificité de la rationalité du cadre de la physique ne sont presque jamais explicitées en classe.

3.3. Analyse *a priori*

Dans les activités de classe proposées aux élèves au cours des séances décrites dans le présent article, les observables (quantifiées) sont les *digits* visibles sur quatre appareils de mesure d'un circuit électrique très simple et connu de tous. Pour l'enseignant qui, par sa pratique professionnelle quotidienne, n'a plus conscience de l'existence de l'espace de réalité, ces *digits* sont automatiquement transposés dans son cadre personnel de la physique qui peut être confondu avec le cadre didactique de la physique, ce qui lui fait dire : « *on lit directement une tension sur le voltmètre et une intensité sur l'ampèremètre* », les quantités étant représentées par des couples (nombre - unité), les unités étant définies dans un cadre de rationalité scientifique bien identifié. Les observables sont donc implicitement devenues des quantités physiques mesurables. Mais pour l'élève, dont la pratique expérimentale de l'électricité est très limitée (et ce, souvent aux seuls aspects qualitatifs), les nombres affichés par les appareils de mesure sont projetés dans le cadre de rationalité dans lequel ils semblent les plus familiers, à savoir son cadre personnel des mathématiques. L'observable devient donc un nombre. Cette opération prive l'élève de certains moyens de contrôle de cet objet devenu numérique, par l'oubli du contexte (objets et événements) liés à ce nombre dans l'espace de réalité. Cet oubli correspond, après projection dans le cadre mathématique, à l'amputation des situations de référence correspondantes dans le cadre physique (dispositifs expérimentaux, protocoles et limites

d'utilisation des appareils de mesure, etc.) et des concepts attachés à ces situations (courant électrique, tension et intensité, effets thermiques du courant, etc.) avec leurs caractéristiques dimensionnelles.

Première conséquence : les observables quantifiées devenues nombres sont manipulées par les élèves en tant que tels dans des registres (numérique, graphique, tableau, etc.), mais à l'intérieur de leur cadre personnel des mathématiques.

Deuxième conséquence : les règles de combinaison de ces nombres sont celles de l'arithmétique, règles qui ne sont que rarement cohérentes avec celles des grandeurs physiques mesurables reposant sur la compatibilité dimensionnelle.

Troisième conséquence : l'obtention de la loi physique littérale nécessite un retour au cadre de la physique avec transposition des résultats du cadre mathématique. Ce changement de cadre censé aider l'élève dans sa structuration du concept physique de résistance électrique *via* le concept mathématique de proportionnalité, correspond à une rupture de rationalité telle que toute synergie inter-conceptuelle est illusoire.

4. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

4.1. Les prélèvements d'émergence

L'expérimentation s'est déroulée sur trois séances avec chacun des groupes d'une classe de troisième [14–15 ans] de vingt-quatre élèves scindée en deux. Nos données expérimentales sont donc le fruit de six réalisations de deux heures, avec quelques légères variantes d'un groupe à l'autre. Les résultats que nous présentons ici ont été obtenus au cours des deux versions de la deuxième séance. Elles étaient organisées autour de deux « *prélèvements d'émergence* » (Lerouge, 1992), c'est-à-dire des doublets des deux activités suivantes :

- recherche individuelle sur fiche visant à repérer l'émergence de conceptions ou de procédures ;
- puis mise en commun en petits groupes se déroulant sous forme d'un débat (enregistré) animé par un chercheur en didactique.

Le premier prélèvement d'émergence était centré sur la lecture et la présentation des données que sont les *digits* des appareils de mesure et n'a été réalisé qu'auprès du groupe n° 1 de la classe. Le second prélèvement d'émergence avait pour cible le traitement de l'ensemble des données numériques en vue de l'établissement de la loi de proportionnalité entre les

deux quantités physiques $U_{\text{résistor}}$ (tension aux bornes du résistor) et I (intensité du courant le traversant).

4.2. Déroutement de la séance (première version)

4.2.1. Premier prélèvement d'émergence

La séance commence par une introduction expérimentale avec la présentation d'un montage électrique constitué d'un générateur, d'une lampe à incandescence, d'un résistor et d'un ampèremètre, tous branchés en série, et par la présentation simultanée d'une fiche de recherche sur laquelle figurent le dessin et le schéma du montage. Dans un premier temps, il est demandé aux élèves de placer sur le schéma les symboles des trois voltmètres qui permettraient de mesurer les tensions aux bornes du générateur, de la lampe et du résistor. Tous les élèves s'acquittent de cette tâche parfaitement, ce qui indique que tous différencient sans problèmes les conditions de mesure d'une tension et d'une intensité. Le professeur branche tous les appareils de mesure (à affichage par LCD). Les valeurs affichées sous forme de *digits* sont toutes nulles. Après un petit commentaire sur cette observation, le professeur met en marche le générateur. Les nouvelles valeurs affichées sont lues collectivement, en précisant bien à quelles grandeurs elles correspondent. Enfin, on montre aux élèves qu'une variation de la tension aux bornes du générateur de tension continue ajustable entraîne une variation de toutes les quantités affichées. Après cette introduction expérimentale, on explique aux élèves qu'on souhaite étudier comment varient toutes ces quantités physiques, et que, pour ce faire, on a procédé à une série de six groupes de mesures, chaque groupe correspondant aux valeurs affichées par les trois voltmètres et par l'ampèremètre pour une valeur choisie de la tension d'alimentation du circuit. On leur présente les résultats des mesures à l'aide d'un transparent représentant six fois le circuit avec ses appareils de mesures et indiquant la valeur relevée à l'intérieur du symbole de chaque appareil (mais sans indication de l'unité, ce qui correspond à la situation réelle de mesure en classe puisque la plupart des appareils numériques utilisés dans l'enseignement secondaire n'indique aucune unité sur le cadran de mesure). On arrive alors à la phase de prélèvement d'émergence à proprement parler, au cours de laquelle on met les élèves en activité avec les consignes suivantes :

Présente de la manière la plus claire possible les résultats expérimentaux correspondant aux six groupes de mesures (deux groupes relevés directement en classe et quatre présentés au rétroprojecteur).

Justifie ta façon de présenter et explique pourquoi cette façon de présenter te paraît la plus claire.

As-tu une idée de ce que l'on va te demander de faire de ces résultats ?

4.2.2. Deuxième prélèvement d'émergence

On propose ensuite aux élèves un tableau dans lequel figurent tous les résultats des mesures avec indication des grandeurs et des unités correspondantes. Les consignes données aux élèves sont les suivantes :

Observe les valeurs du tableau de la fiche de recherche n° 5 (tableau 1 ci-dessous) et repère des régularités.

Groupe de mesures n°	$U_{\text{générateur}}$ (V)	$U_{\text{résistor}}$ (V)	U_{lampe} (V)	I (A)
1	0	0	0	0
2	5,1	5	0,05	0,05
3	10,8	10	0,70	0,10
4	16,7	15	1,55	0,15
5	23,1	20	2,90	0,20
6	29,5	25	4,25	0,25

Tableau 1 : Première série de mesures de tensions et d'intensités (groupe n° 1)

Écris toutes les lois que respectent $U_{\text{générateur}}$, $U_{\text{résistor}}$, U_{lampe} et I.

a. *Remarque sur la formulation des consignes*

Bien que longuement pensée dans le souci de ne pas orienter les réponses des élèves, la formulation des consignes a été source de problèmes en cours de séance. Ainsi, nous avons choisi le terme de « régularité » pour évoquer des observations relatives aux valeurs du tableau qui se confirmeraient d'une ligne à l'autre, mais nous avons dû revenir oralement sur la signification de ce terme en demandant aux élèves de bien regarder le tableau et de noter sur leur fiche de recherche tout ce

qu'ils remarquaient. De même, pour la deuxième consigne, nous avons choisi le mot « loi » mais les élèves sont très rapidement intervenus pour demander si « loi » voulait dire « formule ».

b. Remarques sur les valeurs du tableau

Les caractéristiques des composants du circuit (notamment des appareils de mesure) et les valeurs consignées dans le tableau proposé aux élèves ont été choisies avec beaucoup de soin. Leur examen attentif permet de faire trois remarques :

– la première, et la plus surprenante, est que la valeur de la tension aux bornes du générateur est égale à la somme des valeurs des tensions aux bornes du résistor et de la lampe, augmentée de la mesure exprimée en ampères de l'intensité circulant dans le circuit. Ceci n'est pas le fruit du hasard mais est dû au fait que l'ampèremètre a été délibérément choisi avec une résistance interne égale à 1Ω , ce qui fait que la loi d'additivité des tensions de la maille, qui s'écrit littéralement dans le cadre de rationalité de la physique :

$$U_{\text{générateur}} = U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} + R_{\text{ampèremètre}} \cdot I$$

devient, dans le cadre de rationalité des mathématiques, et à condition d'utiliser le système d'unités MKSA :

$$\text{mesure}[U_{\text{générateur}}] = \text{mesure}[U_{\text{résistor}}] + \text{mesure}[U_{\text{lampe}}] + \text{mesure}[I] \quad (\text{Relation 1})$$

Cette nouvelle égalité, cohérente avec les règles de rationalité du cadre des mathématiques (due à la valeur numérique très particulière de la résistance interne de l'ampèremètre) ne peut être prise en considération dans le cadre de rationalité des sciences physiques car ne satisfaisant pas aux lois dimensionnelles. Ce choix très particulier est motivé par la volonté de placer ultérieurement l'élève dans une situation permettant de tester la stabilité de ses représentations sur les règles dimensionnelles liées à divers cadres de rationalité. Pour cela :

– les valeurs de la tension aux bornes du générateur ont été ajustées de façon à ce que la tension aux bornes du résistor suive une progression arithmétique (par pas de 5 V) ;

– la proportionnalité entre la tension aux bornes du résistor et l'intensité le traversant (loi d'Ohm) entraîne que la valeur de l'intensité croît aussi régulièrement (raison de 0,05 A).

On propose ensuite aux élèves un nouveau tableau de mesures (tableau 2) obtenues avec le même circuit, mais avec des appareils de mesure légèrement différents (sensibilité, choix des calibres, caractéristiques internes). Les valeurs consignées diffèrent alors légèrement de celles présentées dans le tableau 1.

Groupe de mesures n°	U générateur (V)	U résistor (V)	U lampe (V)	I (A)
1	0	0	0	0
2	5,1	5	0,1	0,05
3	10,8	10	0,8	0,10
4	16,8	15	1,8	0,15
5	23,1	20	3,1	0,20
6	29,6	25	4,6	0,25

Tableau 2 : Deuxième série de mesures de tensions et d'intensités (groupe n° 1)

L'observation attentive des nouvelles mesures révèle qu'elles ne satisfont plus à la surprenante relation I mais qu'elles vérifient néanmoins, comme les mesures du tableau 1, la relation approchée :

$$U_{\text{générateur}} \approx U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} \quad (\text{Relation II})$$

Notre choix de présenter ensemble ces deux tableaux de mesures légèrement différentes d'un point de vue numérique, mais conduisant à des « régularités » contradictoires, est fait pour placer les élèves dans une situation déstabilisante permettant de recueillir leurs conceptions de la « loi » ou de la « formule », mais surtout de tester la stabilité de leurs représentations sur l'homogénéité dimensionnelle des grandeurs physiques. Les consignes données aux élèves sont les suivantes :

Compare les valeurs des tableaux de mesures. Qu'en penses-tu ?

Observe bien ces nouvelles valeurs, repère des régularités, et écris toutes les lois que respectent $U_{\text{générateur}}$, $U_{\text{résistor}}$, U_{lampe} et I.

En comparant les valeurs des deux tableaux (et qui semblent contradictoires) penses-tu pouvoir affirmer que certaines d'entre elles sont fausses ? Explique ce qui motive ton idée.

4.3. Déroulement de la séance (deuxième version)

Les élèves du groupe n° 2 assistent, eux aussi, à la présentation du montage électrique et aux mesures de tensions et d'intensités mais, par contre, il ne leur est pas demandé de présenter sous la forme la plus claire possible les résultats expérimentaux des séries de mesures, car ces derniers

figurent au verso de leur fiche de recherche sous la forme suivante (tableau 3) :

Premier groupe de mesures			
$U_{\text{générateur}} = 0 \text{ V}$	$U_{\text{résistor}} = 0 \text{ V}$	$U_{\text{lampe}} = 0 \text{ V}$	$I = 0 \text{ A}$
Deuxième groupe de mesures			
$U_{\text{générateur}} = 5,1 \text{ V}$	$U_{\text{résistor}} = 5 \text{ V}$	$U_{\text{lampe}} = 0,05 \text{ V}$	$I = 0,05 \text{ A}$
Troisième groupe de mesures			
$U_{\text{générateur}} = 13 \text{ V}$	$U_{\text{résistor}} = 12 \text{ V}$	$U_{\text{lampe}} = 0,88 \text{ V}$	$I = 0,12 \text{ A}$
Quatrième groupe de mesures			
$U_{\text{générateur}} = 23 \text{ V}$	$U_{\text{résistor}} = 20 \text{ V}$	$U_{\text{lampe}} = 2,80 \text{ V}$	$I = 0,20 \text{ A}$
Cinquième groupe de mesures			
$U_{\text{générateur}} = 34 \text{ V}$	$U_{\text{résistor}} = 28 \text{ V}$	$U_{\text{lampe}} = 5,72 \text{ V}$	$I = 0,28 \text{ A}$

Tableau 3 : **Série de mesures de tensions et d'intensités (groupe n° 2)**

Les consignes sont les suivantes :

Observe très attentivement les groupes de valeurs. Que remarques-tu ?
 En respectant l'ordre chronologique, détaille le cheminement de ta pensée lorsque tu as observé les divers groupes de valeurs.
 Que cherchais-tu en observant les valeurs des mesures ? Explique.

Puis, plus tard :

Écris les différentes relations (d'égalité, d'inégalité ou de voisinage, etc.) que respectent $U_{\text{générateur}}$, $U_{\text{résistor}}$, U_{lampe} et I .

Ensuite, une fois que les élèves ont écrit les lois physiques reliant les données expérimentales du tableau 3, on leur propose la consigne suivante :

Tu as peut-être remarqué que dans chaque ligne, la valeur de la première cellule est :

1. d'une part égale à la somme des valeurs de toutes les autres cellules de la ligne ;
2. d'autre part très voisine de la somme des valeurs des deux cellules suivantes.

Par exemple, pour la ligne n° 2, on a :

$$5,1 = 5 + 0,05 + 0,05 \quad \text{et} \quad 5,1 \approx 5,05 \quad (5 + 0,05)$$

Parmi les deux formules suivantes,

$$U_{\text{générateur}} = U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} + I \quad \text{et} \quad U_{\text{générateur}} \approx U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}}$$

laquelle te satisfait le plus et pourquoi ?

Enfin, un travail leur est demandé, dans le but de les faire s'exprimer sur leurs représentations de la proportionnalité, et pour déterminer dans quelle mesure ils sont capables de repérer une relation de proportionnalité entre $U_{\text{résistor}}$ et I .

a. *Remarques à propos des consignes*

On peut noter que la formulation des consignes a changé entre les deux groupes pour devenir très vague et ne rappeler ni le vocabulaire du cadre des mathématiques (« régularité », « formule »), ni celui du cadre de la physique (« loi »).

b. *Remarques à propos des valeurs des mesures*

Les caractéristiques des composants du circuit et notamment celles des appareils de mesure ainsi que les valeurs consignées dans le tableau proposé aux élèves ont été choisies de façon identique pour les deux groupes. Cependant, l'observation attentive du nouveau tableau de mesures révèle que les valeurs de la tension $U_{\text{résistor}}$ et de l'intensité I ne sont plus en progression arithmétique.

5. ANALYSE DES PRODUCTIONS D'ÉLÈVES

Notre analyse des productions d'élèves s'articule autour de trois thèmes :

– le premier de ces thèmes est relatif au choix spontané de cadre de rationalité (mathématique ou physique) fait par l'élève pour projeter les observables que sont les résultats expérimentaux. Il est fortement connecté au problème de la nature dimensionnelle des quantités physiques, ou a-dimensionnelle des nombres mathématiques ;

– le deuxième thème est celui de la transportabilité d'un concept (ici, le concept de proportionnalité) d'un cadre à l'autre ;

– enfin, le dernier thème est celui de la différence de nature des règles de validation propres aux cadres de rationalité physique et mathématique.

5.1. Choix spontané d'un cadre de rationalité

5.1.1. Présentation des données expérimentales

Alors que plusieurs types de présentations des résultats étaient possibles, c'est le registre des tableaux qui a été majoritairement employé par les élèves (7/12) du groupe n° 1. Très peu nombreux (2/12) sont ceux qui ont recours à des listes mais la mise en page employée laisse encore penser à une mise en colonne des données. La justification du choix du tableau, lorsqu'elle est exprimée, fait référence à la « *précision* » (?) et à la nature courante de l'utilisation de ce mode de présentation.

« *Tout le monde sait lire un tableau et c'est précis* » (Cécile).

Les autres élèves (3/12) ne respectent pas la consigne et cherchent tout de suite des régularités dans l'ensemble des nombres fournis. Cette prédominance du choix du registre tableau nous incitait à penser que la disposition des données expérimentales pousserait les élèves à les comparer comme des nombres et non comme des quantités physiques. C'est effectivement ce que nous avons constaté.

« *Dans un tableau, les résultats sont alignés. Ainsi, on peut les comparer* » (Benoît).

Le choix systématique, mais implicite, du cadre de rationalité des mathématiques au dépend du cadre de la physique a alors entraîné une disparition massive de renseignements relatifs à la nature physique des grandeurs mesurées, soit par l'oubli des unités, soit par l'absence de titres de colonnes et/ou de lignes du tableau. Ainsi, seulement deux élèves conservent, dans leur présentation, toutes les données physiques correspondant aux mesures (nature de la grandeur mesurée et unité). Le premier organise les données en regroupant sur une même ligne les quatre mesures correspondant à une valeur donnée de la tension aux bornes du générateur, en précisant les unités et en indiquant bien, en tête de colonne, la grandeur mesurée, et, en tête de ligne, le groupe de mesures. Une couleur différente est même affectée aux grandeurs (rouge pour les trois tensions, vert pour l'intensité). C'est pourtant lui qui invoque l'influence favorable de l'alignement sur la comparaison des données, preuve que la prise de conscience de la nature dimensionnelle des quantités physiques n'implique pas l'impossibilité de les comparer. Pour présenter les résultats des mesures, le deuxième élève combine schéma et tableau sans unité ni titres de colonnes, mais en couplant par une flèche chaque colonne au symbole, sur le schéma, de l'appareil de mesure correspondant. Bien qu'implicites, les informations relatives aux mesures (grandeur mesurée et unité) ne sont donc pas perdues pourvu que le lecteur du tableau soit capable de coupler

grandeur physique et unité correspondante (ce qui était le cas de tous les élèves de cette classe). L'élève confirme cela en affirmant :

« *Quand je relirai le tableau, je comprendrai tout grâce au circuit* » (Christophe).

Tous les autres élèves ayant eu recours à une présentation de type tableau oublient, soit partiellement, soit totalement, d'indiquer les grandeurs mesurées et/ou les unités. Ainsi, au cours de la saisie de l'information par les élèves, la perte de renseignements sur la nature et/ou la dimension des grandeurs mesurées s'effectue de la façon suivante :

- perte totale d'information pour 6/12 élèves ;
- perte partielle d'information pour 2/12 élèves ;
- perte partielle d'information pour une élève à cause d'une erreur (intensité mesurée en volts).

Parmi les élèves qui ont perdu toute l'information dimensionnelle, on retrouve tous ceux (4/6) qui n'ont pas eu recours au tableau (ou à une forme approchée), et en particulier tous ceux qui sont passés directement par le registre algébrique pour rechercher des lois d'additivité régissant les valeurs numériques, sans travail de présentation des données sur leur fiche de recherche (3/3). Le passage direct de l'espace de réalité au registre algébrique par la recherche immédiate de lois semble donc fortement corrélé à une perte totale d'informations dimensionnelles. Notons enfin que les seuls élèves ayant fait référence au dispositif expérimental (3/12) sont aussi les seuls à expliciter l'intérêt du tableau (bien qu'un seul d'entre eux ait conservé toute l'information dimensionnelle). La simple opération de lecture et de présentation des observables que sont les *digits* d'appareils de mesure en fonctionnement dans un circuit peut donc se faire dans des registres différents (tableau, algébrique, etc.) et dans des cadres différents de rationalité (cadre personnel de la physique ou des mathématiques), mais la grande majorité des élèves fait le choix de projeter les observables dans le cadre mathématique (avec une prédominance du registre des tableaux), ce qui se traduit par une perte de l'information sur les grandeurs mesurées et en particulier sur les unités. La référence au dispositif expérimental, et donc à l'espace de réalité, est ainsi perdue avant tout traitement des données.

5.1.2. Anticipation sur le traitement des données

À la question « *as-tu une idée de ce que l'on va te demander de faire de ces résultats ?* », les élèves du groupe n° 1 semblent indiquer, dans leur grande majorité (11/12), que la présentation des résultats doit être suivie d'un traitement. En particulier, presque tous ceux qui ont proposé

une présentation des résultats des mesures (7/9) s'attendent à utiliser leur dispositif de présentation plutôt que les données brutes du transparent sur lequel figurent pourtant toutes les informations relatives aux mesures. Plusieurs élèves (8/12) proposent de comparer ou d'additionner les nombres pour chercher à « vérifier ». Parmi eux se trouvent les trois élèves qui n'ont pas respecté la consigne de présentation des résultats et qui sont passés directement à la recherche d'une « loi ». Enfin, et surtout, il faut noter que les termes tension, intensité, volt, ampère, générateur, résistor, lampe, etc. disparaissent presque totalement du discours des élèves au moment de leur argumentation. Ainsi, rares (3/12) sont les élèves qui utilisent au moins un mot du vocabulaire du cadre culturel de la physique. Ce sont d'ailleurs ces mêmes élèves qui relient dans leurs explicitations les données numériques et le dispositif expérimental.

« On va me demander de chercher une relation entre les résultats mais aussi de voir si l'augmentation des valeurs entraîne que la lampe va plus ou moins s'éclairer » (Cécile).

« On va me demander d'expliquer pourquoi les mesures sont différentes entre la lampe, le résistor et l'ampèremètre, alors que le générateur fournit une tension appropriée aux divers éléments du circuit » (Coralie) (noter la confusion entre tension et intensité).

« On va me demander de faire un tableau de proportionnalité entre la tension de la pile et des autres éléments, et l'intensité » (Benoît).

Le choix du cadre de rationalité des mathématiques est donc perceptible jusque dans le vocabulaire employé, c'est-à-dire dans le registre de la langue naturelle.

5.1.3. Recherche de régularités dans le tableau de mesures

Cette étape, préalable à l'activité de recherche de lois entre les quantités physiques mesurées devait permettre d'identifier les procédures suivies par les élèves pour repérer des régularités dans un ensemble de mesures. L'hypothèse *a priori* d'une dérive spontanée vers le cadre des mathématiques nous laissait augurer un repérage massif de lois numériques sans qu'aucune attention ne soit portée à la grandeur des quantités mesurées. Ainsi, outre la relation de proportionnalité entre la tension aux bornes du résistor $U_{\text{résistor}}$ et l'intensité I du courant le traversant (loi d'Ohm), le choix des valeurs du tableau 1 nous portait à attendre la relation I :

$$\text{mesure } [U_{\text{générateur}}] = \text{mesure } [U_{\text{résistor}}] + \text{mesure } [U_{\text{lampe}}] + \text{mesure } [I] \quad (\text{Relation } I)$$

(mais présentée de manière moins élégante par confusion des mesures avec les quantités mesurées). Nous nous attendions aussi à ce que les

élèves remarquent les évolutions des quantités aussi bien d'un groupe de mesures à un autre (dus à l'augmentation de la valeur de la tension aux bornes du générateur) qu'à l'intérieur d'un groupe de mesures (classement comparatif des valeurs des tensions et de l'intensité). Par contre nous ne comptons pas que soient spontanément proposées des relations de voisinage telles que la loi approximative d'additivité des tensions :

$$U_{\text{générateur}} \approx U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} \quad (\text{Relation II})$$

En fait, les réponses des élèves diffèrent assez d'un groupe à l'autre et cela est dû au fait que, pour cette phase d'ingénierie, trois variables didactiques varient simultanément :

- la formulation de la consigne et en particulier l'usage ou non du mot « régularité »,
- la présentation des résultats sous forme soit d'un tableau, soit d'une liste,
- et les valeurs des mesures (progression régulière ou non des valeurs de la tension $U_{\text{résistor}}$ et de l'intensité I).

Les deux premières variables didactiques semblent n'avoir eu qu'un effet très limité confirmé par les remarques des élèves au cours du mini-débat. Par contre, la troisième va jouer un rôle parasite plus important sur lequel nous reviendrons en détail plus loin car il n'influe fortement que sur la découverte de la loi de proportionnalité entre $U_{\text{résistor}}$ et I . Ainsi, aucun élève des deux groupes ne relève que les valeurs dans un même groupe de mesures (ou sur une même ligne) satisfont la relation :

$$\text{mesure } [U_{\text{générateur}}] = \text{mesure } [U_{\text{résistor}}] + \text{mesure } [U_{\text{lampe}}] + \text{mesure } [I] \quad (\text{Relation I})$$

que nous nous attendions pourtant à trouver massivement. Nous verrons que ce n'est qu'ultérieurement que cette relation apparaîtra aux élèves. Leurs autres observations peuvent être classées en trois types :

- relations d'inégalité (4/23) :

$$\text{« } U_{\text{générateur}} > U_{\text{résistor}} \text{ »}$$

$$\text{« } U_{\text{résistor}} > U_{\text{lampe}} \text{ »}$$

$$\text{« } U_{\text{lampe}} > I \text{ » ;}$$

- relations de voisinage (2/23) :

$$\text{« } U_{\text{générateur}} \approx U_{\text{lampe}} \text{ »}$$

$$\text{« } U_{\text{lampe}} \approx I \text{ » ;}$$

- relations d'évolution (6/23) :

$$\text{« Quand } U_{\text{générateur}} \text{ augmente, alors } U_{\text{résistor}}, U_{\text{lampe}} \text{ et } I \text{ augmentent aussi ».}$$

On constate que les élèves proposent des relations, sans se soucier particulièrement des règles d'homogénéité dimensionnelle spécifiques de la rationalité du cadre de la physique. Les réponses écrites dans les fiches de recherche et les commentaires formulés pendant le mini-débat confirment cette insouciance quasi générale aussi bien face aux grandeurs des quantités mesurées qu'aux unités qui accompagnent les valeurs numériques des mesures. Ainsi, nombreux (10/12) sont les élèves du groupe n° 1 qui, lorsqu'ils recherchent des régularités dans le tableau 1 des mesures, qui indiquait pourtant très clairement pour chaque colonne la grandeur mesurée et l'unité associée, omettent les mots « tension » ou « intensité » :

- « *Je vois une régularité du résistor* » (Ragina) ;
- « *La lampe et l'ampère donnent des valeurs proches* » (Souad) ;
- « *Générateur > résistor > lampe > intensité* » (Anta).

De même, lorsqu'ils veulent indiquer que la tension aux bornes du résistor progresse entre chaque groupe de mesures de 5 V (idem pour la progression de l'intensité de 0,05 A), presque tous les élèves (9/10) n'indiquent, à aucun moment, d'unité :

« *Le résistor augmente de 5 en 5 et l'intensité de 0,05 en 0,05* » (Christophe).

Le même type de comportement est constaté avec les élèves du groupe n° 2 :

- « *La valeur qui passe aux bornes du résistor est toujours supérieure à la lampe* » (Farid) ;
- « *U_{lampe} est toujours supérieur à I* » (Naouel).

Lorsque, exceptionnellement, les unités sont conservées, on note un malaise pour exprimer les observations :

- « *Lorsque le volt est transformé en ampère, la valeur de U se divise par 100 ; exemple : $20 \text{ V} : 100 = 0,20 \text{ A}$* » (Naouel) ;
- « *Pour convertir les volts en ampère, il suffit de diviser par 100* » (Hafida).

Ainsi, la majorité des élèves du groupe n° 2 perd l'information dimensionnelle contenue dans les données expérimentales, soit totalement (5/11), soit de façon partielle (2/11). Il ne faudrait pas croire pour autant que, parmi les élèves restants, les observations soient satisfaisantes. Par exemple, deux élèves n'arrivent à formuler que l'observation suivante :

« *Dans les trois premières colonnes, les valeurs sont exprimées en volts, alors que dans la dernière elles sont exprimées en ampères* » (Noémie).

En conclusion, nous pouvons affirmer que l'oubli de toute information dimensionnelle, déjà constaté dans le relevé et la présentation de résultats expérimentaux (première phase du prélèvement d'émergence) se retrouve encore lors de l'activité d'observation d'un ensemble de données dimensionnées. Cet oubli systématique ne peut donc plus être considéré comme tel et nous devons admettre que le traitement des données expérimentales du registre des tableaux se fait dans le cadre mathématique.

5.1.4. Commentaires sur la stratégie de recherche

Seuls les élèves du groupe n° 2 étaient invités à expliciter par écrit leur stratégie d'observation de données expérimentales. On apprend ainsi que, pour les élèves ayant repéré des lois numériques, la stratégie la plus couramment employée (4/7) consiste à comparer d'abord les nombres d'une même colonne avant de regarder ligne par ligne. L'élève s'intéresse donc d'abord aux diverses valeurs d'une même grandeur physique, ce qui révèle qu'il n'a pas compris que le choix des valeurs d'une même colonne est fixé arbitrairement par l'expérimentateur au cours du réglage du générateur. Les élèves commencent souvent par rechercher dans le tableau des nombres égaux, puis des propriétés d'additivité et enfin des relations de proportionnalité. Une analyse du vocabulaire employé révèle un emploi majoritaire des mots « nombres » et « chiffres » au dépend des mots « tension », « intensité » ou « mesure » du cadre de la physique. Ainsi, au delà d'informations sur leur façon de lire les données contenues dans un ensemble structuré, nous avons encore confirmation que les élèves ont une lecture exclusivement numérique de ces données. Tensions et intensités perdent leur identité et, si les mots qui les désignent apparaissent quelques fois, ce n'est que par pure raison de commodité, pour identifier la colonne concernée par leurs observations. Certains n'hésitent d'ailleurs pas à exprimer les limites de l'activité demandée en affirmant :

« Je voyais dans ce tableau des valeurs qui n'avaient aucune signification » (Maguy).

5.1.5. Passage des régularités numériques aux lois physiques

Un des buts de cette deuxième phase de prélèvement d'émergence était d'étudier, par ses productions, l'activité de l'élève cherchant à proposer des lois physiques après avoir découvert des régularités numériques dans un ensemble de données expérimentales. Comme le constatent Robardet & Guillaud (1997), cette étape de nature inductive est fréquemment employée dans l'enseignement de la physique au collège et au lycée, et elle peut conduire à des dérives qui mettent en évidence la dualité de la démarche inductiviste. En effet, pour Joshua, « la relation à l'expérimental est

massivement présente dans l'enseignement secondaire de la physique, mais ce rapport est essentiellement ambigu. Il est profondément marqué par l'inductivisme, lequel est à la fois une option épistémologique concernant la physique, et une option pédagogique proprement dite » (Joshua, 1989, p. 29). Notre objectif de recherche étant de tester *in situ* un modèle permettant l'analyse des processus de conceptualisation, nous avons retenu aussi cette démarche inductive pour pouvoir « coller à la réalité des pratiques de classe ». Néanmoins, d'importantes différences ont été introduites dans le déroulement de la séquence par rapport au fonctionnement usuellement mis en œuvre, car la stratégie d'ingénierie impose de privilégier les seules options pédagogiques qui peuvent conduire à une optimisation du recueil d'informations à visée de recherche. Dit en d'autres termes, nous avons choisi de mettre l'élève dans une situation d'inductivisme épistémologique en évitant, de notre part, tout inductivisme pédagogique.

L'étape demandée aux élèves était donc la dernière d'une succession que nous avons modélisée de façon simpliste ainsi :

- relevé des mesures (passage de l'espace de réalité au registre numérique du cadre mathématique) ;

- recherche de régularités numériques (traitement dans le registre numérique du cadre mathématique) ;

- formulation de lois (passage du registre numérique du cadre mathématique au registre analytique du cadre physique). À ce propos, on notera que des recherches ont déjà été menées, aussi bien en didactique des mathématiques qu'en didactique de la physique, sur les problèmes liés au passage d'un ensemble discret de données numériques à une expression analytique, mais qu'aucune d'elles ne repose sur une analyse en termes de changement de cadre et/ou de registre sémiotique.

Ayant eu confirmation que les élèves avaient fonctionné, jusqu'à cette étape, dans le registre numérique du cadre mathématique, la formulation de la loi demandait de leur part des changements simultanés de registre et de cadre. La première observation que nous pouvons tirer des productions d'élèves et des commentaires oraux formulés pendant le mini-débat qui a suivi, est le constat d'une confusion entre les « régularités » numériques et les « lois » physiques. Nous reviendrons sur ce point dans le paragraphe traitant de la procédure inductive d'élaboration des lois dans le cadre de la physique. La deuxième observation obtenue à partir des fiches de recherche traduit le fait que les lois proposées ne correspondent pas forcément aux observations numériques sur les mesures. Ainsi, seules les égalités sont considérées comme pouvant conduire à des lois. On se retrouve donc avec une majorité d'élèves (9/12) écrivant la relation littérale suivante :

$$U_{\text{générateur}} = U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} + I$$

alors qu'aucune relation littérale d'inégalité ou de voisinage n'est proposée. De plus, une régularité du type progression arithmétique des valeurs de la tension $U_{\text{résistor}}$ ou de celles de l'intensité I ne leur paraît pas pouvoir conduire à une loi, non pas parce qu'elle n'est pas une règle reliant des quantités physiques différentes entre elles, mais parce qu'elle ne leur semble pas pouvoir s'écrire sous une forme algébrique familière (addition, multiplication, rapport). Enfin, la phase (menée de façons très différentes d'un groupe à l'autre) de comparaison des relations :

$$U_{\text{générateur}} = U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}} + I \quad \text{et} \quad U_{\text{générateur}} \approx U_{\text{résistor}} + U_{\text{lampe}}$$

à conduit les élèves à affirmer leur préférence pour l'égalité stricte. Parmi les justifications de ce choix, on trouve, de façon massive, une remarque sur la hiérarchie entre les égalités exactes ou approximatives :

« *La première loi est la meilleure parce qu'on a un signe = alors que l'autre n'est qu'une loi approximative* » (Maggy).

Le mot précis revient souvent :

« *Une formule pas précise n'est pas juste* » (Hajera).

De nombreux élèves justifient aussi leur choix en affirmant que la formule la meilleure est celle qui n'oublie aucune des données proposées par l'enseignant :

« *On doit utiliser toutes les valeurs car sinon, ce n'est pas la peine de les mettre dans le tableau* » (Frédéric).

Il s'agit ici de la manifestation d'un problème de contrat didactique déjà repéré, notamment en mathématiques, et l'on pense immédiatement à « l'âge du capitaine » (Baruk, 1985). Quelques rares élèves invoquent enfin des raisons physiques mais qui dénotent toujours une confusion entre les objets de l'espace de réalité et les quantités physiques :

« *La tension du générateur est égale à la somme des autres parce que $U_{\text{résistor}}$, U_{lampe} et I sont en série* » (Hajera).

D'autres, qui ont mémorisé des connaissances d'électricité, essaient de les appliquer en se heurtant à des difficultés dimensionnelles liées à une distinction insuffisante des grandeurs physiques tension et intensité :

« *La tension du générateur est égale à la somme des autres tensions. Je ne suis pas arrivée à convertir I* » (Nadia).

Enfin, les réponses orales des élèves laissent penser que le fait que $U_{\text{résistor}}$, U_{lampe} , $U_{\text{générateur}}$ et I varient simultanément implique de les faire intervenir dans une seule et même relation.

Comme on peut le constater, les raisons liées à la différence de nature dimensionnelle des objets des cadres de rationalité des mathématiques et de la physique sont totalement absentes du discours permettant la discrimination de lois physiques à partir de relations numériques. Cet état de fait repose sur la supposition implicite, de la part des élèves, d'un homomorphisme des registres et d'une transportabilité des relations d'un cadre de rationalité à l'autre. Ainsi, les critères qui permettraient de valider une loi dans le cadre de la physique sont des critères de hiérarchisation des relations du cadre des mathématiques.

5.1.6. Conclusion à propos de la dimensionnalité des données numériques

Lorsque, en cours de sciences physiques, l'enseignant propose à ses élèves un ensemble de mesures (la plupart du temps présenté sous forme de tableau), en leur demandant de rechercher des propriétés que respecteraient ces données expérimentales, il apparaît entre lui et ses élèves un malentendu dont aucun des acteurs n'est réellement conscient et que révèlent ces premiers résultats de notre travail de recherche, fondé sur une analyse du fonctionnement de la classe, en termes de cadre de rationalité. En effet, pour le maître, les données expérimentales sont des quantités physiques et non des mesures, c'est-à-dire qu'il affecte à chaque nombre (la mesure) une grandeur associée (souvent abusivement confondue avec une unité). L'enseignant se situe donc implicitement et de façon absolument inconsciente dans le cadre de la physique. Or ce cadre est régi par des règles de rationalité propres, dont la compatibilité dimensionnelle. Il sait donc que les mesures qu'il propose à ses élèves ne peuvent pas être traitées n'importe comment, et en particulier comme des nombres. De leur côté, les élèves considèrent les mesures consignées dans le tableau comme des données purement numériques, c'est-à-dire qu'ils se placent, pour leur recherche, dans le cadre didactique des mathématiques dont la rationalité est bien différente de celle du cadre culturel des sciences physiques. Ils supposent implicitement que toute propriété régissant ces nombres pourra être transposée telle quelle dans le cadre physique pour établir des lois liant les quantités physiques mesurées par ces nombres. La transparence entre cadre étant donc implicitement acceptée comme postulat de travail par le maître et ses élèves, c'est sur la sélection des registres que se porte l'attention des élèves. Cette analyse, construite sur une séance faisant intervenir le seul registre des tableaux, écriture symbolique et langue maternelle, est confirmée par les résultats de la suite de l'expérimentation (Malafosse et al., à paraître) où intervient aussi le registre graphique.

5.2. Importation du concept de proportionnalité dans le cadre de la physique

5.2.1. Anticipation sur le traitement des données

Dès le début des activités de recherche, les élèves du groupe n° 1 étaient confrontés au problème de la proportionnalité. Cependant, à la question « *as-tu une idée de ce que l'on va te demander de faire de ces résultats ?* », rares sont ceux qui pensent qu'on va leur demander de chercher une loi de proportionnalité (2/11) ou qu'on va leur faire construire un graphique (2/11). Deux d'entre eux se distinguent par leur capacité d'anticipation. Ainsi, Frédéric, qui a présenté les résultats des mesures alignés sous forme de série, suggère la recherche de règles de proportionnalité :

« Je pense que l'on va nous demander de comparer les résultats pour savoir s'ils sont dans des rapports égaux. Ainsi on aura un moyen pour trouver un nombre manquant » (Frédéric).

Benoît, qui avait proposé une présentation parfaite sous forme de tableau, va même plus loin en affirmant :

« On va me demander de faire un tableau de proportionnalité... » (Benoît),

mais surtout il dessine sur sa copie un repère cartésien où sont indiquées en abscisse l'intensité et en ordonnée une tension (celle aux bornes de la pile).

5.2.2. Recherche de régularités dans le tableau de mesures

Les valeurs des données expérimentales proposées aux élèves et consignées dans les tableaux 1 et 3 étaient telles que nous nous attendions au repérage massif des deux relations suivantes :

$$\text{mesure } [U_{\text{générateur}}] = \text{mesure } [U_{\text{résistor}}] + \text{mesure } [U_{\text{lampe}}] + \text{mesure } [I] \quad (\text{Relation I})$$

$$\text{mesure } [U_{\text{résistor}}] = 100 \cdot \text{mesure } [I] \quad (\text{Relation III})$$

cette dernière correspondant à la relation de proportionnalité entre la tension aux bornes du résistor $U_{\text{résistor}}$ et l'intensité I du courant le traversant (loi d'Ohm). Or, les réponses données par les élèves diffèrent fortement d'un groupe à l'autre. Cela est dû au rôle parasite important joué par la troisième variable didactique relative aux valeurs de $U_{\text{résistor}}$ et de I . En effet, les élèves du groupe n° 1 disposent de valeurs plus particulières que celles proposées au groupe n° 2, puisque la tension aux bornes du résistor, et donc l'intensité du circuit, croissent suivant une progression arithmétique (voir tableaux 1

et 3). On note ainsi que presque tous les élèves (10/12) du premier groupe repèrent dans le tableau n° 1 que I augmente par pas de 0,05 et autant, mais pas toujours les mêmes, relèvent que la tension $U_{\text{résistor}}$ varie de 5 en 5. Bien sûr, cette remarque ne peut être faite par les élèves du groupe n° 2 qui disposent, pour leur part, des valeurs du tableau n° 3 qui ne présentent pas cette particularité. Le repérage de cette propriété par les élèves du groupe n° 1 semble avoir fortement perturbé, voire empêché, leur éventuelle découverte de la loi d'Ohm. En effet, ils ne sont que très peu (2/12), dans ce groupe, à noter la relation de proportionnalité entre $U_{\text{résistor}}$ et I , alors qu'ils sont majoritaires (7/11) dans l'autre groupe. Les remarques écrites et orales des élèves confirment que cet écart est dû au fait que leur attention parasitée a été orientée vers les progressions régulières des valeurs de $U_{\text{résistor}}$ et I , sans qu'ils les mettent en relation entre elles. Ainsi, alors que nous avons volontairement choisi des valeurs de $U_{\text{résistor}}$ et de I afin que les élèves repèrent des progressions régulières simultanées de ces deux grandeurs et découvrent ainsi plus aisément un lien entre elles, c'est l'effet inverse qui a été obtenu.

5.2.3. Commentaires sur la stratégie de recherche

Les élèves indiquent souvent qu'ils commencent par rechercher, dans un tableau, des nombres égaux, puis des propriétés d'additivité et enfin des relations de proportionnalité, mais il semble que leurs stratégies soient influencées par le vocabulaire employé dans la formulation des consignes. Ainsi, pour les élèves du groupe n° 1, qui ont pu expliciter leur démarche de recherche de régularités pendant le mini-débat, le sens du mot « régularité » qui avait nécessité un bref commentaire en début d'activité a pu être affiné. Pour eux, il y a régularité si, à l'aide des données numériques proposées, on peut retrouver la valeur d'une donnée manquante. Selon cette proposition, il devient évident que la progression de l'intensité par pas de 0,05 A est une régularité. L'élève est en effet persuadé de pouvoir prédire que l'intensité pour le prochain groupe de mesures sera de 0,3 A, alors qu'on sait bien que toutes les valeurs d'un nouveau groupe de mesures sont fixées arbitrairement par le choix de la tension délivrée par le générateur. Ces mêmes élèves affirment avoir recherché d'abord des régularités verticales, en regardant la progression des valeurs d'une même colonne, puis horizontale en comparant les valeurs d'une même ligne et en découvrant une loi d'additivité. Invités à proposer d'autres types de régularités que les progressions arithmétiques et les relations d'additivité, ils découvrent, tardivement pour la plupart, que la proportionnalité peut être considérée comme une régularité et que le tableau est d'ailleurs souvent un outil utilisé pour mettre en évidence une relation de proportionnalité. Malheureusement, comme nous le verrons plus loin, leur conception de la proportionnalité

semble limitée au produit en croix et ils paraissent incapables de mettre en application cette technique lorsqu'ils disposent de plus de quatre données numériques. En particulier, la presque totalité du groupe (10/12) ne voit pas de lien entre la proportionnalité et la comparaison des valeurs des deux colonnes $U_{\text{résistor}}$ (V) et I (A).

5.2.4. Formulation de la loi d'Ohm

En grande partie à cause de la progression arithmétique des valeurs de la tension $U_{\text{résistor}}$ et de l'intensité I, le passage du repérage d'une régularité de type proportionnalité entre $U_{\text{résistor}}$ et I à la formulation littérale conduit un seul des 12 élèves du groupe n° 1 à une expression de la loi d'Ohm sous la forme : $I = U_{\text{résistor}} / 100$.

De leur côté, les élèves du groupe n° 2 sont en grande majorité (9/11) capables d'écrire correctement la loi littérale sous la forme : $U_{\text{résistor}} = 100 \cdot I$.

Pourtant une grande prudence doit être de mise dans l'interprétation de ce dernier résultat. En effet, il ne semble pas évident que les élèves interprètent bien cette relation littérale comme une relation de proportionnalité entre $U_{\text{résistor}}$ et I, car à la question :

Cette formule correspond-elle à une relation de proportionnalité ? Pourquoi ?

ils sont peu nombreux (6/10) à répondre par l'affirmative. Parmi eux, aucun, dans ses explications, n'a recours aux mots « tension » et « intensité ». Par contre, presque tous (5/6) justifient leur réponse en évoquant un « coefficient » :

- « *Oui, parce qu'ils ont le même coefficient* » (Hafida) ;
- « *Ils ont le même coefficient. C'est donc une conversion et je sais qu'une conversion est une relation de proportionnalité* » (Hajera).

Cette absence, déjà constatée, de référence au cadre de la physique nous a poussés à sonder les élèves sur leurs représentations de la proportionnalité. Pour ce faire, un enseignant de mathématiques de l'équipe de recherche a dirigé deux mini-débats sur ce thème, suivis d'entretiens (voir un extrait présenté en annexe). Ils permettent de mesurer les difficultés rencontrées par les élèves, qui, bloqués dans le registre numérique qu'ils couplent abusivement au cadre mathématique, ne parviennent que difficilement à situer les nombres qu'ils manipulent dans le cadre de rationalité dans lequel ils ont un sens, celui de la physique. De plus, ils confirment que le concept de proportionnalité n'est pas structuré à l'intérieur même du cadre mathématique. En particulier, l'existence d'un coefficient

de proportionnalité conçu comme le facteur multiplicatif permettant de passer d'un ensemble ordonné de nombres à un autre ensemble ordonné de nombres de même cardinal n'est pas connecté à la fonction linéaire. Ce même coefficient de proportionnalité n'est pas conçu comme opérationnel dans la technique du produit en croix. Enfin, cette technique semble limitée à la seule vérification de la proportionnalité appliquée à un ensemble de quatre nombres et jamais plus.

5.2.5. Conclusion à propos du transport du concept de proportionnalité

Dans l'étude de la loi d'Ohm, l'enseignant de sciences physiques fait traditionnellement référence, auprès de ses élèves, au concept de proportionnalité du cadre mathématique car il pense que le passage d'un cadre à l'autre permettra de structurer le concept de résistance par l'entremise du concept de proportionnalité. Or les résultats de notre expérimentation indiquent clairement que, dans le seul cadre de rationalité des mathématiques, la trame conceptuelle de la proportionnalité repose sur plusieurs registres et que les congruences inter-registres qui devraient lui donner un sens ne sont pas forcément construites. En particulier la constance du rapport des couples de nombres ne semble pas liée fortement à l'application linéaire, le coefficient de proportionnalité n'étant pratiquement jamais interprété comme le nombre « a » de la relation fonctionnelle $y = a.x$. Le concept de proportionnalité / linéarité du cadre des mathématiques est donc un concept éclaté. Par ailleurs, la différence de rationalité entre les cadres culturels mathématique et physique, notamment du point de vue dimensionnel impose la plus grande prudence au sujet d'une présentation trans-cadre de la proportionnalité. En effet, les mini-débats révèlent que l'élève de troisième qui considère sans peine le rapport de deux nombres du cadre mathématique rencontre d'importantes difficultés pour interpréter le rapport de deux quantités physiques de grandeurs différentes. Il ne faudrait pas en déduire naïvement que cela n'est dû qu'à un manque de pratique et que l'expérience scolaire lui permettra de manipuler les volts par ampère avec autant d'aisance que les kilomètres par heure ou que des nombres sans dimensions. À cela, plusieurs raisons liées à la structure des théories physiques et identifiées par les théories de l'analyse dimensionnelle, mais dont la complexité peut être mise en évidence par les questions suivantes :

- les théories physiques permettent-elles de faire le rapport de n'importe quelles grandeurs physiques ?
- le rapport de deux grandeurs physiques a-t-il toujours un sens et conduit-il à une grandeur mesurable ?

– pourquoi la rationalité de la physique permet-elle de faire des rapports de quantités physiques de grandeurs différentes et pas des sommes par exemple ?

D'autres questions viennent aussi à l'esprit si l'on rapproche les cadres de rationalité du sens commun et de la physique. Par exemple :

– la rationalité du sens commun, qui permet aussi de faire des rapports de grandeurs différentes comme le prix par kilogramme de pommes de terre, le rendement à l'hectare ou le PNB par habitant, satisfait-elle les règles dimensionnelles de la rationalité de la physique ?

– est-ce que cela a un sens de parler du rapport du poids d'un individu à sa taille ? Pourquoi ? Etc.

Toutes ces questions ne sont pas simples, et il faut donc admettre que la proportionnalité des mathématiques par sa nature a-dimensionnelle évacue un grand nombre de difficultés que la physique doit gérer. Le transport du concept de proportionnalité dans le cadre de la physique impose donc un travail réflexif sur quelques règles dimensionnelles caractéristiques de la rationalité des sciences physiques. Ainsi, la parcellisation de la notion de proportionnalité du cadre des mathématiques d'une part, et sa non transportabilité dimensionnelle du cadre des mathématiques à celui de la physique d'autre part, constituent deux obstacles majeurs à la construction du concept de résistance dans sa globalité :

– en tant que rapport constant de valeurs particulières de la tension et de l'intensité ;

– en tant que coefficient de proportionnalité entre les grandeurs U et I conçues comme variables continues, et, *a fortiori*, comme nous le verrons dans la troisième séance de cette séquence d'ingénierie didactique (Malafosse et al., à paraître), en tant que pente de la caractéristique du dipôle.

5.3. Nature des règles de validation des cadres de rationalité de la physique et des mathématiques

La démarche traditionnellement mise en œuvre au collège comme au lycée pour établir la loi d'Ohm consiste à induire, à partir d'un nombre limité de couples de valeurs, la relation analytique entre les fonctions U ^{résistor} et I . L'apprenti physicien est donc invité par le maître à interpoler et à extrapoler pour passer d'un ensemble discret à un continuum. Cette même démarche est absolument proscrite du cours de mathématiques où la logique déductive prévaut. On passe de la relation fonctionnelle à la détermination d'éléments respectant la relation. Par exemple, le passage du registre de

l'écriture formelle au registre numérique conduit à déterminer des couples de nombres proportionnels à partir d'une relation fonctionnelle de type linéaire. Il est bien sûr possible de vérifier si des couples satisfont à la relation fonctionnelle mais cette dernière est connue *a priori*. De même, lors du passage du registre de l'écriture formelle au registre graphique, on détermine l'appartenance d'un point du plan à une droite en vérifiant que les coordonnées du point respectent la relation fonctionnelle de linéarité, mais on ne construit pas une droite à partir de plus de deux points !

L'enseignant de physique semble donc se permettre des « fantaisies » que s'interdit l'enseignant de mathématiques. En réalité, les règles de validation de ces deux cadres de rationalité diffèrent mais ne peuvent être jugées hors de leur domaine de rationalité. La démarche déductiviste est liée au caractère axiomatique des mathématiques, alors que la démarche inductiviste est liée au caractère expérimental de la physique. Pour contrôler la marge de liberté laissée par la démarche inductiviste, les sciences expérimentales se dotent d'éléments de rationalité, de règles de validation, qui leur sont propres et qui permettent de valider ou d'invalider des modèles et des théories. Elles construisent des théories adaptatives et donc évolutives.

Le problème didactique que posent nos travaux est relatif à l'influence de la différence de ces règles de validation (d'un cadre de rationalité à l'autre) sur la pertinence du transport de certains concepts fortement liés à ces éléments de rationalité, comme c'est le cas pour le concept de proportionnalité/linéarité des mathématiques, ce qui revient à poser la question suivante : est-il raisonnable de transporter le concept de proportionnalité/linéarité des mathématiques, concept fondé sur des règles de validation de type déductiviste, dans le cadre de rationalité de la physique à propos d'une activité expérimentale de type inductiviste ? Nos travaux ne nous permettent pas, pour l'instant, d'y répondre, mais des éléments de réponse existent, notamment dans l'analyse du comportement des élèves dans l'activité de tracé d'une droite expérimentale et de détermination de son coefficient directeur à partir d'un ensemble de points non exactement alignés, ou dans l'activité de détermination expérimentale d'un coefficient de proportionnalité à partir d'un ensemble de couples de valeurs expérimentales non exactement proportionnelles.

Pour notre part, nous avons mis provisoirement ce problème de côté en postulant que le fait de choisir comme valeurs expérimentales des nombres respectant exactement la règle de proportionnalité n'induisait pas chez les élèves de phénomènes parasites dus aux différences de nature des règles de validation. Ainsi, nous avons supposé que la prédominance chez les élèves du cadre de rationalité des mathématiques les poussait à

se placer spontanément dans la situation de tenter de vérifier, à partir d'un ensemble de couples de nombres, leur appartenance à un ensemble continu, connu *a priori*, et décrit par la loi d'Ohm. La suite de nos recherches devrait nous permettre d'étudier en détail les conséquences liées à la spécificité des règles de validation des cadres de rationalité des mathématiques et des sciences physiques.

6. CONCLUSIONS

Notre modèle fondé sur les notions d'espace de réalité, de cadre de rationalité et de registre sémiotique semble être une aide précieuse pour analyser la parcellisation de certains concepts à l'intérieur d'un cadre de rationalité donné, comme par exemple le concept de proportionnalité/linéarité. Il permet aussi de relativiser l'intérêt de certaines séquences d'apprentissage de concepts de la physique basées sur des changements de cadres mathématiques/physique dont les rationalités diffèrent très fortement. Notre recherche ne s'est intéressée qu'à la stabilité d'un concept, celui de proportionnalité/linéarité au cours d'un changement de cadre, et à l'influence de la dimensionnalité des quantités appréhendées dans le cadre de la physique. L'étude de l'influence d'autres éléments de rationalité qui diffèrent fortement entre les mathématiques et la physique reste à faire, en particulier à propos de la nature des règles de validation.

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 281-308.
- BARUK S. (1985). Quel est l'âge du capitaine ? *Bulletin de l'Association des Professeurs de Mathématiques de l'Enseignement Public*, n° 323.
- CLAVEL-MARINACCE J. (1997). *Rôle et place de l'appareil de mesure dans l'apprentissage*. Thèse de Doctorat, Université Lyon II.
- CHEVALLARD Y. (1992). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- D'ESPAGNAT B. (1956). *Conceptions de la physique contemporaine*. Paris, Hermann.
- DOUADY R. (1984). *Jeux de cadres et dialectique outil-objet*. Thèse d'État, Université Paris VII.
- DUVAL R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, n° 5, pp. 37-65.
- GIL-PEREZ D. (1985). Science learning as a conceptual and methodological change. *European Journal of Sciences Education*, n° 7, pp. 231-236.
- GIORDANA. & DE VECCHI G. (1987). *Les origines du savoir. Des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Neuchâtel, Paris, Delachaux & Niestlé.
- JOHSUA S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, n° 8, pp. 29-53.

- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris, PUF.
- LEROUGE A. (1992). *Représentation cartésienne, rationalité mathématique et rationalité du quotidien chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (2000). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. *Didaskalia*, n° 16, pp. 81-106.
- MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (à paraître). Changement de registres sémiotiques en didactique de la physique : exemple de la loi d'Ohm au collège. *Actes des 2èmes rencontres de l'ARDIST*.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris, PUF.
- VIENNOT L. (1992). Raisonner à plusieurs variables : tendances de la pensée commune. *Aster*, n° 14, pp. 127-141.
- VYGOTSKI L.S. (1934). *Thought and language*. Cambridge (Massachusset), MIT Press.

ANNEXE (extrait de mini-débat)

- L'enseignant (Alain) : *on vient donc de remarquer que les nombres de la quatrième colonne du tableau sont obtenus en divisant ceux de la deuxième par 100. À quoi cela vous fait penser ?*
- Naouel : *Aux maths !*
- Alain : *Aux maths ? Et à quoi aux maths ?*
- Nadia : *Aux conversions ...*
- Naouel : *Quand on change des kilomètres en hectomètres ou en mètres.*
- Alain : *Aux conversions. Et ici, est-ce qu'on peut penser à des conversions ?*
- Naouel : *Non parce que là, c'est des volts. On aurait pu croire que c'est des millivolts, mais ici, il faut passer des volts aux ampères.*
- Alain : *Donc ça ressemble à des conversions mais ce ne sont pas des conversions parce qu'on a des volts et des ampères. Cela pourrait être des conversions ...*
- Naouel : *... si on avait des ampères et des milliampères ...*
- Alain : *... ou des volts et des millivolts. Donc ce n'est pas des conversions.*
- Naouel : *J'ai trouvé. C'est de la proportionnalité.*
- Alain : *Alors, c'est quoi la proportionnalité ?*

- Mounir : *C'est quand on a des chiffres dans un tableau et que pour passer d'un chiffre à l'autre, on multiplie toujours par le même chiffre. Soit on divise, soit on multiplie, mais c'est toujours par le même chiffre.*
 - Alain : *Et là, on multiplie ou on divise par quoi ?*
 - Mounir : *Par 10 ;*
 - Hajera : *Non ! Par 100. On divise par 100.*
 - Alain : *On divise par 100.*
 - Hajera : *Ça, c'est pour passer du résistor à l'ampère et pour faire le contraire, on multiplie par 100.*
 - Alain : *Donc ça veut dire que l'intensité dans le circuit (les ampères, c'est l'intensité) et la tension aux bornes du résistor ...*
 - Nadia : *... sont proportionnelles.*
 - ...
 - Alain : *Quelqu'un a dit qu'avec un tableau, on peut chercher de la proportionnalité. Pour vous, qu'est-ce ça veut dire « proportionnalité » ?*
 - Anta : *Si les valeurs sont régulières.*
 - Alain : *Explique-nous un peu.*
 - Coralie : *S'il y a un coefficient commun.*
 - Alain : *Alors, as-tu trouvé un coefficient commun ?*
 - Coralie : *Je n'ai pas pu vérifier.*
 - Alain : *Comment faire pour chercher un coefficient commun ?*
- Long silence
- Alain : *Que faites-vous habituellement pour voir de la proportionnalité ?*
 - Coralie : *Des produits en croix ...*
 - Alain : *... entre quoi et quoi ?*
 - Cédric : *On peut prendre n'importe quelle valeur.*
 - Alain : *Par exemple ?*
- Long silence
- Alain : *Bon. En regardant simplement le tableau, est-ce que vous voyez de la proportionnalité ?*

- Coralie : *Oui ! Pour le résistor, il y a déjà de la proportionnalité.*
- Alain : *Avec quoi ?*
- Coralie : *Avec ses valeurs. On a 5, 10, 15, 20 ...*
- Benoît : *... avec l'intensité. La tension du résistor est proportionnelle à l'intensité.*
- Alain : *Vous êtes d'accord ?*

Long silence

- Alain : *Comment vois-tu que la tension du résistor est proportionnelle à l'intensité ?*
- Benoît : *Parce que c'est toujours le même coefficient.*
- Alain : *Explique.*
- Benoît : *Parce qu'on peut passer des valeurs de la colonne du résistor à celles de l'intensité en divisant toujours par le même coefficient.*
- Alain : *Par exemple...*

Explications et exemples numériques proposés à partir du tableau de mesures

Consensus

- Alain : *Mais dans toutes vos explications, je n'ai pas entendu « produit en croix ». Alors comment feriez-vous avec les produits en croix ?*

Long silence puis débat avec arguments confus

- ...
- Alain : *Est-ce que le poids et la taille sont des grandeurs proportionnelles ?*
- Coralie : *Non !*
- Alain : *Et pourquoi ?*
- Coralie : *D'abord parce qu'ils n'ont pas les mêmes unités*
- Cédric : *Mais si, ça peut. ...Tu pourras les multiplier.*
- Alain : *Les multiplier ?*

Long silence puis débat avec arguments confus

- ...

– Alain : *Je prends un autre exemple. J'achète des tomates à 5 F le kilogramme. J'achète 1 kg ou 2 kg ou 3 kg et je paye. Est ce que le poids de tomates est proportionnel au prix que je paye à la caisse ?*

– Tous : *Oui !*

– Cédric : *C'est normal. Si on double le poids de tomates, on double le prix.*

Consensus

– Alain : *Essayez de trouver chacun un exemple de deux grandeurs qui soient proportionnelles.*

Long silence

– Cédric : *Les litres et les kilos ...*

– Alain : *...de quoi ?*

– Cédric : *d'eau.*

– Alain : *D'autres exemples ?*

Long silence

– Alain : *Vous avez entendu parler, en maths, de l'application linéaire ? Ça vous dit quelque chose ?*

– Tous : *Oui.*

– Alain : *Alors, est-ce que l'application linéaire, ça a quelque chose à voir avec la proportionnalité ?*

– Coralie : *Oui.*

– Cédric : *Moi je ne trouve pas.*

– Coralie : *Mais si. D'abord le lien, c'est que tu as deux données.*

– Cédric : *Et alors ?*

Long silence

– Alain : *Bon, c'est quoi une application linéaire ?*

Long silence

– Alain : *Si je vous dis $y = a \cdot x$, ça vous fait penser à quoi ?*

– Benoît : *C'est les fonctions.*

Long silence

- Alain : *Dans $y = a \cdot x$, (par exemple $y = 2 \cdot x$) quoi est proportionnel à quoi ?*
- Cédric : *Les x sont proportionnels.*
- Alain : *À quoi ?*

Long silence

Cet article a été reçu le 21/10/98 et accepté le 01/06/99.

Caractérisation des phases de conclusion dans l'enseignement scientifique

Characterization of conclusion phases in science teaching

Ludovic MORGE

Équipe « processus d'action des enseignants »
IUFM d'Auvergne
36-38 avenue Jean Jaurès
63400 Chamalières, France.

Résumé

Pour favoriser la construction individuelle des connaissances par l'élève, l'enseignant peut intervenir sur le choix des tâches et la gestion de la séance. Cet article se centre sur ce deuxième aspect, plus précisément sur les phases de conclusion lors desquelles l'enjeu est de contrôler les productions d'élèves générées par la tâche. L'analyse d'extraits d'une séquence d'enseignement a permis de mettre en évidence différentes modalités de contrôle des productions d'élèves. Cette étude de cas contribue à l'objectivation des interactions maître - élèves en situation d'enseignement scientifique.

Mots clés : *enseignement des sciences physiques, interactions, phase de conclusion, validation, formation des maîtres.*

Abstract

To assist the individual implementation of knowledge by the pupil, the teacher should step in the choice of the tasks and the organization of the session. This article focuses on this second aspect, and more precisely on the conclusion phases whose aim is to check what type of production results from the given task. The analysis of some extracts of a teaching sequence allowed us to bring to the fore different means of controlling the pupil's productions. This case study contributes to the objectivation of the interactions between teacher and pupils in the science teaching context.

Key words : physical science teaching, interactions, conclusion means, validation, teacher's training.

Resumen

Para favorecer la construcción individual de los conocimientos por el alumno, el docente puede intervenir sobre la selección de actividades y la gestión de la sesión. Este artículo se centra sobre este segundo aspecto, específicamente sobre las fases de conclusión a partir de las cuales lo que se persigue es controlar las producciones de alumnos generadas por la actividad. El análisis de extratos de una secuencia de enseñanza permitió poner en evidencia diferentes modalidades de control de producciones de alumnos. Este estudio de casos contribuye a la objetivación de las interacciones maestro/alumno en situación de enseñanza científica.

Palabras claves : enseñanza de ciencias físicas, interacciones, fase de conclusión, validación, formación de docentes.

1. INTRODUCTION

Dans un premier temps, notre recherche axée sur les phases de conclusion va être située parmi les différentes recherches menées actuellement en didactique des sciences dans le champ des interactions maître-élèves. À la suite de ce premier cadrage, nous définirons la phase de conclusion et les notions de validité et de vérité pour dégager ensuite les grandes caractéristiques d'une interaction du type « guidage dans la construction de savoirs ».

1.1. Les interactions maître-élèves en didactique des sciences physiques

Les recherches sur les interactions maître-élèves dans le domaine de la didactique des sciences physiques sont très récentes. Elles s'appuient sur l'hypothèse majeure selon laquelle la qualité des interactions entre le maître et ses élèves conditionne, autant que les tâches proposées, l'apprentissage. Elles trouvent leur origine d'une part, dans le champ du socio-constructivisme (Vygotski, 1985 ; Doise et al., 1978 ; Bruner, 1983 ; Perret-Clermont, 1986) et d'autre part dans des recherches explorant de nouvelles situations d'enseignement scientifique propices à la construction de savoirs par les élèves (Martinand et al., 1992 ; Lemeignan & Weil-Barais, 1993 ; Dumas-Carré & Goffard, 1997). Ces recherches en didactique, centrées sur la relation entre les situations d'enseignement et l'apprentissage des élèves, ont vu émerger de nouvelles questions concernant le rôle du maître dans ces situations : quels sont les processus interactionnels dans lesquels les partenaires sont engagés ? Quels sont les rôles du maître ? Quels sont les enjeux des interactions ? Quels sont les outils adéquats pour décrire les interactions d'un point de vue didactique ? Sur quels savoirs s'appuie l'enseignant pour prendre ses décisions ? Comment se construit le savoir dans l'interaction verbale ?

Dans la plupart des travaux visant l'objectivation des interactions, les auteurs se centrent sur des moments précis renvoyant à des enjeux spécifiques de l'interaction : définir l'espace-problème (Orange, 1999) ; enrôler dans la tâche par la routine de la question ambiguë (Franceschelli & Weil-Barais, 1998) ; faire expliciter des réponses d'élèves par la routine de la fausse incompréhension (Franceschelli & Weil-Barais, 1998) ; partager la signification de codages symboliques (Larcher & Chomat, 1998) ; statuer sur les réponses des élèves pour conclure (Morge, 1997a) ; modéliser en se servant de la routine événement-objet-action (Franceschelli & Weil-Barais, 1998). Deux types de descripteurs peuvent être utilisés pour objectiver les interactions : les descripteurs de type « tutelle » qui rendent compte du rôle du maître, et les descripteurs de type « médiation » qui rendent compte du processus interactionnel dans lequel les partenaires de l'interaction sont engagés. L'objectivation des interactions verbales en situation d'enseignement scientifique constitue un premier axe pour ce champ de recherche.

La formation à la conduite des interactions en classe constitue un deuxième axe de recherche important pour la diffusion des apports de la didactique des sciences. En effet, nous supposons que si les enseignants ne disposent pas de moyens pour gérer des séquences d'enseignement où l'élève peut prendre une part active dans la construction collective du

savoir, ils risquent d'abandonner ce type de séances initiées par la recherche. La perspective d'une diversification des pratiques enseignantes éclairée par la recherche en didactique risque ainsi d'être compromise. De nouvelles questions se posent alors : comment les enseignants interagissent-ils « naturellement » avec les élèves ? Pourquoi utilisent-ils ce(s) mode(s) d'interaction ? Quelles difficultés rencontrent-ils pour interagir avec les élèves ? Comment aider les enseignants à dépasser ces difficultés pour aller vers une interaction visant la construction de savoirs ? Quels outils d'analyse permettraient aux enseignants de prendre conscience des choix qu'ils font ? Quelles articulations pratique-théorie permettraient aux enseignants d'avoir une attitude réflexive sur ces choix ?

Cet article ne reprendra pas les amorces de réponses avancées notamment par Boilevin (1997) et Morge (1997b, 1998, 2000) au sujet de la formation aux interactions, mais s'appuiera principalement sur des résultats concernant la description d'un mode d'interaction du type « guidage dans la construction de savoirs » (Morge, 1997a) pour approcher la diversité de ses modalités de mise en oeuvre.

Dans la plupart des recherches menées sur les interactions en classe de sciences et précédemment citées, les interactions analysées résultent de transcriptions de séquences d'enseignement gérées par des chercheurs en didactique des sciences. Pour notre part, les séances ont été menées par des enseignants de sciences physiques en lycée et collège. Les phases de conclusion constituent, pour ces enseignants, une phase délicate de l'interaction. Saint-Georges avait déjà repéré cette difficulté en constatant « *différentes manifestations d'évitement devant la gêne que leur occasionnent les connaissances imprévues de leurs élèves, et ceci d'autant plus qu'ils ne peuvent, sur-le-champ, en déterminer la pertinence* » (Saint-Georges, 1996, p. 210). L'enjeu de ce moment d'interaction est de statuer sur les différentes propositions d'élèves fournies en réponse à la tâche qui leur est proposée. Ce moment est nécessaire pour « faire avancer le cours » et ne pas rester sur une collection de réponses. Il est inhérent à un enseignement basé sur la participation active des élèves à la co-construction de savoirs. La nécessaire présence de phases de conclusion dans un enseignement basé sur la co-construction et les difficultés de gestion qu'elles suscitent chez les enseignants expliquent l'intérêt que nous portons à ce moment spécifique de l'interaction.

1.2. Définitions

Avant de proposer notre propre définition de la phase de conclusion, regardons celle donnée par Margolinas dans le domaine des

mathématiques. L'auteur définit la phase de conclusion de la façon suivante : « *Au cours de toutes les situations dans lesquelles l'élève doit fournir un travail personnel existe ce que nous avons appelé une phase de conclusion au cours de laquelle l'élève accède à une information sur la validité de son travail. Cette information doit être pertinente du point de vue du savoir mis en jeu. La phase de conclusion est sous le contrôle du maître, et peut s'analyser selon le rôle qu'y joue le maître.* » (Margolinas, 1993, p. 29). L'auteur dégage ensuite deux possibilités qui s'offrent au maître dans les phases de conclusion : une phase d'évaluation ou une phase de validation. « *Nous dirons que la phase de conclusion est une phase d'évaluation quand, dans cette phase, la validité du travail de l'élève est évaluée par le maître sous la forme d'un jugement sans appel.* » (Margolinas, 1993, p. 30). « *Nous dirons que la phase de conclusion est une phase de validation si l'élève y décide lui-même de la validité de son travail.* » (Margolinas, 1993, p. 31). En comparant ces deux dernières définitions, on peut s'apercevoir que le principal critère de différenciation est la personne, maître ou élève, qui conclut.

Dans le cadre de notre propre recherche, le critère principal de distinction des phases de conclusion porte sur la différence entre validité et vérité, autrement dit sur le mode de contrôle des réponses d'élèves plus que sur la personne qui effectue ce contrôle. Une réponse d'élève est considérée comme valide si la cohérence interne du raisonnement est reconnue, et si l'élève ne se contredit pas sur des connaissances préalablement partagées par lui-même et les autres élèves. Une réponse d'élève est considérée comme vraie si elle est identique à un savoir externe au sujet. Ainsi, dans le cas où un élève part de sa représentation pour élaborer une prévision, cette prévision pourra être valide si elle est cohérente avec sa représentation, bien que fausse au regard des faits. D'une autre façon, une réponse est reconnue comme vraie ou fausse si elle est comparée à un savoir non encore négocié par la classe, par exemple, lorsque l'enseignant se réfère à ses propres connaissances pour statuer sur les réponses d'élèves (figure 1). Ainsi, pour nous, la phase de conclusion, ne correspond pas nécessairement à un moment où l'élève reçoit une information sur la validité de son travail mais, plus généralement, à un moment où l'enjeu de l'interaction est de contrôler les productions d'élèves. Si l'élève reçoit une information sur la validité ou la pertinence de son travail, la phase de conclusion est alors appelée phase de négociation. Dans ce cas, la phase de négociation prend la forme particulière d'une phase de recherche en commun et de co-construction.

1.3. Interagir dans une perspective de construction de savoirs

Le dépassement des limites d'une interaction basée sur l'attente de la bonne réponse - au cours de laquelle le maître décrète la véracité ou la fausseté des réponses d'élèves - ainsi que le dépassement des problèmes pratiques rencontrés par les enseignants - qui doivent gérer sur-le-champ des réponses parfois imprévues - ont permis de cadrer la recherche de ce mode d'interaction. Ce dernier doit permettre aux élèves de participer à la phase de conclusion en ayant la possibilité de négocier les savoirs mis en jeu. Il doit également être fonctionnel et accessible pour que l'enseignant puisse l'adopter et prendre des décisions en temps réel. Les caractéristiques de ce mode d'interaction, explicitées ci-dessous, sont tirées d'une précédente recherche (Morge, 1997a).

Dans les phases de conclusion, les arguments utilisés sont des arguments de pertinence au regard de la question posée (cf. 1, figure 1) et de validité au regard des connaissances préalablement négociées et partagées par les élèves de la classe (cf. 2, figure 1). Les connaissances partagées par les élèves deviennent donc ici des connaissances de référence qui servent de cadre de référence pour fixer consensuellement la validité de ce qui se dit. Ces connaissances de référence peuvent être d'ordre théorique ou empirique. Pour déterminer la validité de la réponse de l'élève, l'enseignant doit connaître le raisonnement tenu par l'élève et l'incite donc à argumenter. À l'issue de la tâche, certaines réponses d'élèves validées peuvent permettre de compléter le modèle utilisé dans les connaissances de référence. Ce complément pourra, à son tour, servir à valider ou invalider d'autres réponses lors de tâches futures. Notons que l'activité des élèves, qui consiste à développer un modèle sans le remettre en cause, est comparable à celle des scientifiques dans le cadre de la science normale (Kuhn, 1983).

Ce mode d'interaction est transférable à une situation d'enseignement au cours de laquelle certains élèves partagent une même conception. Dans l'interaction, l'enseignant va considérer cette conception comme étant une connaissance de référence, c'est-à-dire que l'enseignant et les élèves peuvent se référer à cette même conception pour juger de la validité des réponses des élèves (cf. 2, figure 1). La conception constitue la base de l'argumentation commune à l'enseignant et aux élèves. Dans l'interaction, l'enseignant ne valide pas la conception utilisée par les élèves, mais il peut être amené à valider les réponses et raisonnements, relativement à la conception utilisée. Si, par exemple, une réponse d'élève est valide au regard de la conception utilisée mais contradictoire avec les phénomènes observés, la conception est remise en cause. Une fois les limites de cette

conception reconnues, la conception peut être remplacée par une autre plus pertinente. Cette dernière est à son tour introduite dans les connaissances de référence. Lors de tâches futures, les partenaires de l'interaction se réfèrent à cette nouvelle conception pour statuer sur les réponses d'élèves. Il se produit dans ce cas un changement du cadre théorique de référence en partie comparable à un changement de paradigme (Kuhn, 1983).

Précisons que la notion de connaissances de référence utilisée précédemment se distingue de celle de savoirs de référence ou savoirs savants et de celle de prérequis ou connaissances préalables. Les savoirs de référence sont des savoirs scientifiques reconnus par la communauté scientifique, alors que les connaissances de référence sont des connaissances scolaires reconnues par les élèves de la classe. Les contenus et les contextes sont différents. Les connaissances de référence désignent, comme les connaissances préalables, les connaissances nécessaires à l'élève pour rentrer dans la tâche et la résoudre. Mais elles délimitent également le cadre dans lequel l'enseignant peut intervenir pour valider ou invalider, dans l'interaction, les réponses d'élèves. En d'autres termes, les connaissances de référence délimitent l'espace de négociation offert à l'enseignant. La notion de connaissance de référence ajoute une autre fonction à celle généralement attribuée aux connaissances préalables.

L'élaboration de ces nouveaux descripteurs permet une première analyse des interactions enseignant-élèves. Cette analyse s'appuie sur un découpage structurel et emboîté de la transcription en volet, épisodes et phases. Le volet correspond à l'ensemble des interventions relevant d'une même tâche et il comprend un ou plusieurs épisodes. L'épisode correspond à l'ensemble des interventions relatives à une même réponse et comprend plusieurs phases : la phase d'exposition lors de laquelle l'élève présente sa réponse ; la phase de justification où l'élève explicite le raisonnement qui lui a permis d'aboutir à sa réponse ; la phase de conclusion au cours de laquelle les élèves ou l'enseignant statuent sur la réponse de l'élève. L'analyse consiste ensuite à déterminer le type d'argument utilisé dans la phase de conclusion : argument d'autorité (cf. 3, figure 1) ; argument de validité par rapport aux connaissances de référence (cf. 2, figure 1) ; argument de pertinence par rapport à la tâche (cf. 1, figure 1).

Nous allons, dans la suite de cet article, dépasser cette analyse aboutissant à une catégorisation générale des grands types d'arguments pour nous diriger vers une caractérisation plus fine des différentes modalités mises en oeuvre pour valider ou invalider des réponses d'élèves.

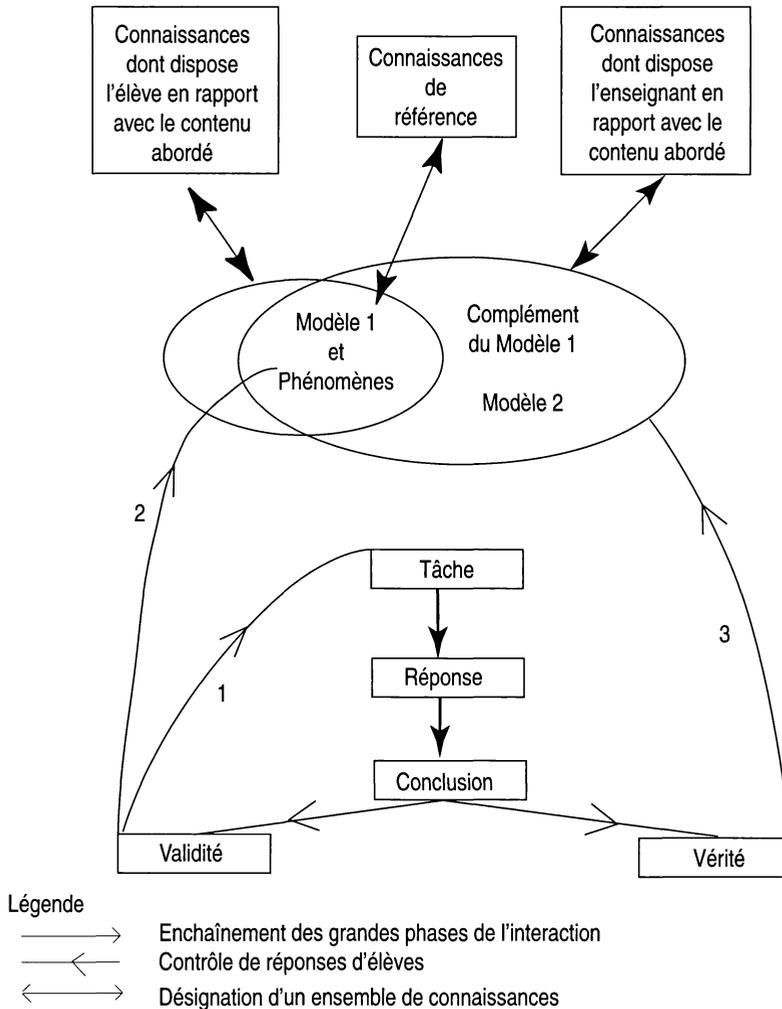


Figure 1 : Le contrôle des réponses d'élèves

2. CARACTÉRISATION DE DIFFÉRENTES MODALITÉS DE NÉGOCIATION

Des extraits d'une séance gérée par une enseignante ayant suivi une formation sur les interactions (Morge, 1997a) constituent la base empirique utilisée pour rechercher les différentes modalités de négociation. Ces extraits sont analysés pour en extraire les réponses d'élèves et les arguments utilisés par l'enseignante ou les élèves dans l'espace de

négociation. Les arguments repérés sont ensuite décontextualisés pour faire émerger la nature de l'argumentation. Enfin, nous envisagerons des alternatives au déroulement observé dans le but de repérer le champ des possibles. Nous systématiserons notre présentation de l'analyse en quatre rubriques : 1) réponse de l'élève ; 2) argument avancé par l'enseignante ou un élève pour statuer sur cette réponse ; 3) nature de l'argument ; 4) alternative.

Dans les extraits, les interventions de l'enseignante et des élèves sont placées dans des colonnes distinctes. Si la provenance d'une intervention est attribuée à un élève déjà repéré par un numéro, n , cette intervention sera précédée de ce même numéro. Si tel n'est pas le cas, le numéro, $n+1$, est attribué à l'intervention. Enfin, pour faciliter le repérage des interventions, chacune d'elles est numérotée.

2.1. Le contexte des interactions maître-élèves

La séquence porte sur l'électricité statique et se déroule avec vingt-quatre élèves de quatrième.

Les connaissances de référence au début de la séance

Le germe de modèle

Dans ce modèle, il existe une électricité négative et une électricité positive. Il est arbitrairement décidé que l'ébonite est chargée - alors que le plexiglas est chargé +. Deux corps qui portent des charges de même signe se repoussent. Deux corps qui portent des charges de signe contraire s'attirent. Un corps, s'il n'a pas été chargé, est électriquement neutre. Il est possible de charger des corps par frottement. Une charge positive est symbolisée par un + et une charge négative est symbolisée par un -.

Les phénomènes

Une boule d'aluminium est attirée par une baguette d'ébonite. Parfois cette boule est éjectée alors que d'autres fois, elle reste collée.

La tâche élaborée par l'enseignante

À l'aide du modèle, expliquer pourquoi la boule est attirée par la baguette d'ébonite et expliquer pourquoi, des fois elle reste collée, alors que d'autres fois elle est éjectée.

Les objectifs

En faisant fonctionner le « germe de modèle » les élèves vont se l'approprier. Pour expliquer les phénomènes observés, les élèves sont amenés à compléter le « germe de modèle » en introduisant l'électrisation

à distance par répartition asymétrique des charges dans le corps neutre et l'électrisation par contact avec transfert de charges.

2.2. Analyse des interactions en phase de négociation

2.2.1. Extrait 124 à 138 : la boule est chargée positivement

	Enseignante	Élèves
124		8) Heu, quand elle a, heu, quand la boule elle est, heu, attirée c'est qu'il y a autant de charges négatives d'un côté et autant de charges positives de l'autre.
125	Où ça ?	
126		8) Ben sur la boule et sur la barre.
127	Attention, on l'a électrisée l'ébonite. On l'a frottée donc elle est pas neutre.	
128		8) Et ben ouais, mais là, il y a autant de charges positives que de charges négatives.
129	Où ça ?	
130		8) Ben, sur la barre.
131	Sur la balle, sur la barre. Non, attention elle est électrisée. Donc, alors, elle est pas neutre.	
132		8) Bon alors sur la boule.
133	Bon, qu'est-ce tu fais là, Guillaume ?	
134	Et pourquoi elle est attirée dans un premier temps ?	
135		8) Parce que la barre d'ébonite elle est électrisée. Et deux corps qui sont électrisés, ils s'attirent.
136	Attention, c'est pas deux corps électrisés qui s'attirent. Et la boule, elle est électrisée ou pas ?	
137		8) Non.
138	Vous êtes bien parties les filles, il faut creuser un petit peu plus.	

Réponse de l'élève

La boule est chargée positivement et la barre est chargée négativement, donc la barre attire la boule (124, 126, 135).

Argument de l'enseignante pour statuer sur cette réponse

Par l'intermédiaire d'une question (136) l'enseignante rappelle que la boule n'est pas électrisée au départ de l'expérience (136, 137).

Nature de l'argument

L'enseignante renvoie implicitement l'élève au modèle préalablement construit (un corps, s'il n'a pas été chargé par frottement, est électriquement neutre) pour statuer sur cette réponse, avançant ainsi un argument de non-validité.

Alternative

L'enseignante aurait pu s'appuyer sur cette réponse (si la barre attire la boule, c'est que l'une est positive, l'autre négative) pour reformuler le problème : comment expliquer que la boule se comporte comme si elle était chargée positivement, alors qu'elle est neutre ? Ainsi la phase de négociation pourrait déboucher sur une reformulation de la tâche.

2.2.2. Extrait 257 à 277 : l'importance du premier contact

	Enseignante	Élèves
257		25) Quand elle est neutre la boule, là, elle est négative. Elle est négative, ça donne de l'électricité à la boule, et après quand on remet de la peau de chat, négative et négative ça fait /
258	Attention, attention, la boule elle est toujours neutre au départ.	
259		25) Oui, mais vu que dans la première expérience elle est négative, alors ça a donné le négatif à la boule.
260	Non, non, non, c'est pas une première ou une deuxième expérience je pourrais recommencer tout de suite et vous allez voir.	
261		27) Tenez, Madame.
262	Attends, j'arrive.	
263	Regardez, je commence tout de suite.	
264	Vous avez vu, elle a été attirée puis éjectée. Voilà, après on l'arrête. Là, elle a été attirée puis éjectée et puis il y a des fois elle reste collée.	
265	Là, elle est encore attirée puis éjectée.	
266	Vous voyez, là, elle est attirée et elle reste collée.	
267		25) Parce que vous frottez doucement.
268		25) Elle s'est chargée dans le négatif.
269	Ah non, à chaque fois elle est neutre au départ.	
270		28) Oui, mais à force de l'attirer, elle s'est chargée dans le négatif pareille que l'ébonite.

271	Alors, je veux bien qu'elle soit chargée dans le négatif.	
272	Oh! A vos places là- bas.	
273	Je veux bien mais elle a été attirée et elle est restée collée.	
274		29) Parce qu'elles ont autant de charges.
275	Attention des signes de charges contraires de même signe se repoussent. Normalement, elle aurait dû être repoussée.	
276		25) Ben oui, mais elles ont les mêmes charges après.
277	Ben, si elles ont les mêmes charges, elles auraient dû être repoussées et non pas rester collées.	

Réponse de l'élève

Lors de la première expérience, la boule s'est chargée négativement après un contact avec la baguette ce qui explique que lors de la deuxième expérience la boule est repoussée par l'ébonite chargée négativement (257 et 259).

Arguments de l'enseignante pour statuer sur cette réponse

- 1) L'enseignante rappelle qu'au départ la boule est neutre (258).
- 2) Par l'expérience, l'enseignante montre que la boule peut être repoussée sans avoir été préalablement en contact avec la baguette lors d'une première expérience (264).
- 3) Elle montre aussi par l'expérience que la boule peut rester collée à la baguette même si elle a préalablement touché celle-ci dans une expérience précédente (266).
- 4) Devant le doute des élèves, elle finit par le raisonnement suivant : si, au départ de l'expérience, la boule était négative, elle n'aurait pas pu être attirée par la baguette d'ébonite elle aussi négative (275-277).

Nature des arguments

- 1) L'enseignante renvoie l'élève au modèle comme elle l'a fait précédemment en (136).
- 2) et 3) L'enseignante propose ensuite aux élèves deux contre-expériences pour montrer que l'hypothèse selon laquelle la boule s'est chargée négativement au cours d'un premier contact est erronée. Cette hypothèse implique que la boule a eu un contact préalable avec la baguette d'ébonite pour être repoussée. En montrant expérimentalement l'inverse, elle infirme du même coup l'hypothèse d'une boule chargée négativement au début de l'expérience d'éjection.

4) Elle a ensuite repris l'hypothèse de l'élève pour confronter ses implications au phénomène observé montrant ainsi la contradiction à laquelle aboutit le raisonnement de l'élève. Pour prouver à l'élève que la proposition « la boule n'est pas chargée négativement au départ de l'expérience » est correcte, elle montre que la proposition inverse « la boule est chargée négativement au départ de l'expérience » va à l'encontre du phénomène observé. Il s'agit là d'un raisonnement par l'absurde.

Alternative

Peut-être aurait-il été plus judicieux de présenter aux élèves chacune des expériences sur deux dispositifs distincts. En effet, la présentation des deux phénomènes sur le même dispositif peut laisser penser que les conditions initiales sont différentes. Notons que le fait de toucher la boule avec la main avant chaque expérience pour la décharger n'a pas été discuté avec les élèves.

2.2.3. Extrait 332 à 371 : la boule est relâchée

	Enseignante	Élèves
332		9) Ça dépend comment on frotte.
333	Ça dépend comment on frotte. Alors explique un petit peu plus.	
334		9) (Inaudible) ...si on frotte, vite, plus il va mieux, comment, il va mieux attirer la feuille.
335	La boule.	
336		9) Que si on attire moins, il va juste l'attirer et la relâcher.
337	Alors, si on frotte beaucoup ça va la coller et si on frotte pas beaucoup ?	
338		9) Ça va à peine la coller et ça va la relâcher.
339	Ça va à peine la coller et la relâcher.	
340	Alors, qu'est-ce que vous pensez de ces deux explications ?	
341		1) C'est la mienne la plus juste.
342	Alors, pourquoi, qu'est-ce que vous pensez de celle de Peter ?	
343		10) Et ben je pense qu'il a raison, parce que quand on frotte plus il y a plus de...
344		11) De charges positives
345		10) Voilà, qui restent sur le bâton
346	Sur l'ébonite.	
347		10) Sur l'ébonite, et quand on frotte moins et ben, il y en a moins qui reste sur l'ébonite. Alors ça se fait que la boule elle est moins attirée. Elle est attirée et elle se relâche tout de suite.

348	D'accord. Elle est attirée et elle se relâche tout de suite.	
349		12) Et pourquoi elle est repoussée alors ?
350		13) Ben parce que (inaudible)
351	Tu penses que Peter a raison alors.	
352		10) Ouais.
353	Est-ce qu'il y a quelqu'un d'autre qui a autre chose à dire sur l'explication de Peter ?	
354		14) Pas moi, parce que j'ai pas compris.
355	Alors, déjà, est-ce que vous ne trouvez pas qu'il y a une différence entre l'explication de Peter et l'explication de Louis ?	

L'enseignante va répondre à la question qu'elle vient de poser puisque les élèves n'y parviennent pas.

369	Louis essaye de reprendre le modèle qu'on a commencé à expliquer.
370	Peter montre juste ce qu'on peut voir en fait. Alors que Louis explique vraiment.
371	Ce serait plutôt dans ce sens là qu'il faudrait travailler d'accord.

Réponse d'élèves

Si la baguette est frottée rapidement, la boule est fortement attirée et reste collée. Si la baguette est moins frottée, la boule est moins attirée puis relâchée (334, 336, 338, 343, 344, 345, 347).

Arguments utilisés pour statuer sur cette réponse

1) Un élève avance un début d'argumentation pour refuser cette réponse. Il semble avoir repéré que, lors de l'expérience, la boule est repoussée et non pas relâchée (349).

2) L'enseignante attend des élèves qu'ils élaborent une explication en se référant au modèle (369, 371). Or cette réponse relie un phénomène supposé observé (la boule est relâchée) à un autre phénomène (on frotte peu).

Nature des arguments

1) La description du phénomène donnée par l'élève – la boule est relâchée – ne correspond pas à la réalité de celui-ci, ce qui aurait pu constituer un argument pour refuser cette réponse. Mais ce début d'argumentation initié par un élève ne sera ni repris ni développé.

2) L'enseignante refuse cette réponse car elle ne répond pas à la tâche proposée. L'enseignante a déjà rappelé aux élèves qu'ils doivent

utiliser le modèle et s'appuyer sur des schémas. Cette proposition est refusée par l'enseignante car elle ne répond pas à la tâche proposée.

Alternatives

Une autre phase de conclusion peut consister à vérifier expérimentalement sans modifier le protocole – il ne s'agit donc pas d'une contre-expérience – qu'un frottement important engendre une répulsion de la boule après contact, contrairement à ce que pensent quelques élèves. La conclusion s'effectue alors en vérifiant expérimentalement que le lien de variation concomitante suggéré par l'élève (si je frotte beaucoup, la boule reste collée à l'ébonite alors que si je frotte peu, la boule est relâchée) est l'inverse de celui constaté expérimentalement. L'influence du facteur « qualité de frottement » ayant été repérée expérimentalement, elle peut être aussi expliquée sur le plan du modèle. La proposition du modèle, selon laquelle un corps peut être électrisé par frottement, peut être affinée en reliant la qualité du frottement avec la quantité de charges présente sur la baguette d'ébonite.

L'explication du phénomène de relâchement de la boule constitue une nouvelle tâche dans laquelle les élèves peuvent s'engager selon la décision de l'enseignante. Le modèle sera ainsi complété en faisant intervenir la déperdition des charges sur la baguette d'ébonite.

2.2.4. Extrait 441 à 455 : le passage des charges dans l'air

	Enseignante	Élèves
441	Oui, il y a un peu de positif sur le bâton.	
442		11) Et ben alors, quand on approche la boule, quand on approche le bâton à la boule, la boule, elle devient tout de suite positive, avec le moins, elle arrive à se coller.
443	Alors comment est-ce qu'elle va être, comment est-ce qu'elle va être ?	
444		7) Positive.
445	Positive, ouais.	
446		11) Et bien c'est parce que comme y'a autant. Parce que si le bâton est positif et qu'on frotte avec la peau, il y a autant de positif que de négatif.
447	Non, si je frotte avec la peau, ça devient négatif, donc il y a plus de négatif, il y a un peu de positif.	
448		11) Alors le positif, il va sur la boule et ça attire la boule.
449	Comment est-ce qu'il va y aller sur la boule ?	

450		7) Avec l'air.
451	Ça va se déplacer dans l'air ?	
452		7) Non, je veux dire avec... La boule va attirer le positif.
453	Comment ?	
454		11) Ben, le neutre attire le positif.
455	Non, c'est le moins qui attire le positif, attention.	

Réponse de l'élève

Les quelques charges positives de la baguette passent à distance sur la boule qui va se charger positivement (442 et 450). Cette dernière est ensuite attirée par la baguette chargée négativement.

Arguments de l'enseignante pour statuer sur cette réponse

1) L'enseignante, par l'intermédiaire d'une question (451), remet en cause l'idée que les charges puissent passer dans l'air.

2) Elle demande à l'élève d'expliquer comment les charges positives sont attirées par la boule (453) et s'appuie sur le « germe de modèle » (455) pour refuser la proposition selon laquelle le neutre attire le positif (454).

Nature des arguments

1) Elle s'appuie sur le « germe de modèle » établi pour l'instant afin de refuser cette proposition. Plus précisément, l'argument consiste à dire que la proposition « les charges passent dans l'air » ne fait pas partie des propositions du « germe de modèle ». Notons que si le germe de modèle ne prend pas en compte le passage des charges dans l'air, il est prévu que cette proposition soit introduite ultérieurement dans le modèle. En s'appuyant sur le « germe de modèle » pour refuser cette réponse, l'enseignante vient donc de refuser ce qu'elle va introduire plus tard. Le deuxième argument avancé par l'enseignante évite cet écueil.

2) L'enseignante demande à l'élève d'expliquer ce qui attire les charges positives sur la boule. Cette question permet de reposer le problème initial de l'attraction entre un corps neutre et des charges, problème qui n'est toujours pas résolu par la réponse de l'élève. Cette phase de conclusion consiste à repérer une étape de l'interprétation du phénomène qui n'est pas expliquée à l'aide du modèle. Dans ce cas particulier, la faille dans l'interprétation du phénomène correspond au problème initial.

Alternative

Une phase de négociation, proche de la seconde avancée par l'enseignante, consisterait à demander pourquoi les charges négatives ne

se déplaceraient pas à distance sur la boule neutre. Cette phase de conclusion consiste à faire émerger le caractère aléatoire d'un choix effectué lors de l'interprétation.

Nous remarquerons que les connaissances mises en jeu dans ces différentes argumentations sont partagées par les élèves. C'est, selon nous, une condition nécessaire à la co-construction de savoirs. Cette condition délimite l'espace de négociation offert à l'enseignant et aux élèves. Dans cet espace, l'analyse de ces quelques extraits a permis d'entrevoir la diversité des modalités de contrôle des productions d'élèves.

3. CONCLUSION

Donner aux enseignants les moyens de gérer les interactions verbales dans des situations d'enseignement lors desquelles l'élève participe à la co-construction des savoirs constitue un enjeu important pour une diversification des pratiques enseignantes éclairées par la recherche en didactique. Pour l'apprentissage des élèves, ces phases de conclusion sont des moments cruciaux pendant lesquels ils vont pouvoir ressentir un déséquilibre interne à condition qu'ils puissent s'approprier et faire fonctionner à leur tour les arguments qui leurs sont avancés. Le but de cette analyse est de contribuer à la caractérisation des phases de négociation en repérant les modalités de contrôle des productions d'élèves.

3.1. Les modalités de contrôle des productions d'élèves

L'objet de cet article se situe dans le prolongement d'une précédente recherche (Morge, 1997a) qui avait permis de déterminer les caractéristiques générales d'une phase de négociation. Pendant cette phase, l'enseignant et/ou les élèves recherchent la validité des réponses et raisonnements proposés. Les connaissances de référence délimitent l'espace de négociation dans lequel les partenaires de l'interaction sont engagés.

Dans cet article, nous avons poussé plus loin nos investigations en recherchant comment sont validées ou invalidées les réponses d'élèves pendant les phases de négociation. L'analyse de plusieurs extraits, tirés de la transcription d'une séquence d'enseignement, a permis de dégager différentes modalités de contrôle des productions d'élèves. Ces modalités sont reprises ci-dessous sous une forme synthétique.

Les modalités de contrôle des productions d'élèves repérées sont les suivantes :

– le renvoi au modèle préalablement construit

Exemple : analyse de l'extrait 124 à 138

Réponse : un élève suppose que la boule est chargée positivement ce qui explique qu'elle soit attirée par l'ébonite chargée négativement

Argument : la boule est neutre car elle n'a pas été frottée ;

– la réalisation d'une contre-expérience

Exemple : analyse de l'extrait 257 à 277

Réponse : l'élève pense que la boule s'est chargée négativement lors du contact avec l'ébonite pendant la première expérience, ce qui explique que la boule négative est repoussée par la baguette lors de la deuxième expérience

Argument : il est possible de vérifier expérimentalement que la boule peut être éjectée sans avoir eu de contact préalable avec la baguette d'ébonite ;

– le raisonnement par l'absurde

Exemple : analyse de l'extrait 257 à 277

Réponse : identique à celle qui est précédemment citée

Argument : si, au départ de l'expérience, la boule était négative, elle n'aurait pas pu être attirée par la baguette d'ébonite négative.

Donc, la boule n'est pas négative au début de l'expérience ;

– le repérage d'une inadéquation entre la réponse de l'élève et la question posée

Exemple : analyse de l'extrait 332 à 371

Réponse : si la baguette est frottée rapidement, la boule est fortement attirée et reste collée, alors que si la baguette est moins frottée, la boule est un peu attirée puis relâchée

Argument : cette réponse ne correspond pas à la tâche proposée qui consiste à expliquer le phénomène à l'aide du germe de modèle ;

– la réalisation d'une expérience

Exemple : analyse de l'extrait 332 à 371

Réponse : identique à celle précédemment citée

Argument : l'expérience montre que la variation concomitante suggérée par l'élève est l'inverse de celle qu'il est donné de voir ;

– l'identification d'une étape de l'interprétation inexpliquée avec le modèle

Exemple : analyse de l'extrait 441 à 455

Réponse : un élève explique que les quelques charges positives de la baguette passent à distance sur la boule qui va se charger positivement. Cette dernière est ensuite attirée par la baguette chargée négativement

Argument : comment expliquer que les charges positives soient attirées par la boule neutre ? ;

– l'identification du caractère aléatoire d'un choix effectué lors de l'interprétation

Exemple : analyse de l'extrait 441 à 455

Réponse : identique à celle présentée dans l'exemple précédent

Argument : expliquer pourquoi ce sont les charges positives et non pas les charges négatives qui se déplacent vers la boule neutre.

La phase de conclusion peut donner lieu à une relance :

– par une reformulation de la tâche

Exemple : analyse de l'extrait 124 à 138

Comment expliquer que la boule se comporte comme si elle était chargée positivement, alors qu'elle est neutre ? ;

– par la formulation de nouvelles tâches

Exemple : analyse de l'extrait 332 à 371

Expliquer comment la qualité du frottement intervient sur la quantité de charge présente sur la baguette d'ébonite.

Le renvoi au « germe de modèle en construction » peut, dans certaines circonstances, générer des contradictions à venir.

Exemple : analyse de l'extrait 441 à 455

L'enseignante remet en cause l'idée que les charges puissent passer dans l'air puisque cette proposition ne fait pas partie du « germe de modèle ». Mais, dans quelques séances, l'enseignante sera amenée à introduire cette même idée.

3.2. Perspectives de recherche

Dans le cadre de l'étude des phases de conclusion, nous envisageons trois perspectives de recherche : étudier les phases de conclusion pour elles-mêmes, c'est-à-dire continuer à mieux les connaître ; repérer les liens qu'entretiennent les phases de conclusion avec d'autres moments de la séance ; cerner la reproductibilité des réponses d'élèves face à une tâche donnée pour pouvoir anticiper en partie le déroulement d'une séance.

3.2.1. *Objectiver les modalités de conclusion et les critères de choix entre ces différentes modalités*

L'analyse que nous venons de mener a permis de dégager différentes modalités de contrôle de productions des élèves. Or, il s'agit d'une étude de cas et nous pensons que d'autres modalités peuvent encore être dégagées en élargissant le champ empirique d'investigation c'est-à-

dire en diversifiant non seulement le type de tâches mais également les enseignants en charge de mener ces séances et les niveaux d'enseignement.

La diversité des modalités de contrôle de productions d'élèves pose maintenant la question de la pertinence du choix entre ces différentes modalités. Il semble que les critères de choix soient à chercher non seulement dans les caractéristiques de la situation (tâche, connaissances de référence, objectifs), mais aussi par exemple dans les caractéristiques de la réponse de l'élève voire même dans celles de l'élève.

3.2.2. Explorer d'autres fonctions à l'analyse des interactions en phase de conclusion

Les phases de conclusion peuvent être analysées pour poser la question de leur adéquation à la réponse de l'élève et au projet de l'enseignant. Mais d'autres fonctions peuvent être attribuées à ce type d'analyse. En effet, l'analyse des phases de conclusion peut permettre d'interroger la pertinence de la tâche dans la perspective d'en faciliter la gestion sans perdre de vue les objectifs qui lui sont assignés. À titre d'exemple, nous avons suggéré de présenter les deux expériences avec deux boules distinctes, pour ne pas laisser croire aux élèves que la boule s'est chargée négativement lors de la première expérience.

L'analyse des interactions en phase de conclusion peut aussi permettre d'interroger le déroulement d'autres moments de la séance d'enseignement : la dévolution du problème, la description du phénomène ou le rappel des connaissances de référence.

3.2.3. Rechercher une reproductibilité des réponses d'élèves

Dans les phases de conclusion, l'enjeu de l'interaction est de contrôler les réponses d'élèves. Pour aider l'enseignant dans cette phase délicate liée à l'aspect imprévisible des réponses d'élèves, deux possibilités se présentent. Soit l'enseignant dispose de plusieurs modalités de conclusion et il choisit, dans l'action, la plus adaptée, soit l'enseignant connaît à l'avance certaines réponses et arguments d'élèves. Cette deuxième piste repose sur l'hypothèse selon laquelle certaines réponses et justifications d'élèves sont reproductibles et limitées en nombre afin de permettre leur anticipation pour une tâche et un niveau d'élève donnés. Cette supposition questionne le postulat selon lequel « *la notion d'inconnu, de surprise, d'inattendu [est] au coeur de tout projet éducatif et de toute transmission de savoir.* » (Yerles, 1992, p. 80). Une adhésion trop rapide à ce dernier point de vue, limiterait nécessairement la préparation des séquences à

l'élaboration de situations propices à l'apprentissage et exclurait une prise en charge précise de ce qui pourrait se passer dans la classe. Il n'est pas possible de réduire totalement l'imprévu, ce qui serait une bien triste perspective, mais nous ne voulons pas non plus, sous couvert de ce postulat, abandonner tout espoir de restreindre la part d'imprévu autrement qu'en limitant la participation des élèves. La reproductibilité de certaines réponses d'élèves reste à établir.

3.3. Perspectives d'innovations dans la formation

Le développement des axes de recherches précédemment cités permettrait d'entrevoir des perspectives d'innovation dans la formation des maîtres à travers des activités de simulation et d'anticipation.

Les activités de simulation consisteraient, pour les enseignants, à analyser des réponses d'élèves, à envisager différentes modalités de conclusion pour interroger leur adéquation. La maîtrise de critères d'analyse des réponses d'élèves et de critères de choix entre les modalités de conclusion constituerait un atout supplémentaire dont l'enseignant disposerait pour gérer des séances.

Les activités d'anticipation consisteraient, pour les enseignants, à envisager la gestion de certaines réponses d'élèves connues à l'avance pour une tâche donnée en vue de préparer la gestion en temps réel de cette même tâche. Cette anticipation pourrait être un moyen d'accroître artificiellement l'expérience professionnelle de l'enseignant sur une séance donnée.

Ces simulations et anticipations furent mises en oeuvre (Morge, 1997a), mais restèrent très limitées du fait qu'elle reposaient uniquement sur des réponses imaginées pendant la préparation. Cette perspective de formation ne relève pas de l'ingénierie didactique dans la mesure où l'enseignant n'applique pas des recettes élaborées par une personne extérieure. Au lieu de prendre des décisions dans l'urgence, l'enseignant peut anticiper certaines d'entre elles en dehors du temps d'enseignement, les analyser, tout en restant maître des décisions qu'il prendra « *in vitro* » et « *in vivo* ».

BIBLIOGRAPHIE

- BOILEVIN J.-M. (1997). Accompagnement à l'analyse des pratiques enseignantes centrées sur l'idée de médiation dans l'enseignement scientifique. In J. Gréa (Éd.), *Actes du Sixième Séminaire National de Recherche en Didactique de la Physique, de la Chimie et de la Technologie*. Lyon, LIRDHIST, pp.141-151.

- BRUNER J.-S. (1983). *Le développement de l'enfant. Savoir faire, savoir dire*. Paris, PUF.
- DOISE M., DESCHAMPS J.-C. & MUGNY G. (1978). *Psychologie sociale expérimentale*. Paris, A. Colin.
- DUMAS-CARRÉ A. & GOFFARD M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*. Paris, A. Colin.
- FRANCESCHELLI S. & WEIL-BARAIS A. (1998). La routine conversationnelle comme stratégie de changement conceptuel : apprendre à modéliser en mécanique. In A. Dumas-Carré & A. Weil-Barais (Dir.), *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Berne, Peter Lang, pp. 163-184.
- KUHN T.-S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.
- LARCHER C. & CHOMAT A. (1998). Médiation dans des situations d'entretiens avec des élèves de collège à propos de la modélisation des propriétés thermoélastiques des gaz. In A. Dumas-Carré & A. Weil-Barais (Dir.), *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Berne, Peter Lang, pp. 135-162.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en Physique*. Paris, Hachette.
- MARTINAND J.-L., ASTOLFI J.-P., CHOMAT A., DROUIN A.-M., GENZLING J.-C., LARCHER C., LEMEIGNAN G., MÉHEUT M., RUMELHARD G. & WEIL-BARAIS A. (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- MARGOLINAS C. (1993). *De l'importance du vrai et du faux dans la classe de mathématiques*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- MORGE L. (1997a). *Essai de formation professionnelle des professeurs de sciences physiques portant sur les interactions en classe. Étude de cas en formation initiale*. Thèse, Université Paris 7.
- MORGE L. (1997b). Former professionnellement des enseignants de Sciences Physiques à interagir avec les élèves en classe. In J. Gréa (Éd.), *Actes du Sixième Séminaire National de Recherche en Didactique de la Physique, de la Chimie et de la Technologie*. Lyon, LIRDHIST, pp. 229-242.
- MORGE L. (1998). Prendre en compte les difficultés des enseignants à interagir avec les élèves : impact sur les choix d'une formation en Sciences Physiques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Éds), *Les Sciences, les techniques et leurs publics. Actes des XXes journées internationales sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et industrielles*. Paris, UF de Didactique/Université Paris 7, pp. 361-366.
- MORGE L. (2000). Former les enseignants à interagir avec les élèves en classe de sciences. *Recherche et Formation*, n° 34, pp. 101-112.
- ORANGE C. (1999). Débats scientifiques dans la classe et espaces-problèmes. In C. Fabre-Cols & E. Triquet (Éds), *Actes du deuxième colloque international « Recherche(s) et formation des enseignants » : De la recherche aux modèles et outils opératoires en formation : Quels liens ? Quelles interactions ?* Grenoble, IUFM de l'académie de Grenoble, (C.D. Rom).
- PERRET-CLERMONT A.-N. (1986). *La construction sociale de l'intelligence*. Berne, Peter Lang.
- SAINT-GEORGES M. (1996). *Formation des professeurs de sciences physiques par la didactique*. Thèse, Université Paris 7.
- VYGOTSKI L.-S. (1985). *Pensée et Langage*. Paris, Messidor / Éditions sociales.
- YERLES P. (1992). Pour une tactique didactique. *Spirale*, n° 8, pp. 77-86.

Cet article a été reçu le 5/10/99 et accepté le 29/08/2000.

Chimie et biologie : figures de rencontre

To cross chemistry and biology

Maryline COQUIDÉ-CANTOR

IUFM et Université de Rouen
2 rue du Tronquet, BP 18, 76131 Mont-Saint-Aignan, France.
GDSTC-LIREST, ENS de Cachan
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France.

Béatrice DESBEAUX-SALVIAT

Lycée Louis le Grand, 75015 Paris, France.
INRP, 29 rue d'Ulm, 75005 Paris, France.
GHDSO-LIREST, Université Paris XI, France.

Résumé

Comment aborder la biochimie dans l'enseignement de la biologie au lycée ? Cet article propose une mise en perspective pour faire émerger de nouvelles pistes de recherche en didactique des sciences. Après une approche historique et épistémologique concernant la chimie du vivant, nous analysons des pratiques de classe dans ce domaine et nous cernons plusieurs questions. Nous avançons ensuite quelques propositions pour aller vers une « transposition didactique » raisonnée.

Mots clés : *biochimie, histoire, épistémologie, transposition didactique, pratiques expérimentales.*

Abstract

How biochemistry can be initiated in the biological secondary school education ? After an historical and an epistemological approach, we analyse practices in science education and we envisage a controled « didactic transposition ».

Key words : *biochemistry, history, epistemology, didactic transposition, laboratory work.*

Resumen

Cómo abordar la bioquímica en la enseñanza de la biología en el liceo ? Este artículo propone una perspectiva para hacer emerger nuevas pistas de investigación en didáctica de las ciencias. Después propone una aproximación histórica y epistemológica relativa a la química del viviente, se analizan prácticas de clase en ese dominio y se formulan varias interrogantes. Seguidamente, algunas proposiciones son planteadas para avanzar hacia una « transposición didáctica » razonada.

Palabras claves : *bioquímica, historia, epistemológica, transposición didáctica, prácticas experimentales.*

Le problème des relations entre la biologie et la chimie dans l'enseignement est complexe, mais généralement ignoré ou sous-estimé. Ce problème prend toute sa signification dans les lycées, où la plupart des contenus enseignés en « sciences de la vie » s'appuient sur des concepts issus de la biochimie, discipline née de la rencontre entre biologie et chimie. Si l'on se réfère au cadre théorique bâti par Chevallard (1985), on constate qu'il n'existe pas, en ce domaine spécifique de la biochimie, de processus didactique menant du savoir savant au savoir à enseigner. Les nouveaux développements de la science entrant très vite dans les programmes, leur enseignement se traduit par un empilement de connaissances à la fois nombreuses et récentes. La transposition didactique consiste, le plus souvent, à simplifier le savoir savant, ce qui ne facilite ni sa compréhension, ni son appropriation par les élèves. Juxtapositions de connaissances empilées sans relation avec de réels problèmes scientifiques, ces savoirs scolaires ne fonctionnent pas comme des savoirs opérants (Orange, 1997). De plus, cette entrée rapide des résultats de la recherche dans l'enseignement secondaire, sans recul épistémologique, s'accompagne d'une perte de leur signification biologique, le travail de l'enseignant conduisant parfois à « *dissoudre le contenu du concept* » (Rumelhard, 1987).

Nous ne souhaitons pas, dans ce texte, aborder les questions d'interdisciplinarité, ni étudier le problème de l'utilisation de la chimie

considérée comme discipline de service (Martinand, 1992) dans un apprentissage biologique. Ces thèmes nécessiteraient un autre développement. Notre réflexion a pour ambition d'aider à « rebiologiser » les contenus de l'enseignement des « sciences de la vie » au lycée et de contribuer à caractériser en quoi un enseignement peut être scientifique. Elle aborde les questions de matrices disciplinaires (Develay, 1995) et de structuration des disciplines, en utilisant l'exemple emblématique de la chimie biologique.

Nous nous limiterons à la biochimie avec trois questions essentielles : quelles peuvent être les différences entre une approche chimique et une approche biologique de la chimie du vivant ? Quel sens donner au savoir biochimique quand on a oublié son origine et sa destination ? Comment aider les lycéens (et d'abord, en amont, leurs professeurs) à affiner leur perception des problèmes biologiques dans l'enseignement de la biochimie en « sciences de la vie » ?

Notre réflexion s'est développée selon trois axes :

– le premier conduit à *préciser les processus de structuration de la biochimie sur un plan historique* ;

– le deuxième vise à *clarifier sur le plan épistémologique la signification d'une approche biochimique du vivant* ;

– le troisième a pour but de *caractériser des pratiques de classe relatives à l'étude de la chimie du vivant*, pour faire émerger des particularités, identifier des obstacles, et suggérer des situations pédagogiques adaptées.

1. DE LA CHIMIE DU VIVANT À LA BIOCHIMIE

La chimie et la biologie sont deux sciences étroitement et définitivement liées, même si elles diffèrent profondément par leurs objectifs. La biologie recherche les conditions et les causes des grandes manifestations de la vie dans la cellule, dans l'individu et dans les groupes vivants. La chimie est « *la science des transformations et des créations matérielles* » ; par elle, se fonde la « *cité culturelle* » (Bachelard, 1932) du matérialisme dont le champ est à jamais ouvert et illimité. L'approche chimique des processus biologiques, avec toute sa force matérialiste, représente un vaste programme de recherche pour lequel la biochimie offre un cadre conceptuel qu'intègrent la plupart des recherches récentes en biologie moléculaire, immunologie, neurophysiologie, etc.

On enseigne les résultats de la biochimie sans s'interroger sur leurs origines historiques, ni sur les questions, ni sur les démarches, ni sur le

statut même de cette discipline. Au cours de la formation des enseignants, ces problèmes ne sont que rarement abordés, alors qu'ils contribuent à structurer l'image de ce qu'est une science (Cantor-Coquidé, 1997 ; Desbeaux-Salviat, 1997b).

Dans le recueil d'articles, *La matérialité des sciences* (Clarke & Fujimura, 1996), les auteurs soulignent l'importance, pour les recherches en biologie, de l'articulation entre les outils, les tâches et leur adéquation au cours du temps. Lors de la structuration d'une nouvelle discipline, trois séries d'événements (au moins) interagissent.

1) L'une des disciplines utilise les outils conceptuels d'autres disciplines afin de résoudre ses propres problèmes originaux. Cela constitue les *déplacements de problématique*.

2) Plusieurs étapes de création, d'adaptation de nouveaux outils, de nouvelles techniques, de nouveaux modèles, de nouvelles théories sont nécessaires. Ces nouveautés sont un des *moteurs* de la discipline naissante.

3) La discipline doit s'affranchir des *obstacles* opposés à la marche de ses idées.

Par la suite, la standardisation des techniques apparaît comme un facteur fondamental pour stabiliser une nouvelle discipline. Enfin, même si nous ne développons pas cette dimension dans ce texte, la nouvelle discipline n'acquiert la reconnaissance des praticiens et la reconnaissance institutionnelle qu'à la suite d'un effort de diffusion et de développement d'une action disciplinaire spécifique.

La biochimie est apparue comme discipline autonome à la charnière des XIX^e et XX^e siècles. L'élaboration d'un questionnement spécifique et d'une méthodologie originale, caractéristiques de cette nouvelle discipline, a nécessité près d'un siècle.

1.1. Les déplacements de problématique

Le mot biochimie est récent, puisqu'il date du début du XX^e siècle (précisément de 1903, selon A.L. Lehninger, 1973). « *De fait, l'association de la chimie et de la biologie, dans le sens plein et riche que Liebig dans son enthousiasme décrivait naguère comme tellement désirable, n'eut jamais lieu en quelque pays que ce soit dans les limites du XIX^e siècle* » (Hopkins, 1913, p. 652), commentait Hopkins, premier titulaire de la chaire de biochimie créée à l'Université de Cambridge, dans une conférence de la British Association for the Advancement of Science, « *aujourd'hui sur le continent européen et plus encore en Amérique, la biochimie (avec ce nouveau nom*

pas très heureux) a vu soudainement son règne arriver » (Hopkins, 1913, p. 652).

Tout comme nous nous devons de souligner la mauvaise construction de ce mot désormais convenu et inévitable. En effet, contrairement à ce que son étymologie laisse entendre (bio : vie, associé à chimie), il n'y a pas de chimie spéciale qui aurait des lois ou des concepts spécifiques. Un objectif fondamental de la biochimie est de décrire, de comprendre, de rendre compte des implications physiologiques et pharmacologiques des réactions chimiques du vivant et de ses multiples régulations. Cet objet a évolué au cours du temps.

L'analyse historique des problématiques nous a amenées à distinguer trois paradigmes successifs pour la biochimie : un paradigme structural, un paradigme dynamique, un paradigme évolutif.

1.1.1. Paradigme structural

Les chimistes organiciens se sont tout d'abord efforcés d'identifier l'énorme variété des composés provenant du vivant et d'en faire l'analyse. La généralisation de l'importation des instruments et des techniques chimiques, dans les études physiologiques et pour analyser les phénomènes biologiques, remonte à Liebig (1803-1873), fondateur d'une *chimie biologique*.

Si les chimistes parvenaient à analyser et identifier de nombreuses espèces chimiques des organismes, ils ne savaient pas les synthétiser. Quelques synthèses de composés organiques avaient, certes, réussi (Wöhler pour l'urée, Kolbe pour les acides salicylique et acétique), mais il s'agissait là de réactions exceptionnelles et non d'une méthode générale. La fabrication de molécules aussi complexes et aussi spécifiques semblait dépendre d'une force vitale, impossible à contrôler au laboratoire. Au milieu du XIX^e siècle, la chimie organique, en associant les concepts et les méthodes provenant de la physique a pu dépasser ces obstacles. Une chimie physique, constituée à partir de la thermodynamique, permettait de calculer l'énergie utilisable des composés et les vitesses des réactions, d'étudier les équilibres. Peu à peu, ces règles s'appliquent à la chimie organique et contribuent à lever l'obstacle de la force vitale.

La question des synthèses organiques se posait, par ailleurs, en d'autres termes. Ainsi, pour Berthelot, il était nécessaire de mettre au point une méthode qui permette de parcourir une série de composés organiques. La production d'hydrocarbures simples (acétylène ou éthylène) était rendue possible, par l'union directe de carbone à l'hydrogène, sous l'influence d'un arc électrique. Par une suite de substitutions, on parvint ensuite à fabriquer

plusieurs carbures d'hydrogène, établissant ainsi un lien définitif entre chimie minérale et chimie organique.

Enfin, avec l'impossibilité de produire au laboratoire la dissymétrie moléculaire rencontrée dans les composés naturels, en particulier les produits de la fermentation, la chimie organique se heurtait à des problèmes concernant la forme et l'espace. Pour certains (Liebig, Berzélius), la fermentation était la propriété de certaines substances organiques. Pour Pasteur, elle était le signe de la présence spécifique d'un microorganisme. Ce ne fut pas sans mal, avec des réticences qui provenaient aussi bien des naturalistes que des chimistes, que Pasteur a spécifié une chimie du vivant (Cantor, 1994). Ses travaux sur la dissymétrie moléculaire et son importance physiologique contribuèrent à spécifier cette chimie biologique. « *Je dois avouer que mes recherches sont dominées depuis longtemps par cette pensée que la constitution des corps, en tant qu'on l'envisage du point de vue de sa dissymétrie moléculaire, toutes choses égales d'ailleurs joue un rôle considérable dans les lois les plus intimes de l'organisation des êtres vivants et intervient dans leurs propriétés physiologiques les plus cachées* » (Pasteur, 1857, cité par Jacques, 1995, p. 98).

1.1.2. Paradigme dynamique

Il ne s'agit plus d'analyser chimiquement la matière des êtres vivants mais d'expliquer des fonctions proprement biologiques par articulation de processus chimiques. Dans toute interrogation de « physiologiste » est intégré un questionnement sur la chimie du vivant pour une fonction biologique déterminée (déjà présent dans les travaux de Lavoisier sur la respiration), au niveau de l'organisme (par exemple dans les travaux de Claude Bernard), au niveau des tissus (dans les études de Paul Bert par exemple), ou au niveau des cellules.

Avec l'avènement de la théorie cellulaire, le questionnement relatif à la chimie du vivant s'est orienté sur les processus de synthèse et de transformation des constituants des êtres vivants, autrement dit sur leur métabolisme. De statique, la chimie du vivant devint *dynamique*. Elle s'occupe d'approcher les connaissances des structures ultramicroscopiques des cellules, en rapport avec leur rôle dans le déroulement et la régulation du métabolisme. Hopkins dénonçait, en 1913, la négligence de certains chimistes envers les substances présentes en petites quantités dans les systèmes vivants et déplorait qu'ils ne s'intéressent qu'aux produits d'accumulation. Or, si l'on envisage le vivant d'un point de vue dynamique, on comprend que ces substances peu abondantes puissent jouer un rôle essentiel comme intermédiaires du métabolisme (Desbeaux-Salviat, 1997a). Ainsi, dans les années 1910, Hopkins en particulierisant la chimie biologique fonde les grandes orientations de la recherche en biochimie. Dans sa

conférence, il attire l'attention des jeunes chercheurs en ces termes : « *Je voudrais signaler aux jeunes chimistes qui forment le projet de s'occuper de problèmes biologiques, la nécessité de consacrer un ou deux ans à une deuxième discipline. Celui qui va simplement vers un institut de biologie avec une formation qui le prépare à déterminer la constitution de produits nouveaux provenant de l'animal et à étudier leurs réactions in vitro, sera certes utile, et pourra être reçu ; mais il ne deviendra pas un biochimiste. Ce que nous voulons, c'est savoir comment la réaction se passe dans l'organisme* » (Hopkins, 1913, p. 667).

Les premières décennies du XX^e siècle sont marquées par un développement remarquable des études relatives au métabolisme intermédiaire (Holmes, 1996). Dans le cas de la formulation du cycle de l'acide citrique, toutes les réactions chimiques impliquées ont été décrites par des chimistes, mais seule la *problématique biologique* développée en 1937 par Krebs a permis de réunir les données éparses pour leur conférer une signification (Desbeaux-Salviat, 1997a).

Rencontres et divergences aboutissent à la structuration de nouvelles disciplines. Ainsi ont pu naître différentes perspectives de recherche à partir de la chimie et de la biologie : la *chimie organique*, qui s'intéresse à l'analyse et à la synthèse chimique des matériaux du vivant ; la *chimie biologique* puis la *biochimie* qui développe une problématique plus spécifiquement biologique et dynamique sur ces matériaux ; la *microbiologie*, qui a bénéficié de procédures chimiques pour fonder une discipline consacrée à la connaissance des microorganismes.

1.1.3. Paradigme évolutif

Les déplacements de problématiques scientifiques vont de pair avec le développement des outils et des tâches. Ils sont en perpétuelle évolution. Le débat biochimique actuel rejoint de nouveau le problème des origines de la vie ; il s'exprime autour de l'idée que « la vie vient d'ailleurs ». Par exemple, sous la rubrique « biochimie », la revue *Sciences et Avenir* de novembre 1997 publie un article intitulé « Les origines extraterrestres de la vie » (Muzerelle, 1997). Avec les explorations spatiales, dans les années 1970, l'étude des possibilités de vie ailleurs que sur Terre et de leurs conséquences est entrée officiellement dans le domaine scientifique. C'est vers cette même époque que le biologiste Joshua Lederberg, Prix Nobel de médecine et de physiologie en 1958, trouvant l'expression « biologie extraterrestre » trop difficile à prononcer, proposa le mot « exobiologie » (relaté par Cooper, 1980), pour désigner la recherche et l'étude de la vie en dehors de notre planète. La signification de ce terme a dérivé progressivement, pour désigner l'appellation du domaine scientifique regroupant les études liées aux problèmes de la vie extraterrestre, aux

processus qui pourraient y conduire, et plus généralement à l'étude de la vie et de ses origines dans l'univers.

On retrouve, dans l'exemple de l'exobiologie, née de l'exploration spatiale, un cas de développement rapide des idées, faisant passer le problème de la vie dans l'Univers du domaine de la métaphysique à celui des sciences académiques. La biochimie n'est plus utilisée seulement pour comprendre la physiologie et le métabolisme des organismes actuels (étude des causes proximales) mais servirait à comprendre les mécanismes de l'évolution (étude des causes ultimes). La biochimie a acquis une autonomie, une identité suffisamment marquée pour qu'elle intervienne désormais dans la structuration de nouvelles sciences.

1.2. Un moteur : l'évolution des techniques

La composante technique et ses évolutions sont souvent négligées dans la présentation d'une matrice disciplinaire. Parmi les instruments et les procédés fondamentaux impliqués dans l'évolution de la biochimie soulignons, en particulier, ceux qui sont en relation avec des problèmes de mesure et de séparation des constituants, l'importance des techniques de microdosage, les colorations, la maîtrise des tampons, l'utilisation des isotopes radioactifs, etc.

L'alternance de validations, expérimentales dans la confrontation au réel et sociales dans la confrontation aux pairs, peut être à l'origine de modifications des théories et des modèles ; elle sollicite également une évolution des procédures techniques. Prenons le cas de la controverse sur la génération spontanée : quand Pasteur rend publics ses résultats, ses contradicteurs pointent des insuffisances théoriques qui le conduisent à relativiser sa théorie (notamment à propos de la répartition des germes), à effectuer des tests de réfutation des pratiques expérimentales de ceux qui le contredisent et à perfectionner les gestes techniques qui contribueront à fonder la microbiologie (Cantor, 1994).

L'évolution de l'instrumentation et des procédures intervient fortement dans l'investigation scientifique... mais pas systématiquement de façon positive. Par exemple, la littérature pédagogique laisse souvent penser que les étapes du métabolisme intermédiaire ont été identifiées grâce à l'utilisation d'isotopes radioactifs. Dans le cas des modélisations successives du cycle de Krebs, l'utilisation de ces isotopes a en fait conduit, dans un premier temps, à des interprétations erronées, qui ne faisaient jouer à l'acide citrique qu'un rôle annexe et qui ont momentanément entraîné un recul de la connaissance scientifique (Desbeaux-Salviat, 1997b). Les modèles se modifient, évoluent dans le temps : intégration ou non de l'acide citrique

dans le cycle qui perd alors son nom de « cycle de l'acide citrique » pour prendre celui de « cycle des acides tricarboxyliques » ; précisions des étapes intermédiaires (réactions unidirectionnelles ou pas, désignation de nouveaux intermédiaires réactionnels plus ou moins hypothétiques), etc. Toutes ces précisions sont importantes, elles aident à comprendre le métabolisme intermédiaire et pas seulement l'aspect énergétique du fonctionnement de la cellule.

1.3. Des obstacles productifs : vitalité et réduction

« Il est remarquable », soulignait Bachelard, « que, d'une manière générale, les obstacles à la culture scientifique se présentent toujours par paires » (Bachelard, 1969, p. 20). Pour inventer des procédés d'analyse et d'investigation du vivant, il est nécessaire de surmonter deux paires d'obstacles qui interagissent : *vitalisme et mécanisme, réductionnisme et holisme*.

La problématique du biologiste est différente d'une problématique uniquement physico-chimique. La décomposition, l'analyse du « *niveau d'organisation supérieur* » par « *un niveau d'organisation inférieur* » (Jacob, 1970) principe méthodologique de réduction du vivant, s'oppose à la prise en compte de la « *totalité* ». Décrire les réactions chimiques isolées en tubes à essais constitue un progrès, mais ne suffit pas. Le métabolisme est localisé, régulé, adapté aux changements de milieu : les réactions chimiques du vivant sont couplées en chaînes, en cycles, en réseaux, dans des conditions spatio-temporelles particulières. Voilà ce qui conduit à se préoccuper de la « *vitalité* » du vivant, en plus de sa « *matérialité* ».

D'une manière générale, on range, sous la dénomination de vitalisme, les théories biologiques qui tendent à distinguer nettement les processus vitaux des autres phénomènes physiques ou chimiques. Les analyses épistémologiques de Bachelard et de Canguilhem ont mis en évidence qu'un vitalisme latent pouvait se développer dans l'inconscient, avec une valorisation de la vie et de la mort. Si, depuis la moitié du XIX^e siècle jusqu'au début du XX^e siècle, le vitalisme classique s'est réduit peu à peu à une illusion de théorie scientifique, on doit reconnaître qu'en certains de ses aspects, le recours à une prise en compte de la « *vitalité* » reste une tendance naturelle de toute science qui tente de rendre compte de la spécificité des phénomènes biologiques étudiés.

C'est en reconsidérant les critères différenciateurs de l'organique et de l'inorganique que Pasteur a institué la problématique de la chimie du vivant. Pendant ses dix premières années de recherche, il a su établir une liaison originale entre deux disciplines, la cristallographie (chimie) et la

polarimétrie (physique) dont les problématiques étaient jusque-là demeurées autonomes. Il pense avoir découvert une originalité profonde du vivant en identifiant les causes de l'isomérisation optique. Il imagine que l'une des caractéristiques fondamentales de la vie est de choisir l'une des deux formes dissymétriques d'un constituant organique (exemples de l'acide tartrique, de l'alcool amylique). Cette idée s'est avérée fabuleusement productive. L'association de méthodes inaugure de plus une science fondamentale : la stéréochimie.

Dès le début du XIX^e siècle, l'approche expérimentale des chimistes, « maîtres du feu », se présente en contradiction avec celle des biologistes, soucieux de l'organisme et du maintien des conditions de viabilité. Chauffant, hachant, broyant, le chimiste « *torture la nature* » pour mieux la mettre « à la question ». Pasteur, qui défend une certaine spécificité de la chimie du vivant, apparaît comme vitaliste contre les chimistes (tel Berthelot), mais non moins chimiste contre les vitalistes (tel Pouchet). Fort soucieux du maintien des conditions de viabilité, il utilise, lors de la controverse sur l'origine des micro-organismes des années 1860, des ballons à cols effilés. Il invente ainsi un procédé qui permet de séparer, sans détruire par ébullition (Cantor, 1995). Un débat reprendra lors de la compréhension du rôle des « ferments » : certains « ferments », très instables, paraissent indissolublement associés à la matière vivante, alors que d'autres ne le sont pas. Pour une approche réellement biologique de la chimie du vivant, il faut donc concilier une méthodologie respectant la vitalité et l'analyse matérielle physico-chimique (Cantor, 1994). La méthode d'analyse sur les extraits des tissus, mise au point ensuite par Büchner et qui constitue une méthode essentielle pour les biochimistes, permettra par la suite d'intervenir dans une réaction.

Hopkins, dans les années 1910, lutte contre les croyances des vitalistes. Il souhaite faire évoluer les conceptions anciennes qui postulent que toutes les substances chimiques introduites dans l'organisme sont intégrées au sein d'une « molécule » géante, le biogène. Il s'oppose aussi à l'idée que les mécanismes intimes du vivant sont si obscurs qu'on ne pourra jamais les décrire. Il a la conviction que la cellule vivante est formée de molécules simples, susceptibles, par réduction, d'être décrites grâce à la chimie structurale. Ces molécules simples sont transformées grâce à des réactions chimiques catalysées par des enzymes spécifiques. Peut-on pour autant réduire la biologie à la chimie ? Non, soutient Hopkins, le vivant « *crée l'inattendu* », et sa compréhension passe par une sensibilité particulière du chercheur (Desbeaux-Salviat, 1997a).

La biochimie montre que la spécificité du vivant ne peut résider ni dans des lois physico-chimiques qui lui seraient propres, ni dans une force vitale organisatrice. « *Mais une fois qu'elle a dit cela* », commente Pichot,

« elle s'interdit, par ce seul propos de parler de la spécificité de l'être vivant » (Pichot, 1993, p. 938). Ce problème reste au cœur de la biologie. Le recours aux notions de complexité, d'auto-organisation, d'émergence tente de concilier évidente originalité du vivant et stricte observance des lois physico-chimiques.

2. POUR UNE APPROCHE BIOLOGIQUE DE LA CHIMIE DU VIVANT

En principe, les molécules du vivant ne diffèrent pas des autres molécules, pourtant certaines sont spécifiques et aptes à réaliser une fonction particulière. Citons les acides nucléiques dont la séquence dans l'ADN peut être traduite en polypeptides ou protéines. Parmi ces protéines, les enzymes servent de catalyseurs dans les processus métaboliques. Les phosphates permettent les transferts d'énergie, les lipides sont utiles à l'édification des membranes. Les molécules du vivant sont généralement plus complexes que les molécules de faible masse moléculaire du monde inanimé. Et ce n'est pas parce qu'on connaît la structure d'une substance qu'on en déduit pour autant sa fonction. Le fonctionnement du vivant étant sélectif, régulé, adapté, la problématique du vivant ne se réduit pas à une problématique uniquement physico-chimique (Canguilhem, 1965).

2.1. Originalités de la chimie du vivant

Même si les lois de la chimie permettent de décrire les phénomènes biologiques, les réactions les plus évidentes du point de vue du chimiste ne sont que rarement celles qui se produisent dans les systèmes vivants. Les bilans chimiques sont parfois trompeurs. Sénequier, par exemple, croit en 1782 avoir montré expérimentalement que le CO_2 se décompose en carbone et oxygène lors de la photosynthèse. En 1910, Duclaux, sans remettre en cause véritablement cette interprétation des phénomènes, n'exclut pourtant pas d'autres possibilités et souligne l'ignorance dans laquelle on se trouve pour décrire les étapes intermédiaires et les mécanismes réels de la photosynthèse. L'étude du vivant, par les méthodes de la chimie, a longtemps rebuté les analystes (Hopkins, 1913). Il est, en effet, fondamental de se poser la question de la signification biologique des produits analysés. Est-ce qu'un produit a une importance structurale, fonctionnelle ou ne s'agit-il que d'un déchet métabolique ? Ainsi, des produits ont été considérés comme des déchets alors qu'ils pouvaient être importants : c'est ainsi que l'ADN, extrait pour la première fois du pus par Miescher en 1868, est d'abord rangé dans la catégorie des substances sans intérêt (Raichvarg, 1997).

2.1.1. Unité du vivant

Il est classique de souligner que les êtres vivants présentent un certain nombre de molécules (en particulier des macromolécules tels les acides nucléiques et les protéines) et de réactions qui ne se trouvent pas dans les objets inanimés. Cette composition représente un des arguments fondamentaux dans l'unité du vivant. Cette analyse ne suffit cependant pas à caractériser le phénomène de vivant et l'analyse chimique est « *impuissante à établir une différence essentielle entre un corps inanimé et un cadavre* » (Duclaux, 1910, p. 226). Une telle approche peut arriver à ne considérer les êtres vivants et les objets animés que comme une collection d'objets, qui ne diffèrent les uns des autres que par leurs caractères chimiques (Pichot, 1993).

Tous les organismes possèdent un programme génétique, issu d'une histoire évolutive et constitué d'acides nucléiques (ADN ou ARN). Ce programme peut contrôler sa propre réplication et celle d'autres systèmes tels les organites cellulaires (mitochondries), les cellules et les organismes entiers. Des mutations, sources de la variation génétique, peuvent survenir. L'étude des variations, même minimales, de ces molécules présente cependant des intérêts biologiques fondamentaux (par exemple l'étude des maladies génétiques peut contribuer à décrire des mécanismes physiologiques, la comparaison de molécules d'ADN est utilisée pour proposer différents modèles de reconstitution phylogénétique).

2.1.2. Complexité et organisation

Dans les systèmes vivants, la complexité existe à tous les niveaux (molécules, cellules, organes, organismes, populations, écosystèmes). Les mécanismes de rétroaction sophistiqués, précis et complexes, présents dans les systèmes vivants n'ont pas d'équivalents dans les systèmes inanimés (Rumelhard, 1994 ; Giordan, 1995). En effet, la plupart des fonctionnements vitaux, marqués par la polyfonctionnalité, établissent entre eux des relations multiples (Debru, 1990) et il faut prendre en compte l'organisation en systèmes du vivant (sous-systèmes, systèmes de systèmes, systèmes de systématisation) qui sont aussi des *niveaux d'intégration* (Jacob, 1970).

2.1.3. Totalité du vivant

La réduction de l'organisme à un niveau inférieur arrête certains phénomènes (les comportements, la reproduction, certaines régulations, etc.) mais en laisse se poursuivre d'autres. La structure chimique, aussi précise soit-elle, renseigne rarement sur la fonction ; à ce propos, l'exemple

des hormones développé par Guy Rumelhard (1987) est éclairant. La structure spatiale des macromolécules se révèle fondamentale d'un point de vue biologique. Par les propriétés d'allostérie, la morphologie changeante de ces molécules constitue une clé de leur fonctionnement biologique (immunité, récepteurs, etc.)

Depuis les travaux de René Joachim Henri Dutrochet (qui modélisa en 1827 le phénomène d'osmose), on explique le fonctionnement des membranes cellulaires en termes physico-chimiques et c'est un progrès, mais ce n'est qu'une étape. Pour aller au-delà de ce qu'on appelait le « matérialisme » de Dutrochet, il apparaît indispensable d'expliquer que le fonctionnement est :

- sélectif (spécificité du passage des substances),
- régulé (maintien de concentrations de substances de part et d'autre de la membrane),
- adapté aux changements du milieu (et de la cellule qui augmente de volume).

Une extension indispensable, après une étape de réduction au laboratoire, est de recomposer l'ensemble qui a été détruit, avec la prise en compte, non seulement de l'organisme entier, mais aussi de la population entière qui oblige à considérer la diversité due au polymorphisme génétique.

2.1.4. Espace et temps

Une originalité de la chimie du vivant réside dans les enzymes, avec des réactions chimiques qui se présentent souvent dans des structures hiérarchisées dans l'espace (importance de la compartimentation) et dans le temps (existence de fonctionnement en cycle). La compartimentation des systèmes vivants a pour conséquence que les réactions chimiques sont beaucoup plus hiérarchisées et localisées (contrairement à ce qui se passe dans un tube à essais !) Les interactions sont spécifiques, elles sont souvent réversibles et, dépendantes essentiellement de propriétés allostériques, elles ne mettent en jeu que des énergies d'activation faibles ou nulles.

2.2. Biochimie, biologie moléculaire et biologie

Le biochimiste analyse le phénomène biologique en termes d'inventaire détaillé des molécules présentes, de leur synthèse, des réactions chimiques qui se déroulent dans l'organisme avec leurs caractéristiques cinétiques. Il établit des voies métaboliques de synthèse et de dégradation,

étudie les enzymes qui catalysent ces réactions, analyse le couplage éventuel entre ces chaînes et cycles métaboliques, identifie les processus de transduction de l'énergie. Il modélise les flux et les transferts et il tente de les relier aux structures et aux fonctions intracellulaires. À l'heure actuelle, les progrès de la biochimie sont tels que l'on peut établir de multiples connexions entre les réactions du métabolisme intermédiaire d'un organisme simple, même si la cinétique et les régulations de ces réactions ne sont pas encore bien établies.

Les êtres vivants, cependant, sont plus complexes que de simples réseaux métaboliques, en particulier avec les problèmes liés à la régulation de l'organisme. De plus, la mobilité et la sensibilité leur permettent de nombreuses interactions avec leur environnement physico-chimique, dont les conséquences resteront longtemps difficilement modélisables dans les voies moléculaires. Finalement, et comme le souligne Ernst Mayr (1989), la synthèse biochimique est tout d'abord l'affaire du vivant avant d'être celle du biochimiste ! Et les biotechnologies tentent de contrôler et d'exploiter ces formidables capacités d'activité chimique du vivant.

En biologie moléculaire, on utilise des savoirs biochimiques d'élucidation, étape par étape, de certaines voies métaboliques et des concepts issus de la génétique, pour tenter de démontrer que chaque étape est normalement contrôlée par un gène spécifique. S'interrogeant sur les molécules de l'organisme, sur leur synthèse, sur leurs modifications, sur leurs interactions et même sur leur histoire évolutive, c'est à une véritable *biologie des molécules* (Mayr, 1989 ; Debru, 1990) que s'intéresse le chercheur. Ses préoccupations essentielles se situent donc aux premiers *niveaux d'organisation* du vivant (Jacob, 1970). La biologie moléculaire, rendue conquérante par la découverte du code génétique, ne permet pas pour autant de comprendre tous les phénomènes biologiques. Elle laisse une science telle que la neurobiologie bien démunie. « *Comment* », s'interroge Claude Debru, « *étudier la relation entre le sommeil paradoxal et la mémorisation si l'on ne possède pas les principes du traitement de l'information à mémoriser ? Là est le drame de l'expérimentation actuelle, dans l'inadéquation des buts spéculatifs et des outils techniques et conceptuels* » (Debru, 1990, p. 361). Pour le neurophysiologiste expérimentateur, les concepts biochimiques ne sont que des instruments qu'il met au service de sa démarche expérimentale. La physiologie expérimentale ne peut se passer de la biochimie, mais ses pratiques et ses modes de pensée ne sont pas les mêmes

La biologie moléculaire et la biochimie appartiennent aux sciences de la vie. Cependant les sciences de la vie regroupent deux approches différentes : biologie du fonctionnement et biologie de l'évolution différent, en effet, dans leurs méthodes mais surtout dans leur questionnement. L'une

étudie les *causes prochaines ou fonctionnelles* d'un phénomène biologique, tandis que l'autre s'interroge sur les *causes évolutives* (Mayr, 1989), et ceci à tous les niveaux d'intégration du vivant. Même si une relation dialogique reste encore difficile à établir (Cantor, 1996), les deux approches (fonctionnement et évolution) sont complémentaires et beaucoup de biologistes moléculaires étudient maintenant des questions relatives à l'évolution, tandis que de nombreux biologistes évolutionnistes s'intéressent désormais à des problèmes moléculaires.

3. L'ENSEIGNEMENT DE LA BIOCHIMIE AU LYCÉE

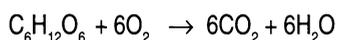
Après avoir analysé les approches historiques et épistémologiques de la chimie du vivant, nous examinons les pratiques de classe dans le domaine, et pointons les insuffisances et les ambiguïtés.

Actuellement, la biologie moléculaire est la discipline phare des « Sciences de la Vie et de la Terre » dans les lycées français. L'élève ne saurait donc appréhender la biologie sans un solide bagage en chimie. Les manuels scolaires font clairement apparaître les connaissances biochimiques comme des énoncés chimiques : on reconnaît des formules de substances organiques, des réactions figurées par des équations, etc. Mais, pour un chimiste, tout cela ressemble à de la mauvaise chimie : les molécules présentées sont inconnues de lui et souvent très complexes, les notations correspondent rarement à ses normes, les réactions sont parfois couplées, ou encore présentées sous forme de cycle. Par ailleurs, une volonté, exprimée dans les programmes officiels de présenter des problèmes de chimie en utilisant les objets des Sciences de la Vie et de la Terre contribue à entretenir une confusion certaine. L'élève perçoit-il la problématique du biologiste dans les énoncés de la biochimie, ou bien n'y voit-il que de la chimie ?

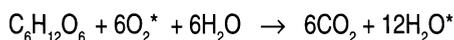
3.1. Des savoirs chimiques mal maîtrisés

Les enseignants de lycée français n'étant pas formés à la polyvalence se contentent fréquemment de pratiquer une stratégie d'emprunt. Pour se conformer aux instructions des programmes scolaires, les professeurs de biologie injectent dans leur enseignement des connaissances de chimie supposées connues des élèves (réactions chimiques, déshydrogénation, décarboxylation, oxydoréduction, etc.), tandis que les professeurs de chimie s'appuient sur des concepts de biologie sans les expliciter (écosystèmes, photosynthèse, etc.)

Dans l'enseignement de la chimie, les élèves sont rarement confrontés à des mécanismes réactionnels mais plus fréquemment à des équations-bilan. Les systèmes étudiés sont fermés, alors que les systèmes biologiques sont le plus souvent ouverts, parcourus par un flux de matière et d'énergie, et régulés. Par exemple, l'équation de la respiration habituellement présentée aux élèves est trop simple et laisse penser que le dioxygène se combine directement avec les atomes de carbone des nutriments organiques. Ce sont, en fait, des atomes d'oxygène provenant de molécules d'eau, et n'apparaissant pas dans le bilan, qui se combinent avec les atomes de carbone des nutriments organiques. Ainsi, au lieu d'écrire une équation-bilan simplifiée :



il vaudrait mieux écrire :



Bernard Darley (1996) va même plus loin, quand il affirme qu'il est parfois nécessaire de transgresser la règle des bilans équilibrés afin de ne pas induire, chez l'élève, une vision erronée de certains mécanismes biologiques se produisant dans un milieu ouvert.

Le terme « oxydation » peut aussi être générateur d'obstacles. Une enquête (Desbeaux-Salviat, 1997a) effectuée en 1993-1994 dans cinq classes de première scientifique, a montré que 43 % des élèves interrogés pensaient que l'oxydation faisait obligatoirement intervenir de l'oxygène (sens commun initial). Pour les chimistes, l'oxydation revêt une autre acception : ils raisonnent uniquement sur le plan d'une perte d'électrons par la molécule considérée. Les erreurs historiques retentissent : étymologiquement, oxydation signifie transformation en une substance acide. On pensait, initialement, que l'oxygène avait le pouvoir d'engendrer des acides et que tous les acides contenaient l'élément oxygène. Selon le degré de développement historique, les chimistes utilisent les mêmes mots mais avec des sens dérivés.

Les connaissances en chimie sont donc sources d'obstacles et entravent la compréhension des savoirs biochimiques au lycée. On se contente de citer des noms, des étiquettes qui ne signifient rien d'opérationnel pour l'élève. Il s'agit d'effectuer une sensibilisation très froide, exclusivement théorique, aux concepts de la biochimie métabolique. Pourtant, comme nous le présentons dans le tableau 1, il est possible de construire des activités pouvant interagir avec les obstacles identifiés précédemment.

Objectifs annoncés dans les programmes de lycée (connaissances à acquérir)	Réactions biochimiques Déshydrogénation Décarboxylation Oxydoréduction Conversion énergétique
Difficultés, obstacles rencontrés par les élèves	Non maîtrise du concept de réaction chimique élémentaire, alors qu'il s'agit d'appréhender un ensemble de réactions chimiques coordonnées (caractéristique du vivant) Absence de rattachement à des pratiques de référence Absence de référent empirique Absence de représentations mentales disponibles Confusion entre modèle et réalité
Pistes de remédiation	Expliciter les points communs et les différences entre approche chimique et approche biologique Travailler le concept de vivant Travailler la modélisation, l'articulation entre référent empirique et théorie

Tableau 1 : Quelques obstacles aux apprentissages biochimiques et pistes de remédiation

3.2. Un déficit de références empiriques

Que faire pour que les élèves participent davantage à leurs apprentissages en biochimie ? Pour des raisons à la fois épistémologiques, psychologiques et pédagogiques, faire comprendre le fonctionnement scientifique, ses exigences et ses limites est probablement un devoir culturel primordial. La compréhension du mécanisme dialectique de va-et-vient entre modélisation (ou théorisation) et confrontation expérimentale devrait constituer un axe fort de cette culture scientifique (Martinand et al., 1994). La question de la référence des savoirs scientifiques, en particulier celle de la constitution d'un champ de références empiriques reste, cependant, encore très négligée en didactique de la biologie. Jean-Louis Martinand (1986), dans ses travaux sur le concept d'élément chimique, souligne pourtant l'importance de la notion de référent empirique qui représente l'ensemble des expériences, faites ou évoquées, et constitue le vaste champ de positionnement de problèmes scientifiques ou d'application de connaissances.

Dans l'enseignement de la biologie, au secondaire, de nombreuses activités pratiques de biologie font largement appel à des techniques d'analyse chimique plus ou moins maîtrisées. Les plus communes consistent

à « mettre en évidence » différentes substances chimiques présentes dans la matière vivante, d'autres représentent des expériences, souvent prototypiques et servant à la « *monstration* » (Johsua, 1989) de phénomènes chimiques dans de grandes fonctions biologiques (digestion, respiration, etc.) Les questions, concernant l'intérêt de ces activités pratiques dans un apprentissage de savoirs biochimiques, sont rarement posées dans des termes de constitution d'un référent empirique et de son élargissement progressif. Les propositions de différents modes didactiques des pratiques expérimentales, que nous formulons ailleurs (Coquidé, 1998), peuvent contribuer à éclaircir ces questions.

3.2.1. Différents modes didactiques de pratiques expérimentales

Dans un registre de *familiarisation pratique* ou « *d'expérience-action* », le but des expériences (au sens large) est de donner aux élèves des occasions de pratiquer des essais, d'acquérir un savoir-faire préalable, de s'approprier des instruments et des procédures d'investigation, de développer un questionnement scientifique, et d'entrer dans un référent empirique. Nous constatons que le registre de familiarisation pratique des élèves aux objets biochimiques reste à construire. Ces référents concernent aussi bien une *phénoménotechnie* (utiliser une pipette, recueillir un gaz, choisir un matériel de verrerie adapté, etc.), qu'une *phénoménographie* comportant une fonction de représentation et d'explicitation (évoquant de l'eau de chaux qui se trouble en présence de dioxyde de carbone, de la flamme d'une bougie qui se ravive en présence d'oxygène, etc.) Les difficultés que rencontrent certains élèves par manque de ces référents empiriques sont souvent sous-estimées.

Dans un registre *d'expérimentation*, la priorité du dispositif pédagogique est de favoriser la mise en œuvre, par les élèves, d'une réelle investigation expérimentale ou documentaire à travers une recherche problématisée. Cette investigation oblige les élèves à mettre à l'épreuve leurs idées, à rechercher une adéquation entre les moyens et les fins, à s'interroger sur la validité de leurs résultats, à argumenter. Elle favorise une initiation à des démarches et raisonnements scientifiques.

Dans un registre *d'élaboration théorique*, ou « *d'expérience-validation* », les expériences, réalisées en travaux pratiques ou évoquées, sont essentiellement mises au service de la construction de concepts et de l'élaboration de modèles scientifiques. L'élève est sollicité pour effectuer de nombreux allers-retours entre référent empirique et conceptualisation. Il peut ainsi élargir le référent empirique, explorer les domaines de validité des constructions conceptuelles ou modélisantes, en éprouver la pertinence et, si possible, étendre le domaine d'application.

3.2.2. *Un exemple : la constitution d'un référent empirique pour l'enseignement du cycle de Krebs*

Ces différents modes ne représentent pas des étapes mais des moments, articulés au sein d'un apprentissage. Dans le cas du cycle de Krebs, le tableau 2 ci-joint présente une hypothèse de constitution d'un référent empirique en fonction de ces différents modes. Il intègre plusieurs essais pédagogiques innovants, testés auprès d'élèves et d'étudiants. Des observations précises ont été effectuées : elles montrent, certes, que des obstacles persistent, mais ces premières tentatives nourrissent la réflexion didactique.

Dans un mode de familiarisation pratique, les manipulations, effectuées par les élèves, dans le cadre de l'option « sciences expérimentales » de la classe de première scientifique (option supprimée en 2000), avaient pour objectifs de leur faire s'approprier des techniques d'investigation, de créer des phénomènes pour les questionner, notamment pour faire émerger un questionnement sur le vivant.

MODE DE FAMILIARISATION PRATIQUE : « EXPÉRIENCE-ACTION »

Contexte : initiation à des techniques de biochimie pour l'étude du métabolisme cellulaire.

Buts : familiariser l'élève avec le phénomène de respiration dans des broyats de muscle, développer un questionnement scientifique sur le vivant, faire progresser un savoir-faire préalable (préparer un broyat, une sonde oxymétrique reliée à un dispositif d'ExAO), faire s'approprier des techniques d'investigation (utiliser une sonde oxymétrique et un logiciel enregistreur), constituer un référent empirique (influence de l'ajout d'acides organiques, de poisons comme le malonate).

Nature du dispositif pour l'élève : exploration empirique et contrôle des actions.

Priorité de guidage de l'enseignant : partir d'un problème concret : « en quoi les organes prélevés pour faire des greffes sont-ils vivants ? », proposer des situations variées et diversifiées pour tester les propositions des élèves (Dans quelles conditions un muscle respire-t-il ? Un gros morceau de muscle consomme-t-il plus de dioxygène que du muscle broyé ? Qu'est-ce qui modifie les échanges respiratoires ?), favoriser les comparaisons, les confrontations multiples, relancer le questionnement, introduire le doute, aider à reformuler, initier une articulation entre le réel et l'abstraction (Comment a-t-on pu passer des faits expérimentaux aux connaissances théoriques sur la respiration cellulaire ?), favoriser un apprentissage technique (Desbeaux-Salviat et al., 1997).

MODE D'EXPÉRIMENTATION

Contexte : pratiques d'investigation empirique et documentaire à partir de problèmes historiques concernant le cycle de Krebs ou provenant de la situation de familiarisation (ex : interpréter l'action des poisons).

Buts : initier à des démarches scientifiques, utiliser des techniques d'investigation.

Nature du dispositif pour l'élève : mise en œuvre, en tout ou en partie, d'une réelle démarche d'investigation (recherche bibliographique, problématisation, investigation dont expérimentation, conception et réalisation de protocoles, communication, discussion).

Priorité de guidage de l'enseignant : investigation documentaire sur les problèmes effectivement rencontrés par Krebs (Desbeaux-Salviat, 1997a), aider à problématiser ou à émettre un projet (par exemple pour transposer les expériences de Krebs avec l'ExAO), favoriser la mise en œuvre des investigations, favoriser la rigueur dans la démarche de validation des élèves, favoriser les confrontations multiples, favoriser la réflexion des étudiants sur les démarches et les raisonnements qu'ils suivent.

MODE D'ÉLABORATION THÉORIQUE : « EXPÉRIENCE-VALIDATION »

Contexte : élaboration conceptuelle et modélisante du cycle de Krebs.

Buts : participer à l'élaboration d'un modèle scientifique ; élargir le référent empirique de l'application du cycle de Krebs dans le monde vivant par des expériences réalisées ou évoquées (limites de validité de ce modèle), construire l'enchaînement des étapes du cycle de Krebs en ayant accès aux procédures historiques de validation scientifique.

Nature du dispositif pour l'élève : sollicitation d'allers-retours entre registre empirique et conceptualisation.

Priorité de guidage de l'enseignant : proposer ou présenter des expériences dans les domaines de validité du cycle de Krebs pour en éprouver la pertinence, comparer les modèles historiques successifs des cycles de Krebs et les techniques associées : manométrie, colorimétrie, utilisation de molécules marquées (Desbeaux-Salviat, 1997b), généraliser l'universalité du cycle de Krebs au monde vivant aérobie.

Tableau 2 : Référent empirique pour l'enseignement du cycle de Krebs, en fonction des modes didactiques des pratiques expérimentales

Les sources historiques, sur l'évolution des problèmes scientifiques et sur les propositions successives de modélisation du cycle de Krebs, peuvent être utiles, soit pour une investigation documentaire par les élèves, par exemple dans le cadre des Travaux Personnels Encadrés, soit pour une présentation historique des recherches par l'enseignant.

Dans un mode d'élaboration théorique, d'autres expériences sont également évoquées et des activités documentaires sont proposées aux élèves, pour élargir le référent empirique et valider la modélisation du cycle de Krebs à un ensemble de vivants. Ces situations sont l'occasion de développer l'utilisation du modèle de cycle de Krebs, de le limiter au seul monde vivant aérobie, d'envisager l'hypothèse d'une apparition précoce de ce mécanisme dans l'évolution, et de le complexifier en fonction des besoins. C'est aussi l'occasion de comprendre qu'une invention scientifique naît dans un contexte donné.

3.2.3. Le rapport à l'instrumentation

L'instrumentation, en particulier celle relative à la chimie, reste le plus souvent imposée alors qu'une réflexion des élèves concernant le choix de celle-ci, son utilisation et son fonctionnement, pourrait contribuer à développer une phénoménotéchnie. Les laboratoires de lycée possèdent rarement des outils spécifiques d'analyse biochimique, tels les instruments permettant d'effectuer une électrophorèse sur gel ou les galeries pour la détection d'activités enzymatiques variées. Une utilisation modeste de tels appareils pourrait être envisagée avec, pour perspective, la familiarisation pratique des élèves à des techniques spécifiques d'analyse biochimique (histoire de l'outil, principe de fonctionnement) et la caractérisation d'une approche biochimique par rapport à une simple approche chimique.

3.2.4. La « résistance du réel »

Les enseignants apprécient les guides pédagogiques de travaux pratiques qui présentent des protocoles et des manipulations avec moult détails techniques de dosage, de composition chimique. Examinons (figure 1) l'exemple de la réalisation d'une fermentation alcoolique avec un extrait acellulaire de Levure (Pol, 1994, p. 138).

Remarquons tout d'abord, sur cet exemple de protocole proposé aux enseignants, que lorsqu'un élève manipule sur des suspensions cellulaires, il doit à la fois maîtriser le changement d'échelle, le changement de niveau d'organisation, et la signification de l'ensemble des opérations techniques qu'il doit mettre en œuvre. Toutes ces opérations successives constituent une « charge mentale » très importante, et tous ces intermédiaires, en établissant une surcharge cognitive, peuvent faire perdre de vue le questionnement biologique initial et empêcher un raisonnement efficace de l'élève.

Remarquons ensuite la précision des détails techniques donnés. Il faut être sûr « que ça marche » et que la manipulation envisagée réussisse ! Le matériel biologique, en effet, ne se prête pas facilement à l'investigation mais cette résistance elle-même peut développer une réelle interrogation scientifique. La reconnaissance de cette résistance du réel et la recherche de son dépassement représentent même des objectifs essentiels dans une investigation (Coquidé et al., 1999). La connaissance de tous ces détails techniques peut, certes, être très utile et faire gagner un temps de recherche précieux ou éviter un tâtonnement inutile, à condition d'inciter les enseignants et les élèves à un questionnement scientifique et biologique. Les questions peuvent être relatives :

– au matériel d'étude préconisé : les résultats sont ils spécifiques ou non ? Connaît-on les raisons du choix de ce matériel ? Est-il scientifique ou simplement pratique ?

– aux conseils pratiques concernant le protocole : à quoi servent certains traitements chimiques du matériel biologique ? Pour quelles raisons le protocole présente-t-il un substrat expérimental de composition chimique très précise (importance des liquides de survie, maîtrise des tampons, etc.) ?

4.5. Réalisation d'une fermentation alcoolique avec un extrait acellulaire de Levure

TEMPS: ⌚ 2 h.

DIFFICULTÉ: ▲▲

MATÉRIEL: Levure de boulangerie, papier filtre épais, entonnoir, sable de Fontainebleau, mortier et pilon, agitateur magnétique, alcool absolu, tampon phosphate pH 6,2 (S 3.3), solution de glucose à 50 g/L (277 mmol/L), microrespiromètre ou montage du 4.1., bain-marie thermostaté, étuve, centrifugeuse.

CLASSES: 1^{re} S et 1^{re} S option.

PROTOCOLE

Mettre en suspension 20 g de levure dans 100 mL de tampon avec 5 mL de la solution de glucose et mettre en agitation pendant quelques heures. Centrifuger les cellules et les remettre en suspension dans 25 mL d'eau distillée. Bien agiter jusqu'à obtenir une suspension bien homogène. Filtrer ou centrifuger.

Faire couler de l'eau dans le filtre ou remettre les levures en suspension dans l'eau. Recommencer jusqu'à ce que le filtrat ou le surnageant soit limpide: répéter l'opération 2 ou 3 fois pour cela.

Verser dans le filtre de l'alcool absolu et remettre les levures en suspension dans l'alcool. Recommencer jusqu'à ce que le filtrat soit limpide. En général, 2 passages à l'alcool suffisent.

Faire sécher le filtre à l'étuve à 35 °C et mettre la levure sèche dans un mortier avec une petite quantité de sable.

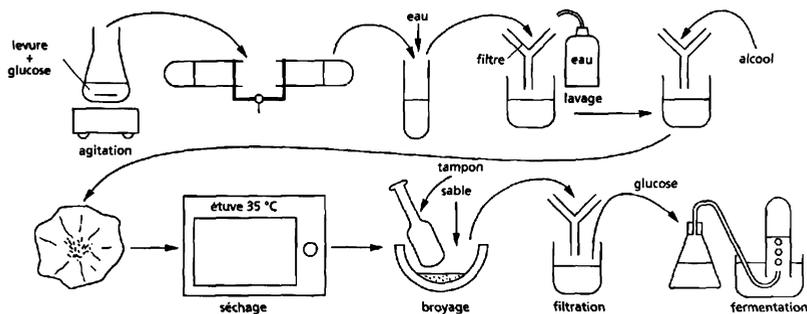
Broyer longuement et soigneusement puis ajouter du tampon phosphate (environ 50 mL) et continuer à broyer. Verser le tout dans un filtre.

Recueillir le filtrat et le mettre à incuber une heure avec un volume équivalent de la solution de glucose. Placer ensuite soit dans un montage comme celui du TP 4.1., soit dans la cuve d'un microrespiromètre et faire les mesures de dégagement de dioxyde de carbone.

EXPLOITATION

■ Les dépenses énergétiques des organismes; énergétique cellulaire; les enzymes (1^{re} S).

■ Nutrition, métabolisme énergétique et programme génétique des Levures (1^{re} S option).



17. Fermentation avec un extrait acellulaire de Levure.

Figure 1 : Travaux Pratiques de biologie. Réalisation d'une fermentation alcoolique, selon D. Pol

3.3. Des savoirs biochimiques mal contextualisés

Les buts de l'enseignement de la biochimie diffèrent suivant les filières, en particulier suivant que la filière est classique ou professionnalisée pour des carrières médico-sociales ou biotechnologiques. Dans une perspective d'apprentissage de la biologie dans une filière classique, les savoirs biochimiques peuvent être référés à des pratiques sociales ou sont abordés dans une problématique biologique.

3.3.1. Les pratiques sociales de référence

Les pratiques sociales de référence concernant la chimie du vivant peuvent être issues de la santé, avec les dosages sanguins et différents tests simples de biologie médicale (test de grossesse, test de glycosurie, etc.) Elles peuvent également provenir des usages domestiques ou industriels des biotechnologies, en particulier celles des fermentations. Les contenus de l'enseignement y font parfois référence, mais ces pratiques sociales n'apparaissent, le plus souvent, que comme un domaine d'application de connaissances biologiques, et rarement comme un domaine de problématisation. C'est essentiellement une transposition du seul savoir savant qui prédomine.

3.3.2. Les niveaux d'organisation biologique

Pour diverses raisons, pratiques, éthiques ou idéologiques, qu'il ne convient pas de développer ici, les travaux pratiques de biologie dans les lycées français se situent rarement au niveau d'un organisme. Certaines activités proposées utilisent, certes, des levures, des graines ou quelques végétaux dans leur intégralité, mais les investigations ou les manipulations chimiques proposées se situent le plus fréquemment au niveau moléculaire ou cellulaire. Le questionnement des élèves peut aborder la signification des données ainsi recueillies quand on change de niveau d'organisation biologique et/ou dans une perspective de totalité du système vivant.

Plus généralement, dans un enseignement de biologie, c'est avec une attention particulière aux relations structurelles et fonctionnelles, et avec une préoccupation évolutive, que l'apprentissage de savoirs biochimiques peut être envisagé.

CONCLUSION

À travers ce texte, nous souhaitons fournir un cadre de réflexion pour renouveler le sens de l'enseignement de la chimie du vivant, dans une

perspective d'apprentissage de la biologie en filière de lycée classique. Penser en termes d'apprentissages scientifiques, et non pas seulement de contenus, est indispensable si on ne veut pas limiter l'enseignement de la biochimie à un discours sur la science. Cette perspective borne de nouveaux champs de recherche en didactique de la biologie. De nombreuses recherches sont, en effet, à entreprendre concernant :

– de réelles transpositions didactiques, au sens élargi incluant les pratiques sociales dans la référence au savoir et les questions concernant l'axiologisation (les finalités) et la didactisation (créer de l'enseignable) ;

– le point de vue sur la discipline privilégié à chaque étape du curriculum (matrice disciplinaire), avec des interrogations concernant la structuration disciplinaire et la co-disciplinarité (étudier la façon dont une discipline scolaire peut se constituer en interaction et en rupture avec d'autres) ;

– la prise en compte, également à chaque étape du curriculum, de la question de la constitution des référents empiriques pour la construction des concepts (leur constitution, leur extension progressive).

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1932). *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*. Paris, Vrin.
- BACHELARD G. (1969). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- CANGUILHEM G. (1965). *La connaissance de la vie*. Paris, Vrin.
- CANTOR M. (1994). *Pouchet, savant et vulgarisateur*. Nice, Z'Éditions.
- CANTOR M. (1995). À la conquête des germes. In F. Balibar & M.-L. Prévost (Coord.), *Pasteur Cahiers d'un savant*. Paris, CNRS Éditions, pp.121-136.
- CANTOR M. (1996). Réhabilitation de la diversité et besoin d'unité en biologie. *Trema*, n° 9-10, pp. 55-64.
- CANTOR-COQUIDÉ M. (1997). Didactique de la biologie et histoire des sciences. In J. Rosmorduc (Dir.), *Histoire des sciences et des techniques*. CRDP de Bretagne, collection Documents Actes et Rapports pour l'Éducation, pp. 335-346.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- CLARKE A. & FUJIMURA J. (1996). *La matérialité des sciences (Savoir-faire et instruments dans les sciences de la vie)*. Le Plessis Robinson, Synthélabo Groupe, collection Les Empêcheurs de penser en rond.
- COOPER H.S.F. (1980). *Life on Mars*. New York, Rinehart and Winston.
- COQUIDÉ M. (1998). Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles. *Aster*, n° 26, pp. 109-132.
- COQUIDÉ M., BOURGEOIS-VICTOR P. & DESBEAUX-SALVIAT B. (1999). « Résistance du réel » dans les pratiques expérimentales. *Aster*, n° 28, pp. 57-78.
- DARLEY B. (1996). Quand Biologie et Chimie s'affrontent : le problème des équilibres stœchiométriques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Éds), *Actes des XVIII^e*

- Journées Internationales sur la Communication, l'Éducation et la Culture Scientifiques et Industrielles*. Paris, Association DIREST, pp. 497-502.
- DEBRU C. (1990). *Neurophilosophie du rêve*. Paris, Hermann.
- DESBEAUX-SALVIAT B., SALVIAT N. & COQUIDÉ M. (1997). La respiration du muscle broyé : expériences de Krebs transposées pour l'ExAO. *Bulletin APBG* 2, pp. 271-283.
- DESBEAUX-SALVIAT B. (1997a). *Un modèle biologique, le cycle de Krebs : découverte, diffusion, enseignement à l'université et au lycée*. Thèse de doctorat, Université Paris XI.
- DESBEAUX-SALVIAT B. (1997b). L'histoire du cycle de Krebs. Un exemple de retour aux publications-sources. In J. Rosmorduc (Dir.), *Histoire des sciences et des techniques*. CRDP de Bretagne, collection Documents, Actes et Rapports pour l'Éducation, pp. 191-202.
- DEVELAY M. (1995). *Savoirs scolaires et didactique des disciplines*. Paris, ESF.
- DUCLAUX J. (1910). *La chimie de la matière vivante*. Paris, Félix Alcan.
- GIORDAN A. (1995). *Comme un poisson rouge dans l'homme*. Paris, Payot.
- HOLMES F.L. (1996). Manomètres, coupes minces de tissus et métabolisme intermédiaire. In A. Clarke & J. Fujimura (Dir.), *La matérialité des sciences*. Le Plessis Robinson, Synthélabo Groupe, collection Les Empêcheurs de penser en rond, pp. 201-226.
- HOPKINS F.G. (1913). The dynamic side of biochemistry. *British Association for the Advancement of Science, 83th meeting, Birmingham*, pp. 652-668.
- JACOB F. (1970). *La logique du vivant*. Paris, Gallimard.
- JACQUES J. (1995). Les fermentations. In F. Balibar & M.-L. Prévost (Coord.), *Pasteur Cahiers d'un savant*. Paris, CNRS Éditions, pp. 95-120.
- JOHSUA S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, n° 8, pp. 29-54.
- LEHNINGER A. (1973). *Biochimie. Bases moléculaires de la structure et des fonctions cellulaires*. Paris, Flammarion.
- MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang.
- MARTINAND J.-L. (1992). Pratiques de références, transposition didactique et savoirs professionnels en sciences et techniques. *Séminaire de didactique des disciplines technologiques*. Cachan, ENS de Cachan, pp. 57-64.
- MARTINAND J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, n° 2, pp. 89-100.
- MARTINAND J.-L., GENZLING J.-C & PIERRARD M.-A., LARCHER C., ORANGE C., RUMELHARD G., WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- MAYR E. (1989). *Histoire de la biologie. Diversité, évolution et hérédité*. Paris, Fayard.
- MUZERELLE S. (1997). Les origines extraterrestres de la vie. *Sciences et Avenir*, n° 609, p. 32.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie. Quels apprentissages pour le lycée ?* Paris, PUF.
- PICHOT A. (1993). *Histoire de la notion de vie*. Paris, Gallimard.
- POL D. (1994). *Travaux pratiques de biologie*. Paris, Bordas.
- RAICHVARG D. (1997). Décoder le réel. *Textes et Documents pour la Classe*, n° 741.
- RUMELHARD G. (1987). Formation, modification et dissolution du concept d'hormone dans l'enseignement. *Aster*, n° 5, pp. 143-170.
- RUMELHARD G. (dir.) (1994). *La régulation en biologie*. Paris, INRP.

SÉNÉBIER J. (1782). *Mémoires physico-chimiques, Tome 3*. Genève, Barthélemi.

Cet article a été reçu le 02/04/98 et accepté le 27/04/99.

NOTES DE LECTURE

BOOK REVIEWS

CHARLIER B. (1998). *Apprendre et changer sa pratique d'enseignement, Expériences d'enseignants*. Bruxelles, Paris, De Boeck, 176 p.

L'ouvrage de Bernadette Charlier se présente en trois parties de conception très classique, successivement : le cadre conceptuel qui sert de référence à l'étude, la méthode de recherche et quatre analyses de cas. S'appuyant sur un constat relativement pessimiste mais assez réaliste (les enseignants exploitent peu les ressources fournies par la formation dans leur pratique d'enseignement), elle cherche à analyser les relations entre l'apprentissage et le changement dans les pratiques. La portée d'une telle recherche n'échappera à personne : tantôt utilisée comme principal vecteur de changement, tantôt critiquée en raison d'un manque d'efficacité ou d'une excessive technicité, ou encore pour sa tendance à utiliser un « jargon », la formation peine à trouver dans les institutions éducatives sa juste place.

Le but de l'auteur est moins de prouver que de découvrir comment les enseignants intègrent leur vision du changement des pratiques d'enseignement dans la conception qu'ils se sont forgés de leur propre apprentissage. S'inspirant des travaux issus de la psychologie sociale et des sciences cognitives, elle établit la distinction devenue classique (Denis & Sabah, 1993) entre les représentations (particulières, circonstancielles et dépendantes de la situation) et les conceptions (permanentes et inscrites dans la mémoire à long terme). Les conceptions de l'apprentissage comportent une particularité (Marton et al., 1993) : elles sont structurées autour d'une dichotomie fondamentale entre l'apprentissage considéré comme l'acquisition de connaissances toutes

faites et l'apprentissage considéré comme la construction de connaissances. Au terme d'une étude très complète de la littérature sur les conceptions et l'expérience de l'apprentissage chez l'adulte, Bernadette Charlier utilise les notions ainsi précisées pour étudier comment les conceptions de l'apprentissage interagissent sur l'apprentissage de l'enseignement.

Cette étude concerne plusieurs dimensions de la pratique : les décisions de planification, les schèmes d'action (Vergnaud, 1990) et les connaissances construites, les actions mises en œuvre et la réflexion qui s'exerce sur elles ainsi que les interactions avec les pairs. Loin d'être considéré comme positif en soi, le changement est évalué comme un processus qui s'inscrit dans une histoire individuelle et une carrière. La recherche décrit de quelles manières l'idée de changement s'intègre aux conceptions d'apprentissage, mais aussi a suggéré un outil de gestion de la formation continue.

La méthode choisie, qui conjugue plusieurs approches (description du phénomène, analyse, monographie) présente une caractéristique : la double implication de l'auteur en tant que chercheuse et formatrice. Cette particularité, présentée à la fois comme une opportunité et comme une contrainte, n'est invalidante pour la recherche : le soin avec lequel l'auteur s'entoure de précautions théoriques, la qualité des analyses des entretiens, sont des gages de la validité des conclusions. Au-delà de l'étude de Bernadette Charlier, l'enjeu concerne le statut des savoirs produits par les sciences de l'éducation et des méthodes en usage dans la recherche. Cet enjeu peut se décliner dans une série de questions : quels liens existent (et sont légitimes) entre les pratiques de recherche et les pratiques de formation ? l'une peut-elle prendre ses sources dans l'autre ? quel usage peut-on faire en formation des résultats de la

recherche ? quelle place occupent les praticiens dans l'élaboration des savoirs savants concernant leurs pratiques : objets de recherche ou sujets d'une co-élaboration ? Le travail de Bernadette Charlier prend position de façon originale et pertinente. La méthode, ici définie comme « *recherche-action-formation* » (p. 141), tente de surmonter la coupure entre les chercheurs et les praticiens de la formation. Elle s'appuie sur « *une dynamique intersubjective* » qui produit des « *effets de prise de conscience* » à travers l'analyse des discours des enseignants.

La troisième partie présente les analyses de cas. La structure des discours est mise au jour, à l'aide, notamment, du modèle actanciel de Greimas, au fil des entretiens successifs avec chaque sujet. Les cas choisis ont une véritable portée heuristique et le corpus théorique mobilisé est manié avec brio. Le cas Marie-Claire, par exemple, est emblématique de « l'envie de changer » qui s'accroît au fil des formations sans que « le comment changer » soit jamais clairement explicité. Les formateurs reconnaîtront des « types » d'enseignants familiers et l'élucidation de leurs conceptions du changement peut se révéler précieuse dans la conduite de la formation continue. Mais il est clair qu'ils éprouveront de la difficulté, s'ils veulent prolonger cette réflexion pour concevoir et pour conduire les stages de formation continue ou initiale, à s'approprier les concepts et les méthodes utilisées au cours de cette recherche. Il y va plus que d'une simple formation de formateurs.

Au total le livre de Bernadette Charlier, riche et documenté, mène à bien son projet d'analyse. Sur la forme, certains lecteurs regretteront peut-être un certain académisme du plan de l'ouvrage. Mais cela ne devrait pas occulter l'importance de la problématique choisie. Alors que des critiques s'élèvent de toutes parts sur les résistances des enseignants à changer leurs pratiques professionnelles, il est opportun de rappeler que les questions liées au changement par l'apprentissage sont plus complexes qu'il n'y paraît. On peut cependant se demander si le choix des discours des enseignants comme source unique d'analyse est suffisant pour porter le projet de cet ouvrage. Du fait de

l'approche phénoménologique, la dimension contextuelle, pourtant si importante pour l'appréhension du changement, n'a pas été traitée. La question se pose d'autant plus que Bernadette Charlier, fort opportunément, rappelle la distinction établie par Donald Schön entre « *théorie professée* » et « *théorie en usage* ». Il manque peut-être ici une analyse de l'action pédagogique qui passerait par la mise en œuvre d'autres moyens d'investigation. L'intérêt de cet ouvrage demeure d'ouvrir une porte sur une façon d'aborder la question du changement des pratiques d'enseignement, porteuse de sens à la fois pour les enseignants et pour les formateurs.

F. Clerc

GIORDAN A. (1998). *Apprendre !* Paris, Belin, collection « débats », 256 p. ;

GIORDAN A. (1999). *Une Didactique pour les sciences expérimentales*. Paris, Belin, « Les Guides de l'enseignement », 240 p.

C'est, bien sûr, ce point d'exclamation du titre *Apprendre !* qui attire en premier l'attention. Une exclamative à l'infinitif annonce, chez un auteur, l'irruption de l'émoi. En même temps, adressée au lecteur, l'exclamative, surtout quand elle est infinitive, exerce des fonctions ambivalentes : inciter, encourager, évoquer, persuader, mais aussi mettre en demeure.

Ainsi, à propos même du concept « apprendre » dont il entreprend l'explication, l'auteur commence par s'exclamer. Or l'exclamation n'explique pas. Faut-il écrire, *a contrario*, et en bonne rigueur scientifique, que l'explication, elle, ne s'exclame pas ? Qu'elle n'a pas à s'exclamer ? Car l'exclamation indique toujours que l'émoi, porteur d'exagérations déraisonnables, risque de vicier le propos que l'on veut rationnel.

Or, à lire l'ouvrage, je tiens que ce titre exclamatif en constitue la fidèle métaphore. Apprendre, c'est faire un sort à l'exclamation. Je me demande si cette formule ne résumerait pas le livre, où se récapitule, à la hussarde, l'œuvre abondante et contrastée d'André Giordan, depuis plus de vingt ans qu'il expérimente et qu'il publie. Mais à condition

de bien entendre ce que signifierait ici « faire un sort ». Et, précisément, l'intérêt de ce livre est d'insister sur l'interprétation nécessairement *paradoxe* (p. 191) de la médiation éducative quand il lui revient de faire un sort à l'exclamation. « Faire un sort » est souvent compris comme une liquidation. Dans le langage familier, « faire un sort à une bouteille », c'est la boire jusqu'à la dernière goutte. Faire un sort à l'exclamation, c'est lui faire exprimer ce qu'elle a à nous dire *en dernier ressort* sur l'apprendre – comme dit Giordan, nominalisant le verbe.

Ainsi Giordan montre bien que l'apprendre commence, se proroge et se dynamise sous-tendu par l'exclamation, et que, néanmoins, il est incongru de s'exclamer sur ce qui s'explique quand on l'explique. Un élève qui ne s'exclame pas n'apprendra jamais. Un élève qui ne ferait que s'exclamer n'apprendra pas non plus. Giordan (pp. 111-112, par exemple), après bien d'autres, voit le « défi pédagogique » dans le choix d'une *via media*, qui constitue, à ses yeux, non seulement la voie de la sagesse, mais celle de la hardiesse. Il est très sévère à l'égard de l'école, quels qu'en soient les degrés. Il lui reproche prioritairement de ne jamais laisser se déployer l'exclamation, alors que l'exclamative précède l'interrogative, et, *a fortiori*, prévient l'assertive. L'exclamation, certes, manifeste la sottise, l'ignorance, la naïveté. Toutes choses que l'instruction a pour mission de combattre. Mais au médiateur qui peut l'entendre, l'exclamation révèle les conceptions déjà présentes, plus ou moins solidement établies, mixte d'appréhension des événements et d'intelligence des choses.

Giordan reprend alors dans son ouvrage les thèmes qui font l'essentiel de ses propos antérieurs, mais qu'il présente là d'une manière à la fois simple, alerte et dense : apprendre est une démarche paradoxale. Elle prend appui sur les conceptions, même erronées, que les élèves se sont fabriquées ou qu'ils ont reçues de leur milieu. Et, en même temps, elle les démantèle. Elle *doit* même dans certains cas les démanteler. Apprendre, autant qu'une logique « acquisitive », suppose une logique « perditive ». Et c'est bien dans la contradiction vive entre ces deux logiques que Giordan situe l'apprendre.

J'énoncerai quatre regrets à l'égard de cet ouvrage tonique et stimulant. Il aurait pu, à mon sens, être mieux « fini ». En premier lieu, ce livre a les défauts de ses qualités : l'alacrité du ton et de l'écriture se transforme parfois en négligence de style, voire en manque de rigueur syntaxique. Ensuite, les quelques panoramas d'histoire de la pédagogie ou de la psychologie auxquels l'auteur s'essaie ne sont pas satisfaisants. Les approximations y sont trop nombreuses, sans compter quelques erreurs manifestes. En troisième lieu, l'ouvrage constitue une défense, certes marquée du génie propre de l'auteur, de la pédagogie « centrée sur l'apprenant ». Même si Giordan insiste sur le rôle médiateur d'autrui, il est significatif qu'il n'utilise jamais l'expression, attestée par l'usage, « apprendre quelque chose à quelqu'un ». Il ne la critique même pas. Pourtant, c'est autour d'elle que maints débats se déroulent dans l'actualité pédagogique. Giordan semble traverser le champ, impavide, pratiquant l'assertion, là où beaucoup s'interrogent. Enfin, il manque à cet ouvrage une certaine exigence conceptuelle, indispensable face aux critiques *philosophiques* dont la « pédagogie centrée sur l'apprenant » est l'objet aujourd'hui. La notion d'enseignement « adapté » à l'élève, à la situation, à l'âge, etc. revient fréquemment, mais elle n'est pas vraiment conceptualisée, pas plus que ne le sont les notions de besoin, de désir, d'intérêt, de projet, de préoccupation, souvent données les unes pour les autres. En dépit des distances que Giordan prend à l'égard de ses prédécesseurs genevois, sa conception de l'apprendre me semble insuffisamment paradoxale. Elle est encore enfermée dans la doxa claparédienne de l'éducation « fonctionnelle » : tout instruction qui n'est pas réponse à un besoin est vaine.

Or son livre requiert en même temps contre cette doxa. Ne serait-ce que par la persistance de l'exclamation. Une fois dénié par l'explication, l'enfant qui s'émerveillait à tort a appris, non à s'émerveiller à raison, ce qui serait sans doute une contradiction dans les termes, mais à se moquer un peu du monde, ce qui n'est pas la moins pudique manière de le connaître, ce monde, et de s'y trouver bien. Cet enfant moqueur persiste dans le didacticien. C'est lui qui ajoute le point d'exclamation. Et c'est

ce qui rend le livre si sympathique et, néanmoins, si instructif.

C'est une coïncidence heureuse que la publication quasi simultanée de *Apprendre !* et de la nouvelle édition complètement refondue de l'ouvrage que Giordan avait tiré de sa thèse en 1978. *Une didactique pour les sciences expérimentales* reconduit les essais, les expérimentations et les analyses effectuées il y a plus de vingt ans, mais les enrichit et les recadre au point de présenter un livre quasiment nouveau. L'auteur constate que les carences de l'enseignement scientifique, telles qu'il les signalait à l'époque, persistent et se sont même aggravées : la répugnance de la masse des élèves pour les études scientifiques s'est encore accrue. Or, dans le même temps, l'acculturation technoscientifique semble avoir progressé, imposée par les inventions technologiques qui bouleversent tous les secteurs de la vie professionnelle ou quotidienne. Mais Giordan constate, aujourd'hui plus encore qu'hier, que cette « culture » scientifique n'en est pas une vraiment. Ces manières de dire, saisies par bribes et lambeaux, ne témoignent le plus souvent d'aucun savoir ni construit, ni déconstruit. Plus gravement, la prééminence de sciences rendues occultes par leur propre enseignement engendre le retour de la superstition.

Giordan estime que l'enseignement des sciences n'a pas pour fonction de renforcer la révérence, mais de faire accéder à un optimum de connaissance. Au maximalisme des programmes, il oppose l'optimum formatif et sa constante réversibilité. L'obsolescence inévitable des connaissances scientifiques, même réputées nouvelles, exige à ses yeux que, au cours de la formation initiale, la priorité soit d'initier les élèves à la *démarche* scientifique. C'était sa thèse, il y a vingt-cinq ans. Et tout l'ouvrage tente de lever les malentendus qu'engendre ce propos et de montrer que cette didactique est non seulement souhaitable, mais qu'elle est possible.

D. Hameline.

LEBEAUME J. (1999). *L'Éducation technologique*. Paris, ESF – collection « Pratiques et enjeux pédagogiques », 128 p.

Joël Lebeaume a souhaité nous proposer l'ensemble du travail de synthèse qu'il a réalisé pour obtenir l'habilitation à diriger des recherches. On ne peut, évidemment, que louer cette initiative, compte tenu de l'ampleur du travail réalisé, dont la communauté des didacticiens des sciences et des techniques appréciera l'opportunité.

Étayant son analyse sur quatre domaines auxquels, bien souvent, il a fortement contribué au développement, il construit progressivement les éléments d'une « didactique appliquée de la technologie ». La tâche est, assurément, loin d'être simple pour une discipline sans références universitaires *a priori* (ou alors composite, comme souvent revendiquée...) Mais il montre en quoi, chacun à sa façon, apporte un élément de définition : le travail manuel à l'école élémentaire, l'enseignement agricole (garçons) et l'économie domestique (filles), les activités manuelles en maternelle, et la « technologie » en collège.

Joël Lebeaume montre avec insistance, preuves nombreuses à l'appui, et surtout conviction, que par rapport aux apprentissages des enfants (de 5 à 55 ans ?) la technologie a une fonction irremplaçable. Le lecteur, une fois convaincu, attend une reconstruction, qu'à travers divers modes de présentation de « matrices curriculaires », J. Lebeaume l'entraîne vers la certitude. On ne peut que le suivre dans son raisonnement, sur le terrain où il nous mène, voire à mettre en œuvre les outils qu'il propose pour l'étude des curricula.

On aura évidemment compris mon adhésion à l'analyse détaillée de ce petit ouvrage... qui en appelle bien sûr d'autres... dans les disciplines universitaires ! (À quand l'Éducation biologique, chimique, etc. ?)

Je n'exprimerai qu'une seule interrogation, qu'un seul regret ; c'est que tout ce travail soit un élément d'une collection dont le public habituel n'est pas le public pouvant entièrement tirer profit des réflexions proposées. Cette interrogation est à l'honneur du responsable de la collection, qui fait ici un pari important, à l'honneur de J. Lebeaume qui « insiste » à rendre publics des éléments essentiels de compréhension d'un système éducatif... interpellé !

J. Toussaint

VEILLARD L. (2000). *Rôle des situations professionnelles dans la formation en alternance : le cas des ingénieurs de production de l'Institut Supérieur des Techniques Productives de Saint Etienne (ISTP)*. Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II.

La thèse porte sur la formation en alternance en réponse à la question posée par l'Institut Supérieur des Techniques Productives de Saint Etienne. Cette pratique pédagogique de l'alternance est en plein essor, tandis que la « didactique professionnelle » n'en est qu'à ses tout débuts et que l'on ne dispose pas, aujourd'hui, de moyens d'évaluer, de façon méthodique, les effets réels de cette pratique en analysant la nature des compétences acquises grâce à l'immersion dans une situation de travail. Les « situations professionnelles » proposées comme « milieu » de formation, sont décrites à l'aide à la fois de l'appareil conceptuel de la didactique des sciences (en particulier, les notions liées de *situation* et de *milieu*, en proposant les aménagements expérimentaux et conceptuels nécessaires à cette extension de ses concepts) et aux diverses sources théoriques disponibles aujourd'hui en sciences humaines en matière d'analyse de l'activité et des compétences en contexte : la sociologie (du travail, des organisations, de l'action, des sciences), l'ergonomie, l'anthropologie cognitive, la psychologie et les sciences de l'éducation. Ainsi, l'intérêt scientifique du travail de Laurent Veillard tient à l'extension maîtrisée d'un appareil conceptuel bien connu dans son cadre d'origine et à la validation de cet usage élargi par l'intégration raisonnée d'outils venus d'autres approches théoriques. On peut remarquer que les six catégories de description de l'action qui ont été retenues sont peut-être trop proches des référentiels métier par lesquels la profession se donne à voir : la volonté d'aboutir à des réponses pratiques utilisables par l'institution commanditaire a pu engager l'auteur à ne pas en chercher une validation théorique ; de ce fait, la définition de l'action en termes d'intentionnalité qui a été choisie s'est trouvée limitée à l'analyse de l'activité d'ingénieur

alors que les travaux en ergonomie ont montré que l'intentionnalité est aussi au cœur de l'action de tout opérateur, quelles que soient la routinisation et même, l'automatisation de son travail. Cependant et parallèlement, l'auteur travaille de manière remarquable la construction théorique des observables qu'il compte retenir, en la fondant sur une synthèse des théories de l'activité et des compétences en contexte dont la justesse et la clarté sont exceptionnelles. Les concepts majeurs et des paradigmes actuellement en débat sur ces sujets controversés sont situés ; le résultat est probant, et la didactique est bien le point de départ et d'arrivée d'un cadrage théorique pluridisciplinaire particulièrement réussi. Laurent Veillard a commencé par décrire le problème qu'il pose dans les cadres conceptuels existants de la cognition située et de l'ergonomie, pour montrer *a priori* comment son projet expérimental permettra de compléter les approches réalisées dans ces cadres théoriques en aidant à comprendre comment les stages en entreprise (durant lesquels les élèves ingénieurs conduisent un projet industriel innovant répondant à un besoin de l'entreprise) engagent les stagiaires à produire les compétences attendues au terme de leur formation.

L'originalité remarquable du travail tient à la manière dont un appareil méthodologique d'analyses croisées complémentaires - que l'on pourrait nommer diachroniques et synchroniques - permet 1) de décrire les composantes de « l'activité » des élèves-ingénieurs en stage de formation sur le terrain de la pratique ; 2) de décrire les milieux de ces activités ; 3) de mettre en rapport les acquisitions observées chez les ingénieurs stagiaires avec le milieu de leur acquisition en démontrant comment ce milieu a conditionné la richesse des activités menées et la prise en charge de l'ensemble des fonctions didactiques du stage. L'analyse du projet et des actions qu'il induit d'une part, l'analyse des situations particulières de l'activité d'autre part sont menées à l'aide de la collection de plusieurs systèmes de traces. Ces traces, qui sont donc produites indépendamment à partir d'outils développés précédemment dans le laboratoire où Laurent Veillard a été accueilli (l'UMR GRIC, équipe COAST) mais qu'il a adaptés aux conditions

particulières de l'enquête en rendant compte théoriquement de cette transformation, ont permis en fin de compte de valider ou d'invalider les interprétations premières. L'auteur a pu ainsi construire une description des situations professionnelles de stage qui met en évidence des phénomènes et qui est porteuse d'une compréhension nouvelle de ceux-ci en donnant les moyens de les interpréter : le commencement d'une clinique des institutions de formation.

Cependant, la question de la fonction des enseignements de l'ISTP dans les phénomènes construits au terme de l'observation n'est pas traitée et on peut le regretter, parce qu'elle est sans doute la clé de l'attitude didactique que, durant son stage, l'élève-ingénieur doit développer pour acquérir la maîtrise des compétences qu'il développe dans l'action et évaluer sa progression. En effet, la production et la conduite d'un projet industriel ne constituent pas en soi une situation d'apprentissage : il y faut encore l'intention d'en apprendre quelque chose et d'identifier ce qui a pu être appris, et cela n'a pas été identifié.

Après la production d'un système de questionnement et d'un système d'expérimentation, le chapitre 6 engage la production d'un système d'explication – ce qui constitue le troisième temps du travail scientifique. C'est ici que le retour sur la notion de milieu de la situation permet de rendre compte des apprentissages observés en les référant aux conditions observées dans le stage professionnel. C'est ici que certains des faits soigneusement attestés et construits à partir des traces de l'activité recueillies sont constitués en phénomènes et font signe dans la constitution – prudente – de ce qu'on pourrait identifier comme un tableau clinique. C'est ici aussi que se fait jour un problème intéressant : le croisement possible des résultats de Laurent Veillard avec les théories sociales de la connaissance collective permet d'envisager la possibilité d'un lien entre la notion de situation et les travaux sur la nature collective de la pensée et de l'action dans les organisations. Ce sont des liens avec les travaux où l'on cherche à ce que le processus d'acquisition de connaissances se fasse dans des situations où la connaissance visée est utilisée dans son contexte, et où il n'y a pas

de distinction temporelle entre les moments où les connaissances sont utilisées et ceux où elles sont apprises. En dehors des disciplines scolaires, la question est d'autant plus délicate que l'action n'implique pas les mots qui la décrivent et comme Polanyi nous le rappelle, quand on entreprend des tâches difficiles et complexes, nous « savons plus que nous ne pouvons le dire ». Comment caractériser les choses que les gens apprennent, et qui ne sont pas sujettes à une articulation avec le langage ? L'usage de la distinction entre connaissances, du côté de la personne, et savoir, du côté de l'institution, permet de caractériser le savoir et ceux qui savent, ce qui renvoie aux travaux relevant de la phénoménographie (Marton à Göteborg, Suède, et Entwistle à Edinburg, Scotland), dans la mesure où ils prennent pour problématique les relations entre acteurs (y compris les chercheurs) et les événements. L'attention portée à la situation (avec la notion de milieu) a amené l'auteur à s'intéresser efficacement à la description des réseaux sociotechniques de l'activité, c'est particulièrement novateur, et l'utilisation de l'analyse de l'activité dans ce contexte représente une gageure méthodologique : usuellement, on la trouve dans l'étude des métiers de production, de contrôle, de pilotage, de travail collectif qui jouent à court terme et non pas dans les métiers de conception et de direction, où les actions sont conduites à long terme, dans le cadre d'un collectif qui peut parfois être élargi aux dimensions mêmes d'une entreprise.

L'enjeu socio-éducatif de cette thèse est qu'au-delà de l'exemple choisi – celui du métier d'ingénieur de production – et des cas étudiés – ceux de deux élèves ingénieurs de l'Institut Supérieur des Techniques Productives de Saint Étienne – des enseignements plus généraux devraient pouvoir en être tirés.

Un des intérêts de ce travail est d'avoir appelé l'attention sur le fait que les projets ne sont pas également « enseignants » ou en tous cas qu'ils le sont différemment, par la nature de leur objet, le processus de fabrication dans lequel ils s'inscrivent, et par le milieu qui en structure les modes de réalisation : les compétences des élèves ingénieurs, au bout de trois ans, sont donc

très diverses. La nature de ces apprentissages dans le stage passe en particulier par les divers agencements organisationnels que l'élève trouve tout prêts, et qui lui fournissent comme une sorte de pré-frayage dans lequel il peut couler ses propres pratiques. Ainsi le second élève réalise-t-il apparemment ce qu'on attend d'un ingénieur de production et ceci, parce qu'il en trouve un modèle tout prêt dans le milieu, c'est-à-dire dans des pratiques codifiées, dans des dispositifs écrits et organisationnels, etc. Ainsi le projet place l'élève dans une situation de formation par reproduction traditionnelle du métier. Ce résultat de recherche a donc des implications pratiques pour les responsables de formations professionnelles : vont-ils devoir élaborer des outils d'évaluation du « milieu », pour classer les terrains en fonction de leurs qualités de structuration ? Vont-ils devoir profiler les types de compétences développées dans tel ou tel stage, comme Laurent Veillard le fait en conclusion en distinguant la nature du projet, l'intégration de l'élève à un groupe de pairs, les procédures de conduite de projets préalablement en place, les caractéristiques des réseaux socio-techniques ? Car le jeu des rôles sociaux et l'identification à l'image du métier qui se réalise par l'entrée dans un groupe sont un des ressorts de la fabrication de la compétence en aidant au positionnement et en organisant assez fortement l'horizon intentionnel de l'élève, qui se coule dans des procédures prédéterminées, dans un réseau socio-technique déjà largement préformé : il modèle son comportement par imitation et par identification. L'appartenance à un groupe de pairs est peut-être un facteur à prendre sérieusement en considération, puisqu'il favorise l'apprentissage du métier.

Les résultats de Laurent Veillard sont donc d'importance pour *la didactique professionnelle* et sa constitution en discipline reconnue, parce que c'est semble-t-il la première fois que les concepts de situation et de milieu, qui figurent parmi les principaux de la didactique des sciences, sont au fondement d'un travail qui s'en réclame et se retrouvent au terme du travail, intégrés comme naturellement dans la formulation des conclusions. Ces résultats sont d'importance pour les travaux en *didactique comparée* qui commencent à se développer aujourd'hui,

parce qu'ils travaillent l'extension de concepts centraux en didactique des mathématiques et des sciences.

A. Mercier

VINCE J. (2000). *Approches phénoménologiques et linguistiques des élèves de seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse de doctorat, Université Lumière-Lyon II.

M. Jacques Vince présente un mémoire de 366 pages, un recueil d'annexes détaillées et un logiciel de simulation. C'est dire, dès l'abord, l'ampleur impressionnante du travail effectué pour cette thèse de doctorat.

Le mémoire est organisé en quatre parties et dix chapitres, dont l'enchaînement logique est cohérent avec la visée de la recherche. Il s'agit en effet d'enrichir et de mieux fonder l'enseignement de physique sur le son en classe de seconde (lycée français), de favoriser les apprentissages, de fournir un outil de simulation.

La première partie, « cadre théorique et question de recherche » s'intéresse d'abord à une « approche phénoménologique du son » dans ses aspects musicaux et physiques en montrant leur complexité (chapitre I), puis à une analyse des enseignements sur le son dans le cadre de la physique, dénonçant leur caractère réducteur (chapitre II), ensuite, à ce qu'on sait aujourd'hui des savoirs et structures de connaissance sur le son des apprenants, mettant en évidence l'imbrication du perceptif et du rationnel, les difficultés de l'objectivation du son et de sa propagation (chapitre III), enfin aux « hypothèses et questions » de recherche (chapitre IV).

La deuxième partie, « propositions pour une séquence d'enseignement », développe d'une part les « hypothèses », ou plutôt les principes pour fonder une progression didactique (s'appuyer sur l'explicitation des connaissances disponibles, permettre de coopérer et d'écrire, exploiter les diverses perceptions, passer par la modélisation : chapitre V), d'autre part (chapitre VI) les

caractéristiques d'un enseignement innovant mis au point par un collectif de chercheurs et d'enseignants pour diversifier les travaux pratiques et leur apport, préciser les contenus intellectuels (concepts, modèle de vibration, modèle particulière pour la propagation).

La longue troisième partie (150 pages environ) rassemble toutes les études empiriques pour mieux connaître, avant et après enseignement, pour un groupe témoin et un groupe expérimental, les types et structures d'explication sur les phénomènes sonores, les mots et leurs caractéristiques sémantiques utilisés pour décrire et expliquer. Un chapitre (VII) explicite la problématique d'enquête par questionnaire pour atteindre le système explicatif : caractéristiques d'échantillons, justification du questionnement, outils de codage, d'analyse et d'interprétation. Le chapitre VIII donne alors les résultats détaillés pour les douze questions puis une synthèse beaucoup plus ramassée tirant les conséquences pour l'enseignement (difficultés, acquis, changements souhaitables). Un autre chapitre étudie, toujours par questionnaire, mais exploité d'un point de vue plus spécifiquement lexical et sémantique, les notions familières, précisant et renforçant l'étude précédente.

Le mémoire se termine par la présentation des principes de conception du logiciel SimulaSON.

La thèse de Jacques Vince est un texte très riche, dont la lecture est toujours stimulante dans son ensemble et intéressante dans le détail, même si, sans doute, l'exposé détaillé des résultats d'enquête aurait pu être resserré. En tout cas, l'auteur a réussi à organiser une matière qui aurait pu faire l'objet de plusieurs thèses parallèles. Il témoigne ainsi d'une maîtrise peu commune de la physique et des méthodes d'enquête utilisées, d'une culture didactique large et sûre, d'une réflexion pédagogique évidente.

On peut donc sans aucune réserve accorder à l'auteur que sa contribution principale et originale parmi les travaux francophones et anglophones concerne la « phénoménologie du son ». Considérant l'acoustique physique avec distance critique, il envisage le son dans ses aspects perceptifs et musicaux. Cela lui

permet de construire un cadre de référence très ouvert pour étudier aussi bien les conceptions des apprenants que les options souvent inconscientes des contenus de programmes, et pour élaborer les fondements et développer les contenus et outils d'un enseignement rénové.

Bien sûr, on pourrait proposer à l'auteur d'autres points de vue, s'appuyant sur d'autres recherches et théories des sciences anthroposociales pour élargir encore une ouverture qu'il a ménagée avec détermination et réussite, lorsqu'on compare à la plupart des travaux récents de didactique des sciences.

Dans un esprit de discussion, je présenterai ici quatre remarques critiques.

La première concerne l'usage finalement ambigu des termes phénoménologie et phénoménologique. D'un côté il y a l'idée d'« approche phénoménologique », assez légèrement rattachée à une tradition philosophique, d'un autre côté, il y a la notion de « phénoménologie », type de connaissance des phénomènes, plus ou moins naïve ou instruite, et prise à la limite comme existant en soi, naturalisée. Parfois il y a même confusion entre cette connaissance et les phénomènes eux-mêmes. Je pense qu'une élaboration conceptuelle, par élimination, distinction, définition était nécessaire (phénomène, phénoménal, phénoméno-graphie, phénoménologie, phénoméno-graphique et phénoméno-logique). Et cette élaboration aurait dû être prise en compte dans les schémas pour penser la modélisation et la simulation, les fonctions de représentation, d'interprétation, d'explication, le contenu des référents empiriques (qui pour moi, dans une perspective didactique, comportent à la fois la partie considérée du monde phénoménal et le savoir phénoméno-graphique ou phénoménoteknique...) Cela aurait peut-être permis de reprendre la distinction-relation portant sur notion-concept dans ces schémas pour la modélisation et la simulation, alors que finalement ils l'ignorent.

La deuxième remarque concerne le son lui-même. Malgré l'effort remarquable que J. Vince a produit, il n'a pas totalement échappé à la conception physicienne du son (et de certains de ses concepts comme la

propagation). Si le mot fait partie du lexique courant, il faut le reconstruire — en tant que chercheur — comme concept, ou ensemble de concepts. En quoi le son peut-il être considéré par rapport au sujet comme un objet ? En quoi le son-ondulation, ou le son-signal peuvent-ils être aussi considérés comme des objets, dans une pensée notionnelle qui ne se confond évidemment pas avec la modélisation mathématique des acousticiens, ou de manière plus réductrice encore avec la présentation des cours de physique. Quelles expériences auditives, sensorielles et motrices constituent le « monde des sons » ; comment se représente-t-on un espace où il y a du ou des sons ? etc. L'ambition de l'auteur concernant une physique qui permette d'enrichir l'expérience des sons d'une part, et d'en dire quelque chose de nouveau et d'intelligent d'autre part, semble devoir passer par une élucidation plus poussée de ces aspects que certains théoriciens de la musique ont affronté pour leur part.

La *troisième remarque* concerne les modèles vibratoires et particuliers. D'une part, les modèles vibratoires qui supposent de penser la vibration comme un « objet » spatio-temporel (quatre dimensions) et qui en même temps permettent de se représenter des vibrations particulières, ne sont en rien pour les apprenants des descriptions : ce sont bien des interprétations. D'autre part les modèles particuliers soulèvent de nombreuses interrogations sur les relations entre particules et la propagation de leurs variations de densité. Ce sont des interprétations, qui ne semblent explicatives que pour des physiciens formés. Et pour passer de modèles vibratoires aux modèles particuliers de la propagation du son, il semble nécessaire de s'interroger sur ce qui se passe localement dans un petit volume, où on peut interpréter soit dans un type soit dans l'autre type de modèle. Dans ces conditions, les « modèles » présentés et explorés par simulation ne sont-ils pas beaucoup plus des aides à la représentation de phénomènes qui résistent (ce qui ramène à la question précédente de l'objectivation), que des moments de véritable modélisation ?

Enfin la *quatrième remarque* concerne deux aspects de la signification éducative de

l'innovation « SOC » et du logiciel de simulation. D'une part, les objectifs d'un enseignement de la physique tel que le souhaiterait J. Vince ne sont pas vraiment formulés. C'est dommage, même s'il pourrait s'agir d'une utopie exigeant des enseignants très différents. D'autre part, le développement des séquences et du logiciel sont présentés comme un travail d'« ingénierie » c'est-à-dire un « presque prêt à enseigner » validé (séquences) ou validable (logiciel). Pourquoi l'auteur ne prend-il pas plus de distance ? Il a ouvert des voies pour mieux prendre en compte l'expérience, les idées, les « rapports au monde des sons » et au « savoir acoustique » comme on dirait aujourd'hui, il a montré comment on pourrait changer les contenus et les moyens d'enseignement. À partir de là, de multiples mises en œuvre sont possibles, selon les choix d'objectifs et de finalités, les contextes, les ressources... Les résultats de la recherche semblent donc dépasser de loin la production d'ingénierie, qui apparaît alors comme une mise à l'épreuve des réalités et une source de réflexion. Cette épreuve est évidemment nécessaire, mais moins pour valider un produit que pour tester des propositions très ouvertes et multivalentes.

Le travail de Jacques Vince représente une véritable aventure intellectuelle. C'est une contribution forte, éprouvée, à une didactique créatrice des sciences physiques.

J.-L. Martinand