

Sept ans déjà ! Didaskalia a atteint l'âge de raison.

Si l'on en juge par le nombre, la qualité et la diversité de provenance des propositions d'articles, Didaskalia a maintenant trouvé sa place dans la communauté francophone de didactique des sciences et techniques.

Au dernier comité de Direction, signe de dynamisme, nous avons décidé en commun de renouveler l'équipe qui fut à l'origine de la revue et l'a conduite à sa maturité. Ainsi Andrée Tiberghien quitte le comité de Direction et je la remplace. De ce fait, une nouvelle personne prend la responsabilité de la rédaction. Jean-Michel Dusseau, sollicité par le comité de Direction, a bien voulu accepter cette charge. C'est en toute confiance que je la lui ai déjà transmise, même si cela ne sera pleinement visible qu'à partir de l'automne 2000.

Martine Méheut

Introduction de l'électron dans l'enseignement secondaire français, vue à travers quelques manuels

Introduction of the electron in the french secondary education, seen through some textbooks

Jean-Michel DUSSEAU, Pierre FRÉCHENGUES

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

Résumé

L'électron, mis en évidence expérimentalement à la fin du siècle dernier, n'a été introduit dans les programmes officiels de l'enseignement secondaire français qu'en 1947, même si certains manuels scolaires commençaient à l'utiliser comme explicatif des rayons cathodiques vers 1910. Ce décalage n'est pas dû à l'ignorance du concept mais plutôt, au-delà d'un problème de légitimation de savoirs, à son inutilité dans le cadre d'un enseignement fortement marqué par le positivisme et l'inductivisme.

Mots clés : *électron, inductivisme, manuels d'enseignement, histoire de l'enseignement.*

Abstract

The electron, discovered experimentally at the end of the last century was only introduced into the official french programmes of secondary schools in 1947, even though some scholastic texts and manuals began to explain cathode rays by reference to the electron from as early as 1910. This time lag is not due to ignorance of the concept or lack of knowledge acceptability but rather to its perceived usefulness in being included in a framework where teaching was strongly marked by positivism and inductivism.

Keys words : *electron, inductivism, textbooks, history of teaching.*

Resumen

El electrón, a pesar de que fue puesto en evidencia experimentalmente a final del último siglo, es en 1947 cuando se introduce en los programas oficiales de la enseñanza secundaria francesa, aún cuando ciertos manuales escolares comenzaron a utilizarlo como explicativo de los rayos catódicos hacia 1910. Este defasaje no es debido a la ignorancia del concepto, él va más allá de un problema de legitimación de saberes, es debido más bien, a su inutilidad en el marco de una enseñanza fuertemente marcada por el positivismo y el inductivismo.

Palabras claves : *electrón, inductivismo, manuales de enseñanza,*

1. INTRODUCTION

L'histoire de l'introduction d'un concept de physique dans l'enseignement ne peut être coupée de l'histoire de l'émergence de ce concept dans la communauté scientifique. Dans cet article nous ne rappellerons pas les détails de l'émergence de l'électron (Fréchengues & Dusseau, 1998) mais nous essaierons de restituer l'introduction de ce dernier dans les manuels d'enseignement compte tenu des choix épistémologiques qui prévalaient alors chez les auteurs.

L'électron représente, pour C. Johnstone Stoney qui propose ce terme en 1891, l'unité naturelle de charge électrique, celle que porte un ion monovalent dans l'électrolyse. Cette idée qu'il existe une charge élémentaire d'électricité, en germe à la fin du siècle dernier chez les théoriciens de l'électromagnétisme comme Fitzgerald, Larmor ou Lorentz, se concrétise à travers un certain nombre d'expériences sur les rayons cathodiques. Tout d'abord, en 1895, Perrin montre que ces rayons n'ont rien d'ondulatoire car constitués de particules chargées. Puis dans une publication datée du 30

avril 1897, J.J. Thomson précise que les rayons cathodiques sont composés de particules environ mille fois plus petites que l'atome d'hydrogène et détermine le rapport de la charge à la masse (e/m) de ces particules, qu'il dénomme « corpuscules » et qu'il refusera jusque vers 1915 d'appeler des électrons. En effet, considérant l'atome comme sécable, ces corpuscules constituent, selon lui, les « atomes primordiaux » bases des atomes chimiques ordinaires, tandis que les électrons sont souvent considérés à cette époque (Lelong, 1997) comme des singularités de l'éther, c'est-à-dire des charges électriques indépendantes de la matière. Or, même si l'électron apparaît, à partir des années 1910, dans quelques rares manuels scolaires, comme permettant d'expliquer les rayons cathodiques alors mentionnés dans les programmes de physique de terminale, l'introduction explicite de l'électron dans ces programmes n'aura lieu qu'en 1947.

Nicole Hulin (1984) a déjà mis en évidence ces décalages entre la science enseignée et la science qui s'élabore, à travers une étude, sur la période 1869-1921, des sujets des épreuves de l'agrégation de sciences physiques. Ici nous nous focalisons uniquement sur l'introduction d'une découverte qui a participé à la révolution de la physique microscopique et de la technologie. Après avoir rappelé la chronologie de l'apparition du terme électron (ou négaton) dans les programmes et dans quelques manuels scolaires, nous montrerons que ce décalage n'est pas dû à la non diffusion du concept depuis le cercle de la recherche vers celui de l'enseignement, mais plutôt à son inutilité dans le cadre du positivisme et de l'inductivisme alors prégnants.

On peut remarquer que, jusque vers 1914, le positivisme va être un frein à l'acceptation de la discontinuité (de la matière, de l'électricité, etc.) par une grande partie de la communauté scientifique. Cette absence de consensus sur la discontinuité va laisser de nombreux auteurs de manuels dans une prudente expectative pendant longtemps. De plus l'inductivisme préconisé comme méthode pédagogique naturelle, en concomitance avec l'expérimentation en classe, va rendre très difficile l'introduction de l'atomisme et de l'électron.

Nous avons privilégié deux séries d'ouvrages scolaires destinés aux classes de 1^{re} et terminales et édités pendant une période allant bien au-delà de l'installation du concept dans la communauté scientifique :

– celle pour laquelle un des auteurs est Faivre-Dupaigre, parce qu'elle couvre de 1905 (date de sa collaboration comme simple professeur avec Fernet) à 1946 où, comme inspecteur général honoraire, il publie encore des manuels avec Lamirand et Joyal. Il a d'ailleurs été, de 1910 à 1921, président du jury de l'agrégation de sciences physiques ;

– et le cours élémentaire de physique de Lemoine et Vincent, dont les rééditions successives (caractéristiques d'une diffusion significative) couvrent la période 1908 -1931.

Il est apparu intéressant de mettre en parallèle avec ces collections, d'un côté quelques ouvrages de l'enseignement supérieur et, d'un autre côté, des manuels à destination de l'enseignement primaire supérieur (cycle court visant à former des cadres moyens).

2. LE SYSTÈME ÉDUCATIF FRANÇAIS AU XX^e SIÈCLE ET L'ÉVOLUTION DES PROGRAMMES DE SCIENCES PHYSIQUES DE 1902 À 1947

La réforme de l'enseignement secondaire de 1902 met en place une structure complètement nouvelle en réponse à la question qui se pose avec acuité vers la fin du XIX^e siècle : l'enseignement classique convient-il toujours à la formation des couches dirigeantes alors que les sciences et les techniques sont en plein essor ? Autrement dit : la mise en place d'une formation à des « humanités scientifiques » devient une priorité. Les élèves qui optent pour des études longues (menant au baccalauréat) ont désormais le choix entre un premier cycle classique où le grec s'introduit à titre facultatif en 4^e et en 3^e et un premier cycle « moderne » sans langues anciennes. À partir de la seconde, quatre sections proposent des programmes différents comportant des parties communes : latin-grec (A), latin-langues (B), latin-sciences (C) et langues-sciences (D). La deuxième partie du baccalauréat offre le choix entre deux sections : « Mathématiques » ou « Philosophie ». Des évolutions et aménagements auront lieu par la suite, mais la structure mise en place en 1902 dure *grosso modo* jusque vers la fin des années 70 (Belhoste, 1996).

Les programmes de physique de 1902 sont élaborés par une commission de huit membres : deux inspecteurs généraux, Jules Joubert et Lucien Poincaré et six enseignants universitaires (deux chimistes : Albin Haller et Louis Péchard et quatre physiciens : Henri Abraham, Paul Janet, Jean Perrin, et Jules Violle). Les grandes lignes prévoient pour les sections modernes :

- en 4^e : Pesanteur. Équilibre des liquides et des gaz. Chaleur ;
- en 3^e : Acoustique. Optique. Électricité.

Ces notions sont reprises au niveau du second cycle, car les élèves issus d'un premier cycle classique n'ont pas suivi d'enseignements de sciences physiques :

- en 2^{de} : Équilibre des liquides et des gaz. Chaleur ;
- en 1^{re} : Optique. Électricité ;
- en classe « Philosophie » et en classe « Mathématiques » : Dynamique. Énergie, principe de l'équivalence, principe de Carnot. Phénomènes périodiques en acoustique, optique et électricité.

Les recommandations jointes aux programmes sont assez succinctes. L'accent est mis sur un enseignement très pratique fondé sur l'expérience, abandonnant la méthode historique, « *les appareils surannés, les théories sans intérêt, les calculs sans réalité* ». D'ailleurs le terme « expérimental » apparaît souvent dans le libellé même des programmes et des exercices pratiques sont prévus pour les élèves.

Si les grandes rubriques sont les mêmes, les contenus du programme des classes de 2^{de} et 1^{re} A et B diffèrent de ceux des sections scientifiques C et D. Il en est de même pour les classes de terminale « Philosophie » et « Mathématiques ». En terminale « Mathématiques », le programme d'électricité en physique comprend entre autres : « ... *Décharge électrique dans les gaz ; rayons cathodiques, rayons X. – Oscillations électriques. – Propagation des ondes électriques. – Principe de la télégraphie sans fil. – Hypothèse de l'identité des oscillations électriques et lumineuses.* » alors qu'en classe de « Philosophie » le programme mentionne : « ... *Décharges à travers les gaz. – Rayons cathodiques. – Rayons X. – Électricité atmosphérique. – Paratonnerre* ».

Les programmes subissent de faibles retouches en 1912, en 1925 (où par exemple, l'étude du condensateur passe de 1^{re} en terminale), en 1931 (avec quelques allègements qui touchent peu l'électricité, si ce n'est qu'en 1^{re} le courant électrique est défini par ses effets), en 1942, 1945, et 1946. En 1947, les grandes lignes restent les mêmes, mais la présentation se veut plus moderne et plus claire. Ainsi, pour l'électricité, en terminale de Mathématiques, on a entre autres : « ... *Émissions électroniques (existence des effets thermoioniques, photoélectriques ; rayons cathodiques). Structure granulaire de l'électricité ; négaton. Rayons X. Existence de corps radioactifs. Idée d'une structure de l'atome ; numéro atomique ; définition des isotopes. Vue d'ensemble des radiations électromagnétiques.* »

À la lecture des programmes des classes de terminale (mais la remarque vaut également pour aujourd'hui) transparait la préoccupation que les élèves ne terminent pas leurs études secondaires sans avoir entrevu le savoir savant.

3. NATURE DE L'ÉLECTRICITÉ ET DISCONTINUITÉ DE LA MATIÈRE DANS LES OUVRAGES DE SCIENCES PHYSIQUES

3.1. Ouvrages généraux et manuels de 1850 à 1914 : le règne du positivisme

À la fin du siècle dernier et jusque vers 1914 les ouvrages à destination des élèves ou du grand public s'intéressent peu à la nature intime de l'électricité et ne s'interrogent pas davantage sur la constitution de la matière. Berthelot maintient la censure de l'atomistique que Dumas (1837) avait imposée avant lui dans l'enseignement français, alors que, par contre, des savants, comme Wurtz par exemple (1879), contribuent grandement au développement de la théorie atomique.

Dans son ouvrage « *Notions générales de Physique et de météorologie à l'usage de la jeunesse* » paru en 1850, Pouillet demande : « *Le mouvement de l'électricité est-il un mouvement de translation ou un mouvement de vibration ?* » (Pouillet, 1850, p. 281), et il conclut après avoir cité un certain nombre d'expériences, qu'il reste beaucoup de recherches à faire pour se rendre compte de toutes les conditions et de tous les éléments de son mouvement de vibration. De même Rambosson dans « *La science populaire ou revue des connaissances et de leurs applications aux arts et à l'industrie* » paru en 1863 indique : « *L'espèce d'électricité que l'on communique à un corps dépend non seulement du corps frottant, mais aussi de l'état de surface du corps frotté. On peut, par exemple, donner à une tige même de verre les deux électricités [vitreuse et résineuse] à la fois ; il suffit pour cela qu'elle soit polie par l'une de ses extrémités et dépolie par l'autre. Naturellement, on est porté à se demander pourquoi dans tel cas c'est l'une des électricités qui se développe plutôt que l'autre ; mais la science n'est pas encore assez avancée pour résoudre cette question.* » (Rambosson, 1863, p. 126).

En 1867, Daguin publie le troisième tome, consacré à l'électricité, de son « *Traité de Physique* ». Il présente de façon assez détaillée les théories de Franklin et de Symmer, avouant une préférence pour cette dernière car : « *On doit la considérer comme formant un jalon sur le chemin qui doit conduire plus tard à la découverte de la cause première ; il faudra un jour renoncer à l'idée des fluides, mais le mode d'action de la cause réelle devra être, sans doute, toujours interprété de la même manière, car les choses se passent comme s'ils existaient.*

Aujourd'hui, on cherche à rattacher les actions électriques à des mouvements particuliers de l'éther, et à rapprocher ainsi les phénomènes

de l'électricité, de ceux de la chaleur et de la lumière. Nous verrons, en effet, qu'il y a de nombreux points de contact entre ces divers ordres de phénomènes ; mais la science, à ce sujet, ne présente encore, pour ainsi dire que des pressentiments, et l'on n'est pas encore parvenu à lier par cette nouvelle théorie l'ensemble des phénomènes électriques. » (Daguin, 1867, p. 103).

Ce n'est qu'à la fin de la présentation de ses « *Recherches sur l'Électricité* » publiées en 1883 que Planté consacre quelques pages aux « *Analogies entre les phénomènes électriques et les effets produits par des actions mécaniques. Conséquences relatives à la nature de l'électricité.* » Il termine ainsi : « *Pour résumer en quelques mots les vues exposées ci-dessus, nous pensons que l'électricité peut-être considérée comme un mouvement de la matière pondérable - mouvement de transport d'une très petite masse de matière animée d'une très grande vitesse, s'il s'agit de la décharge électrique, - et mouvement vibratoire très rapide des molécules de la matière, s'il s'agit de sa transmission à distance sous la forme dynamique ou de sa manifestation sous la forme statique à la surface des corps.* » (Planté, 1883, p. 314). Quant à Pécheux dans son « *Précis de Physique Industrielle* » de 1899, il affirme : « *Il n'y a qu'une seule espèce d'électricité. L'électricité étant une forme spéciale de l'énergie, se manifestant par divers phénomènes ayant entre eux une grande analogie, il n'y a pas et il ne peut y avoir deux sortes d'électricité. Les désignations toujours admises d'électricité positive et d'électricité négative ne peuvent servir qu'à indiquer deux modes d'électrisation différents, mais non deux espèces différentes d'électricité.* » (Pécheux, 1899, p. 380).

Ce à quoi les auteurs préfèrent s'atteler, c'est à une description phénoménologique et mathématique des phénomènes électriques et de leurs applications. Un des ouvrages les plus achevés dans ce sens est celui de Fernet : « *Précis de Physique* », dont la 28^e édition (1905) passe en revue, sur plus de 100 pages denses, tous les phénomènes connus à l'époque (du pouvoir des pointes aux rayons cathodiques et aux rayons X ou à la télégraphie sans fil) en ne s'interrogeant jamais sur la nature physique de l'électricité. Il pose simplement : « *Par définition, la quantité d'électricité ou masse électrique d'un élément électrisé est considérée comme proportionnelle à la force qu'il exerce, à une distance déterminée, sur un autre élément dont la charge reste constante* » (Fernet, 1905, p. 253). Ce sera encore le cas en 1913, dans un ouvrage, conforme au programme de 1912, publié sous sa direction par Faivre-Dupaigre & Carimey et destiné aux élèves des classes de première C et D.

Ainsi, dans les ouvrages d'électricité, ou dans les parties correspondantes des manuels scolaires, la question de la nature du courant électrique n'est que très peu abordée. C'est la description minutieuse de

phénomènes, d'appareils, ou la présentation de quelques lois (Ohm, Joule, etc.) qui est privilégiée.

L'explication de cette attitude, caractéristique du positivisme ambiant, se trouve dans l'ouvrage de Métral « *Cours de Physique pour l'Enseignement Primaire Supérieur* », lorsqu'il propose un paragraphe « *Hypothèses sur la nature de l'électricité* » dans lequel il indique : « *Bien des hypothèses ont été faites sur la nature de l'électricité ; la plus répandue est celle des deux fluides, due à Symmer, dans laquelle on admet l'existence de deux fluides impondérables : le fluide positif et le fluide négatif ; ces fluides sont susceptibles de s'associer pour en faire un troisième, le fluide neutre. Celui-ci existe, en quantité indéfinie, sur les corps à l'état neutre, et le frottement aurait pour effet de séparer les deux fluides dont la combinaison forme le fluide neutre. Cette hypothèse est inutile, et il vaut mieux s'en passer. Elle est d'ailleurs, peu vraisemblable. Il est probable que les deux espèces d'électricité, que nous constatons sont deux effets particuliers d'une même cause que nous ne connaissons pas. On pense, généralement, aujourd'hui, que l'électrisation d'un corps conducteur est une manifestation particulière de l'énergie qui est accompagnée d'une certaine modification du milieu isolant qui l'entoure : cette modification produisant les répulsions et les attractions dont nous avons parlé. Bien que la nature intime de l'électricité nous soit inconnue, nous pourrions étudier et mesurer les phénomènes électriques, et en tirer des applications. En y réfléchissant un peu, on s'aperçoit que cette force physique n'est pas plus mystérieuse que la pesanteur, qui nous paraît plus simple, parce que nous l'observons plus souvent. Quand on constate que la terre attire les corps et qu'elle les fait tomber à sa surface, on n'a pas expliqué la nature de cette attraction, ni la façon dont elle se transmet. La nature intime de la pesanteur nous est encore moins connue que celle de l'électricité.* » (Métral, 1907, p. 228).

Mais dans l'édition correspondant au programme de 1909 il mentionne : « *Quant à la nature des rayons cathodiques, il résulte, de tout ce qui précède, qu'ils sont constitués par des particules matérielles dont le poids serait environ 1/1000 du poids atomique de l'hydrogène ; on a été conduit à admettre que, sous l'action de la décharge, les molécules de gaz sont désagrégées d'une façon particulière : les particules qui en résultent sont appelées des ions (gazeux) ; ces ions, comme ceux de l'électrolyse, sont combinés à une certaine charge électrique. La charge électrique d'un ion s'appelle un électron ; elle est en quelque sorte, la plus petite quantité d'électricité qui puisse exister, une sorte d'atome électrique. On donne le nom d'ionisation à cette désagrégation des molécules matérielles. Les rayons cathodiques sont produit par les électrons négatifs.* » (Métral, 1909, p. 292). Il en est de même dans l'édition de 1908 de l'ouvrage de Lemoine & Vincent destiné aux classes de mathématiques : « *On explique les rayons cathodiques en admettant que la nature gazeuse raréfiée des tubes se*

trouve, sous l'influence de la décharge électrique, dissociée en fragments très petits électrisés, que l'on appelle les corpuscules, ou les électrons ou d'une façon plus générale, les ions etc. » (Lemoine & Vincent, 1908, p. 433). On note l'ambiguïté du langage, liée très certainement à l'attitude de J.J. Thomson.

Cette question de composants ultimes de la matière concerne également à la même époque la molécule et l'atome, dont on parle obligatoirement en chimie, mais toujours avec une prudente réserve, comme d'une fiction sans impact sur la réalité. Si Pécheux, dans son ouvrage de 1899 cité précédemment, introduit la molécule comme étant la particule de matière qui constitue une limite à la divisibilité, Métral, dans son « *Cours de Chimie* » de 1905, introduit de manière claire la distinction entre molécule et atome. Mais c'est Drincourt dans ses « *Trois années de Chimie (en un volume)* » de 1909 qui ose une comparaison pour le moins hardie : « *Pour rendre saisissable la différence assez subtile entre l'atome et la molécule, on peut emprunter une comparaison à l'ancien régime des bagnes. On sait que, autrefois, les forçats étaient enchaînés deux à deux. L'ensemble des deux forçats pouvaient se mouvoir librement, on peut dire que cet ensemble était libre. Mais chacun des deux forçats pris individuellement n'était pas libre ; il était captif par rapport à son compagnon de chaîne. L'ensemble libre des deux forçats représente une molécule ; chacun des deux forçats représente un atome.* » (Drincourt, 1909, p. 71).

3.2. Les manuels de sciences physiques de 1914 à 1947

De 1914 à 1924, les programmes et les manuels ne changent pas. Puis Bruhat, dans la 1^{re} édition de son « *Cours d'électricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique* » publié en 1924, consacre le chapitre VII aux bases expérimentales des théories modernes, avec des sous-chapitres sur l'électron, l'atome, les isotopes, les théories électroniques des métaux, les courants dans le vide, les phénomènes photoélectriques et thermoïoniques, la lampe à 3 électrodes, etc. Ensuite les cours de Bouasse & Brizard publiés en 1925, à destination des élèves de terminale « *Mathématiques* », présentent l'électron en tant que grain de matière : « *On admet que les molécules des gaz sont dissociées et que ce sont des particules extrêmement petites, les électrons, identiques dans tous les gaz qui interviennent pour former les rayons cathodiques.* » (Bouasse & Brizard, 1925, p. 347). Dans leur livre de 1^{re}, publié la même année, il n'est pas question d'électron mais d'un certain nombre d'hypothèses, notamment que les corps frottés possèdent un agent appelé électricité. Cependant, si l'on énonce des hypothèses fondamentales elles ne sont qu'une manière de nous représenter les choses. « *Il ne faut pas exagérer*

leur signification ; les choses se passent comme si ces hypothèses étaient exactes : cela ne veut nullement dire que ces hypothèses représentent la réalité. D'autres hypothèses peuvent tout aussi bien résumer les phénomènes. » (Bouasse & Brizard, 1925, p. 203).

Cependant, la même année (1925), Lemoine & Vincent dans leur « *Cours élémentaire de Physique* » à destination des classes de mathématiques gardent à l'identique leur explication corpusculaire de 1908 donnée précédemment. Par contre, dans une réédition de leur cours de 1^{re} datée aussi de 1925, ils indiquent, de façon surprenante : « *Le courant électrique qu'un générateur fait circuler dans une canalisation, qui fait résonner des sonneries, allume des lampes, fait tourner des moteurs, etc., n'est pas constitué par une circulation de matière. Nos sens ne le perçoivent pas comme un courant d'air, et sa nature nous est inconnue.* » (Lemoine & Vincent, 1925, p. 159).

En 1927, un livre de physique couvrant tout le second degré, écrit par Turpain, professeur à la faculté des Sciences de Poitiers, ne mentionne qu'une seule fois l'électron, et ce au détour de la présentation de la lampe triode : « *Il (le fonctionnement de la lampe triode) est basé sur l'effet suivant, mis en évidence par Edison en 1883 : un filament incandescent, placé dans le vide, émet des corpuscules négatifs (électrons).* » (Turpain, 1927, p. 956).

La même année paraissent des ouvrages de chimie dont les auteurs franchissent le pas de l'atomistique. Ainsi Pastouriaux & Cointet s'adressant cependant au public restreint des élèves des écoles normales : « *Une théorie célèbre, dite théorie atomique, conduit plus rapidement au même résultat mais elle repose sur des hypothèses relatives à la constitution des corps simples et composés ... En conclusion, les deux lois fondamentales de la chimie, loi des proportions définies, loi des proportions multiples, s'interprètent simplement si l'on admet l'hypothèse atomique.* » (Pastouriaux & Cointet, 1927, p. 31). De même Ponsinet indique dans la préface de son traité « *Principes de l'Électrochimie* » : « *C'est par les phénomènes électrochimiques que s'est révélée l'existence et l'importance des ions, ou particules matérielles chargées d'électricité, et, comme conséquence, ce fait capital que l'électricité, comme la matière, existe sous forme d'éléments distincts, autrement dit sous la forme atomique.* » (Ponsinet, 1927, p. 1). Il présente une théorie électronique de la valence, alors que chez E. Péchard dans un ouvrage destiné à des étudiants de première année d'Université, on trouve : « *Il n'y a pas de règles pour retenir la valence ; à l'usage on apprend facilement la valence des corps simples.* » (Péchard, 1927, p. 31).

En résumé, dans les années 25-30, l'électron corpusculaire fait une entrée assez timide dans certains manuels à l'occasion de phénomènes comme les rayons cathodiques, ou sous forme de remarques non essentielles, mais jamais comme explicatif de la nature de l'électricité ou

en préalable à l'étude des propriétés de cette dernière. Quant à la théorie atomique, ses adversaires ont rendu les armes (comme Otswald en 1913) ou sont morts (comme Berthelot en 1907 ou Duhem en 1916). Va-t-elle pour autant apparaître dans les manuels de chimie ? Pas vraiment car ces manuels restent essentiellement descriptifs des propriétés de composés minéraux ou organiques.

En 1931 on peut penser que la cause de l'électron est entendue, puisque, par exemple, dans la nouvelle édition de leur ouvrage à destination des classes de mathématiques, Lemoine & Vincent consacrent plusieurs pages aux électrons et à la structure planétaire de l'atome. Ils appellent la charge de $1,6 \times 10^{-19}$ coulombs le « grain d'électricité » ou « atome d'électricité » et « électron » le grain d'électricité négative, sans support matériel, tout en donnant la valeur de la masse de cet électron. Il est vrai que le « *Cours de Physique générale* » du Professeur Ollivier, publié en 1932 et destiné aux étudiants des facultés des Sciences, en est à présenter l'effet Compton, la mécanique ondulatoire de de Broglie, la diffraction des électrons réalisée par Davisson et Germer, les lampes thermoïoniques et l'oscillographe cathodique. Pourtant la même année (1932) Faivre-Dupaigre, Lamirand & Brizard dans leur « *Cours de Physique pour les mathématiques spéciales* » considèrent « *un courant électrique dans un conducteur comme un déplacement de masses d'électricité statique dans ce conducteur.* » (Faivre-Dupaigre et al., 1932, p. 199). Le dernier paragraphe de leur chapitre sur l'électrodynamique est intitulé : « *Nouvelle conception de la quantité d'électricité.* » On peut y lire : « *Les deux définitions qui viennent d'être données de l'intensité d'un courant, la définition électrochimique et la définition électromagnétique, envisagent simplement cette intensité comme proportionnelle à la grandeur d'un effet produit par le courant (quantité d'un électrolyte décomposée pendant l'unité de temps, ou intensité d'un champ magnétique). Comme nous l'avons dit, ces définitions ne font intervenir aucune hypothèse sur la nature de courant et ne supposent pas définie la notion de quantité d'électricité. Avec cette manière de voir, la quantité d'électricité est une grandeur qui se déduit de l'intensité du courant.* » (Faivre-Dupaigre et al., 1932, p. 202). Ils présentent plus loin la théorie des ions mais n'emploient pas le terme électron : « *Des considérations sur lesquelles nous ne pouvons insister conduisent à penser que la structure de l'électricité est granulaire, comme celle de la matière, et la charge élémentaire dont nous venons de parler serait la plus petite quantité d'électricité qui puisse exister ; cette charge serait indivisible et par suite toutes les autres en seraient des multiples entiers.* » (Faivre-Dupaigre et al., 1932, p. 212). On note le conditionnel prudent et, dans l'édition de 1932 entièrement refondue de leur « *Nouveau cours de Physique élémentaire* » à destination des classes de 1^{re}, ces mêmes auteurs (Barrée remplaçant Brizard) ne mentionnent toujours pas l'électron, alors que pour la classe « Philosophie »

dans une lecture (hors programme) sur « *Les idées modernes sur la constitution de la matière* » ils indiquent que l'hypothèse de la discontinuité de la matière « *n'est pas absurde* ».

Concernant les classes « Mathématiques », il faut attendre l'édition de 1934 pour qu'à partir d'un paragraphe intitulé : « *Idées modernes sur les charges électriques et sur le courant* », ces auteurs utilisent les électrons pour interpréter un grand nombre de phénomènes. « *L'assimilation du courant électrique au déplacement d'un agent comparable à un fluide incompressible permet de supposer une circulation de charges positives dans le sens du courant, ou de charges négatives en sens inverse, ou les deux circulations à la fois. L'intensité du courant est la somme des valeurs absolues des charges qui traversent une section du circuit en une seconde. L'étude très étendue qui a été faite de l'Électricité, en particulier les recherches sur la conductibilité des électrolytes et sur la conductibilité des gaz, ont conduit à attribuer à l'électricité, comme à la matière, une structure discontinue, granulaire, et à considérer deux sortes de grains. Les charges négatives sont, dans les idées actuelles, constituées par des corpuscules plus ténus que l'atome d'hydrogène, -le plus petit des atomes, cependant, - tous identiques quelle que soit leur origine ; ces corpuscules sont les électrons. Chacun d'eux porte la charge négative -e. Ils peuvent être libres, mais ils peuvent être également fixés à des atomes ou à des molécules neutres, formant ainsi des ions négatifs. Les charges positives sont toujours formées d'atomes qui ont perdu des électrons...* » (Favre-Dupaigre et al., 1934, p. 406).

En 1946, Favre-Dupaigre, Lamirand & Joyal dans leur « *Cours de Physique pour les mathématiques spéciales* » après avoir présenté les théories anciennes de l'électricité éprouvent le besoin de préciser : « *La théorie électronique s'appuie sur de nombreux faits démontrés et est universellement admise par tous les physiciens. Elle se rattache directement à la conception actuelle de la constitution de la matière...* » (Favre-Dupaigre et al., 1946, p. 47).

Il faut dire que le programme de seconde de chimie précise explicitement en 1945 : « *Théorie atomique ; symboles, formules, équations chimiques* » et que pour les terminales il est prévu une « *Révision de la théorie atomique et de ses conséquences ...* »

3.3. De 1947 à aujourd'hui

À partir de 1947, les programmes de terminale mentionnant en physique : « *Émission électroniques (existence des effets thermoioniques et photoélectriques ; rayons cathodiques). Structure granulaire de*

l'électricité ; négaton. ... Idée d'une structure de l'atome ... », les ouvrages se conformant à ces programmes, comme celui d'Eurin & Guimiot, consacrent un chapitre entier au négaton. On peut citer : « *Les rayons cathodiques sont constitués par des négatons, particules élémentaires d'électricité négative de charge -e* » (Eurin & Guimiot, 1947, p. 146) ou « *Un courant électrique dans un conducteur est constitué par un courant de négatons circulant en sens opposé.* » (Eurin & Guimiot, 1947, p. 146). Dans l'ouvrage d'Ève, qui introduit en outre la structure du noyau, il est précisé que le terme négaton est employé à la place d'électron négatif car : « *On a récemment découvert l'existence de l'électron positif ou positon ...* » (Ève, 1947, p. 445).

Il est intéressant de noter que les instructions du 20 juin 1947 sur l'interprétation des programmes de sciences physiques des classes terminales du second degré, reproduites dans l'ouvrage de Dumesnil & Lifermann, ne considèrent finalement ce programme que comme un programme de 1902 étoffé : « *En physique, avec quelques notions générales de dynamique et d'énergétique, nous retrouvons, comme en 1902, une étude assez complète, bien qu'élémentaire, des phénomènes périodiques s'étendant aux divers domaines : acoustique, optique et électricité. Quelques compléments relatifs aux émissions électroniques, aux substances radioactives, à la structure de l'atome donneront aux élèves une idée des récents progrès de la science [...] L'exposé concernant le chapitre « émissions électroniques » sera très léger et réduit aux résultats essentiels ; une expérience convenablement choisie mettra en évidence l'existence des effets thermoïoniques, une autre celle des effets photoélectriques ; d'autres permettront d'observer les propriétés marquantes des rayons cathodiques et c'est dans leur interprétation que le maître sera conduit à parler de la structure granulaire de l'électricité et du négaton.* » (Dumesnil & Lifermann, 1947, p. 3).

Les programmes de 1956 et de 1959 ne modifient que très peu les programmes de 1945, 1947. En 1962 le programme de la classe « Philosophie » n'a pas changé et garde le terme de négaton alors qu'en 1^{re} A, B, C et M apparaît l'électron : « *Idée de la nature du courant électrique dans les conducteurs métalliques et dans les électrolytes. Étude quantitative de l'électrolyse ; quantité d'électricité ; intensité du courant, coulomb ; ampère ; valeur en coulomb de la charge de l'électron* ». En terminale « Mathématiques » le programme indique : « *Effet thermoélectronique ; diode. Effet photoélectrique (en se limitant à l'émission d'électrons par un métal pur dans le vide) ; interprétation. Accélération des électrons par un champ électrique. Rayons cathodiques (faisceau d'électrons)* ».

C'est dans la circulaire du 9 juin 1965, que l'électron apparaît dans les programmes de seconde, à la fois en physique et en chimie à travers le

même paragraphe : « *Les constituants de la matière : atomes, molécules, ions, électrons ; notions succinctes sur la constitution des divers états de la matière⁽¹⁾.* » Le (1) renvoyant, aussi bien dans le programme de physique que dans celui de chimie, à une note de bas de page indiquant que « *La question définie par cet alinéa pourra être traitée en physique ou en chimie* ».

Une dizaine d'années après, on n'en est plus aux idées succinctes. D'une part, dans le programme de la classe de 4^e de 1978, proposé par la Commission ministérielle de réforme de l'enseignement des sciences physiques, connue sous le nom de Commission Lagarrigue (du nom de son premier président), on trouve une section « *Structure atomique des métaux* » dans laquelle il est clairement indiqué : « *2.2. Interprétation électronique du courant électrique dans un métal ; sens de déplacement des électrons et sens conventionnel du courant, rôle du générateur* ». Ainsi la physique microscopique occupe dès le collège une place de choix et surtout le courant électrique est défini comme un flux d'électrons alors que précédemment il était défini par ses effets. D'autre part, en 1978, dans l'avant-propos de leur « *Initiation à la chimie moderne* » destinée au classe de 2^de ACT, les auteurs (Cros, Moreau & Praud) indiquent que la structure de l'atome a été entièrement repensée : « *Nous avons voulu introduire les notions de probabilité de présence des électrons - sur le plan uniquement qualitatif- et de niveau d'énergie. Pour cela, il était nécessaire d'abandonner le modèle simpliste qui invite l'élève à confondre la couche avec une trajectoire bien déterminée (circulaire !)* » (Cros et al., 1978, p. 4). Quant aux programmes de terminale, ils contiennent depuis 1979 une partie spécifique « *Physique atomique et nucléaire* ».

En 1992, le programme d'électricité de la classe de 4^e revient à une « *entrée électrostatique* » qui avait été abandonnée depuis 1925, à savoir une triple introduction par la charge, le déplacement des charges et le circuit fermé (Fréchengues & Dusseau, 1996).

Actuellement, le retour à une introduction de l'électricité par le potentiel, l'intensité et la résistance, initiée en 1978, structure les programmes des classes de 5^e et 4^e, et le début de celui de la classe de 3^e. Ainsi, les concepts de « *porteurs de charge* » et de charge ne sont plus déduits en 4^e de la connaissance de la structure de la matière laquelle est abordée seulement en 3^e.

4. COMMENTAIRES

On peut, à travers ce panorama, distinguer quatre périodes :

– jusque vers 1925, le terme électron n'apparaît que de manière fortuite dans les ouvrages scolaires, en tant que charge élémentaire

d'électricité, et les atomes ne sont considérés que comme des symboles facilitant l'écriture des réactions chimiques ;

– de 1925 à 1935, l'électron apparaît en physique comme un corpuscule et certains auteurs donnent une interprétation électronique de tous les phénomènes impliquant l'électron, alors que d'autres en parlent sans trop s'engager ; dans cette même période l'atome devient en chimie une hypothèse vraisemblable ;

– de 1935 à 1945, tous les ouvrages mentionnent l'électron, mais certains avec beaucoup plus de réserves que d'autres ; de plus en plus d'ouvrages de chimie présentent la structure de l'atome ;

– enfin, après 1945, l'introduction de l'électron dans les programmes officiels impose d'en parler.

Mais certains ouvrages, par exemple celui de chimie de Lamirand & Joyal à destination des élèves de terminale, publié en 1951 (soit six ans après Hiroshima), et dans lequel un chapitre complet est consacré à présenter une structure assez détaillée de l'atome, emploient encore le mot hypothèse : « *La théorie atomique repose sur trois hypothèses fondamentales* :

- *l'hypothèse moléculaire* ;
- *l'hypothèse d'Avogadro* ;
- *l'hypothèse atomique*. » (Lamirand & Joyal, 1951, p. 13).

Dans ce cas, il ne semble pas y avoir tellement de différences avec le cours de chimie de Métral de 1907. À moins qu'il ne s'agisse d'une confusion récurrente de formulation, volontaire ou non, avec le concept de modèle. Pourtant, au niveau de la recherche, L. Poincaré, indique dès 1908 : « *...divers physiciens, M. Langevin par exemple, demandent que l'on fasse passer les atomes du rang des hypothèses à celui des principes* » (Poincaré, 1908, p. 93), au niveau de l'enseignement. Le même Langevin, cité par Hulin, insiste déjà dès 1904 sur l'intérêt pédagogique de ces idées : « *Il suffit, d'ailleurs, de voir avec quelle avidité de bon aloi les élèves assimilent les quelques indications bien vagues que l'on peut se permettre à ce sujet [les idées atomistiques], où ils trouvent avec joie le support qui leur manque, pour être convaincus qu'on se prive volontairement dans l'enseignement secondaire d'un levier bien puissant, par un scrupule de rigueur tout à fait exagéré, et par suite du discrédit injuste dans lequel ces hypothèses sont tombées* ». (Langevin, cité par Hulin, 1996, p. 114).

Est-ce vraiment un scrupule de rigueur qui explique que cette introduction de concepts de la physique moderne, notamment l'électron, se soit faite si lentement dans l'enseignement secondaire ? Nous écartons l'hypothèse d'un savoir non vraiment légitimé (tout au moins à partir de

1913) par la communauté scientifique. Nous écartons aussi des arguments comme ceux avancés par Mlle Mourgues, une des fondatrices de « l'Union Des Physiciens », citée par Bensaude-Vincent : « *Nos élèves n'ont que 18 ans. Est-il raisonnable de donner pour but à leurs recherches la constitution intime de la matière ? N'y a-t-il pas un danger très grand à leur faire voir la vie au-delà de nos sens, même armés d'un puissant microscope ? Ont-ils assez de santé physique et morale pour supporter mieux que Pascal ce tête-à-tête avec l'Inconnu ?* » (Mourgues, citée par Bensaude-Vincent, 1987, p. 56).

4.1. Ignorance du concept

C'est l'explication la moins probable. En 1934 est parue, à la librairie Larousse, une sorte d'encyclopédie des sciences intitulée « *La Science, ses progrès, ses applications* » dans le tome second de laquelle, au chapitre IV sur « *Les Théories électroniques* », l'auteur, M. Boll, parle de la déchéance du « fluide » électrique : « *Sur la foi de vulgarisateurs incompetents, qui « retardent » d'un quart de siècle, beaucoup d'esprit distingués répètent que « l'électricité est un fluide mystérieux ». Cependant, dans le langage scientifique, le mot « fluide » n'est plus employé que pour désigner les liquides et le gaz, c'est-à-dire les substances qui n'ont pas de forme propre. Et, d'autre part, l'électricité n'est pas plus mystérieuse que la matière ou la chaleur ; elle est, à coup sûr, bien moins mystérieuse que la lumière, pour laquelle ces mêmes esprits invoquent, constamment et à tort, « l'éther », hypothèse périmée.* » (Boll, 1934, p. 377).

Qui peuvent être ces vulgarisateurs incompetents ? Ce ne sont pas des savants comme Boutaric qui, à la même période, fait paraître : « *La Physique Moderne et l'Électron* », ou Millikan dont la traduction de la deuxième édition (datant de 1924) de son ouvrage « *L'électron* » paraît en 1926. Dès 1913, Guilleminot dans « *Les nouveaux horizons de la science* » introduit l'électron pour expliquer « *Qu'est ce que l'électricité ?* », « *Comment la notion d'électron explique le magnétisme de la matière* » ou l'effet photoélectrique.

S'il est déjà peu plausible que ces auteurs n'aient pas été lus par les rédacteurs des manuels, il serait surprenant que « *La Physique Moderne, son évolution* » due à un Inspecteur Général de l'Instruction Publique, L. Poincaré, ne l'ait pas été, d'autant plus que ce dernier a été membre de la sous-commission des sciences physiques pour la réforme des programmes de 1902. Or cet ouvrage date de 1908 et on y trouve entre autres : « *L'idée que la conductibilité des métaux n'est pas essentiellement différente de celle des liquides électrolytiques ou des gaz, en ce sens que le passage du courant est lié au transport de petites particules électrisées,*

remonte déjà loin ; elle a été énoncée par Weber, développée ensuite par Giese, mais elle n'a vraiment pris son véritable sens qu'à la suite des découvertes récentes ; ce sont les travaux de Riecke, puis de Drude, et surtout de J.J. Thomson, qui ont permis de lui donner une forme acceptable ; tous ces essais se rattachent, d'ailleurs, à la théorie générale de Lorentz, que l'on étudiera plus loin. » (Poincaré, 1908, p. 242).

Il cite les propos de Lodge de 1902, publiés en français en 1906 : « *Les métaux sont des corps tels que le transport d'un électron d'un atome à l'autre est facile et n'exige aucune force...* » (Lodge, 1906, p. 81).

Autrement dit on ne peut invoquer la méconnaissance du concept d'autant plus que même les professeurs de base sont informés des développements de la science. En effet si l'on consulte le « *Bulletin de l'Union des Physiciens* », créé en 1906 en vue de constituer pour les professeurs français de sciences physiques un moyen d'être insérés dans un réseau d'échanges professionnels, dès les numéros de 1910 apparaissent des demandes de documentation relatives aux rayons X, aux rayons cathodiques, à la radioactivité, aux travaux d'Einstein et de Planck. Une réponse parue dans le n° 41 de mars 1911 cite la traduction de l'ouvrage de Righi : « *La théorie moderne des phénomènes physiques : radioactivité, ions, électrons* ».

En 1915, L. Brillouin, dans un article paru dans le n° 83 sur les « *Mouvements de rotation. Quantité de mouvement* », indique : « *Tels sont les courants circulaires atomiques de la théorie d'Ampère et de Wéber ou les circulations de chaînes d'électrons qui les remplacent dans les formes plus modernes de cette théorie* » (Brillouin, 1915, p. 120). Par la suite ce sont surtout les discussions sur l'introduction du potentiel et des polémiques extrêmement virulentes sur la relativité qui passionneront les lecteurs et auteurs des articles. L'électron s'est introduit naturellement. Et lorsque Déverin publie dans le numéro 118-119 de décembre 1918-janvier 1919, un article « *Sur la théorie des piles électriques* » en faisant appel à la théorie des ions mais sans jamais parler d'électron, il provoque la remarque suivante d'un lecteur - qui signe simplement S. - publiée 6 mois plus tard (p. 151) : « *... Et l'on peut se demander si le courant des électrons négatifs qui ferment le circuit dans le vide ne détrônera pas un jour la théorie des ions, ou du moins ne la modifiera pas profondément ...* »

Enfin dans une note de lecture sur « *L'électron* » de Millikan parue dans le n° 197-198 de novembre-décembre 1926, celui qui a effectué la recension, Delvalez, commence ainsi : « *J'ai eu l'occasion récemment de lire et de relire cet excellent livre ; et je serais bien aise si les notes suivantes pouvaient en donner une idée convenable, et engager les professeurs à en faire l'acquisition pour eux-mêmes ou les bibliothèques des lycées et des collèges ...* » (Delvalez, 1926, p. 77).

4.2. Inutilité du concept

Les conseils généraux du programme de seconde de 1902, auxquels il est fait référence pour les autres classes, sont explicites : « ...*Le but n'est pas de faire de nos élèves des physiciens de profession, mais de leur faire connaître les grandes lois de la Nature et de les mettre à même de se rendre compte de ce qui se passe autour d'eux ; dans cette vue l'enseignement doit être à la fois très élevé, très simple et très pratique. Évitant les développements mathématiques, il doit toujours être fondé sur des expériences...* » (p. 822). Ceci traduit d'une part le clivage très fort qui existe alors entre les physiciens, expérimentateurs par définition, et les mathématiciens, catégorie qui englobe les physiciens théoriciens, et d'autre part le positivisme des savants français de l'époque. En effet pour Comte, le mot « positif » désigne d'abord le réel par opposition au chimérique. Et les savants français comme Berthelot, qui attendent des expériences positives, vont privilégier le fait et la méthode expérimentale, par rapport aux hypothèses. Outre ce positivisme fortement prégnant qui vise à rejeter tout modèle sous-jacent à la réalité observable, l'inductivisme est toujours la méthode officielle de présentation de la science. L'introduction des exercices pratiques dans la réforme de 1902 vise à initier l'élève à une démarche expérimentale, et renforce le caractère inductiviste de l'enseignement. Ceci perdure puisque, en 1947, les instructions officielles concernant la physique précisent : « *Bien entendu, il n'est pas interdit au professeur d'employer à l'occasion, au lieu de la méthode inductive, la méthode déductive qui est particulièrement rapide, simple et claire et d'expliquer alors les faits à partir d'un principe posé à l'avance, mais à condition d'avoir montré aux élèves tout ce que ce procédé a d'artificiel du point de vue de l'édification de la Science. Nos jeunes gens ne doivent pas oublier que la Science s'est faite lentement au cours des siècles, que sa construction a exigé des efforts multiples, qu'elle s'est accompagnée de bien des tâtonnements et a subi de nombreux échecs avant d'atteindre sa forme actuelle qui ne saurait être définitive.* » (Dumesnil & Lifermann, 1947, p. 5).

Il est intéressant de rapprocher ces instructions de celles, visiblement rédigées par un autre auteur, qui concernent la chimie en classe terminale, publiées le même jour (20 juin 1947) et reproduites dans l'ouvrage de Lamirand & Joyal : « ...*Dans son exposé, le professeur abandonnera délibérément la méthode historique de présentation et prendra pour base la théorie atomique qu'il esquissera à grands traits, se réservant de revenir en fin d'année, après l'étude des rayonnements et des substances radioactives, sur la constitution de l'édifice atomique. Ce procédé est peut-être dogmatique, mais il est particulièrement simple, rapide et il donne aux*

lois générales (Lavoisier, Dalton, Proust...) un caractère d'évidence qui fait que les élèves les retiennent sans aucune peine. » (Lamirand & Joyal, 1947, p. 3).

Il a donc fallu 50 ans pour que l'électron apparaisse dans les programmes officiels car le caractère expérimental sans cesse réaffirmé, et encore jusqu'à aujourd'hui, des sciences physiques renforçait la notion de vérité positive, c'est-à-dire celle du fait expérimentalement constaté. Or à quoi bon parler de la nature de l'électricité si l'on est capable de rendre compte, par des lois simples, des mesures effectuées, ou mieux encore, si à partir des mesures, on est capable d'en induire des lois explicatives.

Une fois le barrage antiatomiste rompu, le concept d'électron s'est imposé en chimie car il permettait d'expliquer, de manière simple et auto-cohérente, de plus en plus de propriétés dues au caractère électronique de la liaison chimique. La logique déductive a pris le pas sur l'inductivisme par sa facilité pédagogique d'exposition.

5. CONCLUSION

Avec l'électron, nous nous trouvons en présence d'un exemple bien particulier d'un savoir qui se développe dans la communauté scientifique tout en bouleversant la technologie, notamment à travers l'électronique naissante, sans que cela n'ait de réelles répercussions sur l'enseignement secondaire. Au delà des explications fournies précédemment, on peut également interpréter le décalage observé en considérant que les contenus d'enseignement sont aussi le fruit d'une demande sociale. En 1902 les finalités de l'enseignement secondaire sont d'ordre culturel, comme le précisent les conseils généraux des programmes de physique-chimie, que nous avons rappelés au début du paragraphe 4.2., et dans cette réalité observable, on ne « voit » pas les électrons. Ces humanités scientifiques se veulent paradoxalement à la fois désintéressées et extrêmement concrètes. Après la seconde guerre mondiale, l'importance toujours croissante de la science et de la technologie dans la société, se traduit d'une part par une forte demande en ingénieurs et en techniciens, et d'autre part corrélativement, dans une frange de plus en plus importante de la population, par le besoin d'une plus grande intelligibilité du monde qui nous entoure. Cette double exigence impose à l'enseignement des sciences physiques de coller au plus près à la production de connaissances scientifiques en allant au delà de la simple mise en relation des faits.

BIBLIOGRAPHIE

- BELHOSTE B. (1996). Réformer ou conserver ? La place des sciences dans les transformations de l'enseignement secondaire en France (1900-1970). In B. Belhoste, H. Gispert & N. Hulin (Éds), *Les sciences au lycée*. Paris, Vuibert et INRP, pp. 27-38.
- BENSAUDE-VINCENT B. (1987). *Langevin*. Paris, Belin.
- BOLL M. (1934). Les théories électroniques. In G. Urbain & M. Boll (Éds), *La Science, ses progrès, ses applications. Tome 2 : Les applications et les théories actuelles*. Paris, Larousse, pp. 377-395.
- BOUASSE H. & BRIZARD L. (1925). *Physique (Classe de première)*. Paris, Delagrave.
- BOUTARIC M.-A. (1935). *La Physique moderne et l'Électron*. Paris, Alcan.
- BRILLOUIN L. (1915). Mouvements de rotation. Quantités de mouvements. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 83, pp. 120-121.
- BRUHAT G. (1924). *Cours d'électricité à l'usage de l'enseignement supérieur scientifique et technique*. Paris, Masson.
- CROS A., MOREAU C., PRAUD B. & L. (1978). *Initiation à la chimie moderne (2nde ACT)*. Paris, Belin.
- DAGUIN P.-A. (1867). *Traité élémentaire de Physique théorique et expérimentale avec les applications à la météorologie et aux arts industriels*. Paris, Delagrave.
- DELVALEZ G. (1926). L'électron de R.A. Millikan. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 197-198, pp. 77-78.
- DRINCOURT E. (1909). *Trois années de Chimie (en un volume)*. Paris, Colin.
- DUMESNIL G. & LIFERMANN J. (1948). *Physique (Classes de mathématiques élémentaires et sciences expérimentales)*. Paris, ISTR.
- DUMAS J.-B. (1837). *Leçons sur la philosophie chimique*. Paris, Éditions Culture et Civilisation.
- EURIN M. & GUIMIOT H. (1947). *Sciences Physiques (classe de philosophie)*. Paris, Hachette.
- ÈVE G. (1947). *Physique (classes de mathématiques et sciences expérimentales)*. Paris, Magnard.
- FAIVRE-DUPAIGRE J. & CARIMEY E. (1913). *Nouveau cours de Physique élémentaire (classe de première)*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & BRIZARD L. (1932). *Nouveau cours de Physique élémentaire (classe de première)*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & BARRÉE M. (1932). *Cours de Physique pour les classes de mathématiques spéciales*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & BARRÉE M. (1934). *Nouveau cours de Physique élémentaire (classe de mathématiques)*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & JOYAL M. (1946). *Cours de Physique pour les classes de mathématiques spéciales ; tome III : Électricité*. Paris, Masson.
- FERNET E. en collaboration avec FAIVRE-DUPAIGRE J. (1905). *Précis de Physique*. Paris, Masson.
- FRÉCHENGUES P. & DUSSEAU J.-M. (1996). Les programmes actuels d'électricité en classes de quatrième, troisième et seconde analysés dans une perspective historique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 90, n° 788, pp. 1615-1626.
- FRÉCHENGUES P. & DUSSEAU J.-M. (1998). Bref historique de l'émergence du concept d'électron, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 92, n° 808, pp. 1573-1588.
- GUILLEMINOT H. (1913). *Les nouveaux horizons de la science, Tome deuxième : l'électricité, les radiations, l'éther, origine et fin de la matière*. Paris, Steinheil.

- HULIN N. (1984). Science qui se fait, science qui s'enseigne. *Histoire de l'Éducation*, n° 21, pp. 37-58.
- HULIN N. (1996). Constitution de la Physique moderne. In B. Belhoste, H. Gispert & N. Hulin (Éds), *Les sciences au lycée*. Paris, Vuibert et INRP, pp. 55-68.
- LAMIRAND J. & JOYAL M. (1951). *Chimie (classes de mathématiques et sciences expérimentales)*. Paris, Masson.
- LELONG B. (1997). Paul Villard, J.J. Thompson et la composition des rayons cathodiques. *Revue d'Histoire des Sciences*, tome 50, n° 1/2, pp. 91-130.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1908). *Cours élémentaire de Physique (classe de mathématiques)*. Paris, Belin.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1925). *Cours élémentaire de Physique (classe de mathématiques)*. Paris, Belin.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1925). *Cours élémentaire de Physique (classe de première)*. Paris, Belin.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1931). *Cours élémentaire de Physique (classe de mathématiques)*. Paris, Belin.
- LODGE O. (1906). *Sur les électrons. Conférence faite à l'Institution of Electrical Engineers le 5/11/1902*. Paris, Gauthier-Villars.
- MÉTRAL P. (1907). *Cours de Chimie*. Paris, Masson.
- MÉTRAL P. (1907). *Cours de Physique pour l'enseignement primaire supérieur*. Paris, Masson.
- MÉTRAL P. (1909). *Cours de Physique pour les écoles primaires supérieures de garçons*. Paris, Masson.
- MILLIKAN R.A. (1926). *L'électron*. Paris, Alcan.
- OLLIVIER H. (1932). *Cours de Physique générale à l'usage des élèves des facultés des sciences*. Paris, Hermann.
- PASTOURIAUX L. & COINTET A. (1925). *Chimie, 2ème année d'École Normale*. Paris, Delagrave.
- POINCARÉ L. (1908). *La Physique moderne, son évolution*. Paris, Flammarion.
- PÉCHARD E. (1926). *Chimie élémentaire PCN*. Paris, Gautier-Villars.
- PÉCHEUX H. (1899). *Précis de Physique industrielle*. Paris, Baillière.
- PLANTÉ G. (1883). *Recherches sur l'Électricité*. Paris, La Lumière Électrique.
- PONSINET J. (1927). *Principes de l'électrochimie*. Paris, Colin.
- POUILLET M. (1850). *Notions générales de Physique et de météorologie à l'usage de la jeunesse*. Paris, Béchet Jeune.
- RAMBOSSON M.-J. (1863). *La science populaire ou revue du progrès des connaissances et de leurs applications aux arts et à l'industrie*. Paris, Lacroix.
- TURPAIN A. (1927). *Physique à l'usage des élèves des classes de seconde et première C et D et Mathématiques A et B*. Paris, Vuibert.
- WURTZ A. (1879). *La théorie atomique*. Paris, Alcan.

Cet article a été reçu le 23/10/97 et accepté le 13/05/98.

Élaboration et évaluation du contenu conceptuel d'un curriculum constructiviste concernant l'approche énergétique des phénomènes mécaniques

Design and evaluation of the content of an introductory constructivist curriculum adopting an energy approach to mechanical phenomena

Dimitris KOLIOPOULOS, Konstantinos RAVANIS

Université de Patras
Département des Sciences de l'Éducation
Section Préscolaire
Rion, Patras, 26500, Grèce.

Résumé

L'objet de ce travail est l'élaboration d'un curriculum sur l'énergie mécanique pour des élèves de 13-14 ans, qui s'inscrit dans une perspective de rénovation des programmes. Cette proposition concerne l'intégration de l'aspect constructiviste dans l'organisation et le contenu du curriculum lui-même. Sur la base de principes argumentés, en particulier la prise en compte des représentations des élèves (point d'appui pour une évolution), un travail

sur les systèmes symboliques et la proposition de « germes de modèle », une organisation temporelle de l'introduction de différents concepts associés à celui d'énergie est proposée, en indiquant les situations physiques qui paraissent les plus appropriées. À partir de cette proposition curriculaire, des séquences de classe ont été mises en oeuvre qui ont donné lieu à une évaluation de la validité du curriculum. Les résultats de cette évaluation par pré-test et post-test réalisés auprès d'une centaine d'élèves sont présentés dans cet article.

Mots clés : didactique de la physique, constructivisme, curriculum, énergie, conceptions d'élèves.

Abstract

This work aims at constructing a curriculum concerning mechanical energy. The objective of this curriculum is to reconstruct a new one for students aged 13-14. Our project incorporates a constructivist aspect in the organisation and content of the curriculum itself. This work is based on a series of argumentative principles, especially on the attempt of transforming the students representations, as well as on a work which used symbolic systems and the introduction of a « model-sperm ». Additionally, we put forward the time-sequence for the introduction of different concepts related to that of energy, using suitable real physical situations. Based on this suggested curriculum, certain teaching activities took place in the classroom, which allowed the evaluation of the validity of this curriculum. The results of this evaluation, which was carried out by giving a pre- and a post-test to 100 students, are also presented in this paper.

Key words : physics education, constructivism, curriculum, energy, pupils' conceptions.

Resumen

El objeto de este trabajo es la elaboración de un curriculum sobre la energía mecánica para alumnos de 13-14 años, el mismo se inscribe dentro de una perspectiva de renovación de programas. Esta proposición concierne la integración del aspecto constructivista en la organización y el contenido del curriculum. Sobre la base de principios argumentados, en particular la toma en cuenta de las representaciones de los alumnos (punto de apoyo para una evolución), se propone un trabajo sobre los sistemas simbólicos y la proposición de « gérmenes de modelo », así como una organización temporal de la introducción de diferentes conceptos asociados a aquel de la energía, indicando las situaciones físicas que parecen más apropiadas. A partir de esta proposición curricular, unas secuencias de clase fueron

ejecutadas dando lugar a una evaluación de la validez del curriculum. En este artículo presentamos los resultados de esta evaluación obtenidos de la aplicación de un pre-test y post-test a un centenar de alumnos.

Palabras claves : *didáctica de la física, constructivismo, curriculum, energía, concepciones de los alumnos.*

1. PROBLÉMATIQUE

Ces vingt dernières années, l'approche constructiviste de l'enseignement a constitué une importante ligne de recherche dans le domaine de la didactique des sciences physiques. Parmi ces travaux la recherche relative à l'élaboration et à l'évaluation de programmes d'enseignement concernant l'apprentissage du concept d'énergie occupe une place importante. En effet, ce concept présente des intérêts scientifique et social indéniables. Parallèlement, les chercheurs en didactique des sciences physiques ont souligné l'intérêt que présente l'enseignement et/ou l'apprentissage d'un concept aussi abstrait et mathématisé dans l'enseignement obligatoire des sciences physiques (Driver & Millar, 1985 ; Koliopoulos & Tiberghien, 1986 ; Duit & Haeussler, 1994). Dans cet article nous tentons d'élargir la problématique constructiviste en l'utilisant dans l'élaboration des contenus à enseigner à l'échelle du curriculum et en soutenant que les principes du constructivisme peuvent être appliqués de façon à ce que l'appropriation de grands ensembles de connaissances soit possible.

Le **tableau 1** regroupe quelques-unes des recherches essentielles se référant à des interventions didactiques du type constructiviste, ayant pour but l'apprentissage de l'énergie, dans le cadre de programmes d'enseignement qui mettent en valeur l'approche conceptuelle du contenu. Ces recherches concernent des élèves de 12 à 17 ans et, dans la plupart des cas, le programme d'enseignement se veut introductif du concept initial. Une seule recherche est exclusivement consacrée à l'enseignement de l'approche énergétique des phénomènes mécaniques ; la plupart des autres envisage diverses formes d'énergie dans des situations pluri-phénoménologiques. Ces recherches concernent en général des situations d'apprentissage plus que des programmes complets d'enseignement, c'est-à-dire des séquences structurées d'unités didactiques. Actuellement, le petit nombre de recherches concernant la construction du cadre conceptuel de l'énergie d'un système mécanique semble être justifié par la faible présence, au niveau international, de l'enseignement de la mécanique à cet âge. Ceci est peut-être lié à l'image pessimiste qu'offrent les résultats des recherches antérieures, selon lesquelles un faible pourcentage d'élèves utilise des

représentations à caractère énergétique quand ils désirent décrire et/ou expliquer des phénomènes mécaniques (Solomon, 1992 ; Driver et al., 1994). Cependant, dans les programmes scolaires de certains pays, l'approche énergétique des phénomènes mécaniques est un des éléments essentiels du curriculum (servant de base à la construction de la suite du curriculum) et le problème de l'enseignement et/ou de l'apprentissage de ce concept requiert une solution satisfaisante.

Objectif didactique	Référence de base	Âge des élèves
Construction des concepts d'énergie mécanique et de travail	– Guidoni (1985)	jusqu'à 14 ans
Construction des concepts de température et de chaleur dans le cadre de la thermodynamique	– Agabra (1986)	12-17 ans
Construction de concepts d'énergie électrique, de puissance électrique et de courant électrique	– Shipstone & Gunstone (1985) – Tiberghien et al. (1989)	12-13 ans 14-15 ans
Construction des propriétés thermodynamiques du concept d'énergie ou d'éléments provenant de divers modèles de la chaîne énergétique	– CLIS Project (1987) – Tromper (1990, 1991) – Lemeignan & Weil-Barais (1990) – Tiberghien & Megalakaki (1995)	13-16 ans 14-17 ans 16-17 ans 16-17 ans
Accent sur l'élaboration des principes de conservation et de dégradation de l'énergie	– Solomon (1985) – Duit (1985)	15-17 ans 12-16 ans

Tableau 1 : Recherches concernant l'enseignement et/ou l'apprentissage du concept d'énergie dans le cadre d'une approche constructiviste

Dans cet article nous soutiendrons qu'il est possible d'élaborer un curriculum inspiré du constructivisme, initiant au concept d'énergie, et ayant pour intention de conduire les élèves entre 13 et 14 ans¹ à utiliser correctement ce concept de base dans une variété de situations mécaniques. Avant de passer aux caractéristiques et au contenu de ce programme, il faut préciser que, dans cette recherche, nous sommes proches de la position de divers chercheurs soutenant que l'étude des représentations des élèves et l'adhésion à des modèles constructivistes de l'apprentissage, ne conduisent pas obligatoirement à des modèles constructivistes d'enseignement (comme ceux où l'on propose une séquence d'activités didactiques hiérarchiquement structurées pouvant correspondre à une séquence de processus d'apprentissage – par exemple : Driver & Oldham, 1986 –), mais débouchent plutôt sur des propositions concrètes quant à la

nature et à la structure du contenu conceptuel qui est à enseigner (Millar, 1989 ; Lijnse, 1990 ; Fensham et al., 1994). Ce point de vue, qui utilise l'approche constructiviste comme référence² - contrairement à l'opinion la plus répandue selon laquelle le constructivisme propose une approche méthodologique de l'enseignement - s'accorde, d'évidence, beaucoup plus avec les caractéristiques de notre propre recherche qui se centre sur l'élaboration du contenu conceptuel plutôt que sur la méthode d'enseignement³. Dans notre cas, l'aspect constructiviste est intégré au contenu, à l'organisation, aux activités et aux questionnements du programme lui-même. Nous ne proposons rien quant aux méthodes pédagogiques car nous faisons l'hypothèse que le curriculum lui-même induira, chez les enseignants, un certain nombre de changements quant aux modalités d'enseignement/apprentissage dans un sens constructiviste.

2. LA CONSTRUCTION DU CURRICULUM

Le contenu conceptuel du curriculum proposé a été élaboré de telle façon que soient assurées, à la fois :

- sa validité épistémologique, c'est-à-dire sa conformité avec quelques conceptions épistémologiques actuelles relatives à la création (point de vue historique), au contenu scientifique et à l'application du concept d'énergie ;
- sa compatibilité psychologique avec les représentations des élèves par rapport au concept en question ;
- ainsi que sa faisabilité, c'est-à-dire sa capacité d'adaptation aux conditions réelles d'enseignement (Koliopoulos, 1997).

En tenant compte des conditions énoncées ci-dessus nous avons fait des propositions dans le cadre des buts généraux et des objectifs didactiques spécifiques du programme. Les buts généraux sont les suivants :

- insister d'abord sur l'importance de la conceptualisation des phénomènes physiques, ce qui assure la continuité de la tradition du curriculum grec au collège et permet une insertion facile de ce nouveau curriculum ;
- demander ensuite aux élèves de construire des connaissances épistémologiquement valides concernant le concept d'énergie, et plus particulièrement l'approche énergétique des phénomènes mécaniques. Pour cela nous avons décrit les changements conceptuels à effectuer. Ce deuxième but introduit une discontinuité épistémologique par rapport au programme traditionnel dans lequel est recherché le « transfert » d'un

contenu conceptuel, sans que des orientations épistémologiques et psychologiques soient explicitement exprimées (Koliopoulos et al., 1996).

À partir des buts généraux précédents nous avons formulé des objectifs didactiques spécifiques. Nous avons cherché alors à introduire le concept d'énergie en nous appuyant sur le modèle de la chaîne énergétique et en limitant le champ d'application aux phénomènes thermiques et mécaniques. Ce choix est justifié à la fois épistémologiquement, (puisqu'il apparaît comme le lieu privilégié de la conceptualisation de l'énergie), et psychologiquement (puisqu'il a été montré que chez un certain nombre d'élèves, on trouve, avant l'enseignement de l'énergie, des représentations qualifiées de « pré-énergétiques ») qui semblent être compatibles avec le modèle de la chaîne énergétique) (Lemeignan & Weil-Barais, 1994 ; Tiberghien & Mégalakaki, 1995 ; Koliopoulos, 1997). Ces représentations « pré-énergétiques » sont fondées sur l'activation du raisonnement linéaire causal « source-action-récepteur » que les élèves utilisent très souvent quand ils essaient de décrire et/ou d'expliquer le fonctionnement de certains systèmes physiques (Tiberghien, 1988 ; Psillos, 1995). Les élèves identifient spontanément un médiateur (qu'ils nomment : force, électricité, chaleur ou énergie selon les caractéristiques phénoménologiques du système physique) qui agit, ou est transféré d'un objet physique (identifié comme source de l'action) vers un objet physique (reconnu comme le récepteur de l'action). Un exemple caractéristique de cette représentation est la réponse d'un élève de 14 ans auquel on a demandé une explication commune aux trois phénomènes physiques suivants : la collision entre une bille en mouvement et une bille immobile, le fonctionnement d'un circuit électrique simple pile-ampoule, et le réchauffement d'une quantité d'eau à l'aide d'un camping-gaz : « *Mon opinion est que dans ces trois phénomènes, quelque chose s'exerce ou se transmet à autre chose. Ainsi a) dans le premier cas, une force s'exerce sur un corps, b) dans le deuxième cas, l'électricité se transmet à un corps et c) dans le troisième cas, la chaleur se transmet à un corps (la casserole transmet la chaleur au liquide). On remarque ainsi que dans les trois phénomènes, quelque chose s'exerce ou se transmet à un corps.* »

Les représentations pré-énergétiques, qui ont un caractère purement qualitatif, sont surtout présentes dans des situations dans lesquelles les phénomènes électriques et thermiques sont dominants, et rarement à l'occasion de phénomènes purement mécaniques sauf s'il s'agit de les comparer à des phénomènes électriques ou thermiques (Koliopoulos, 1997). Nous prenons comme présupposé que ces représentations pré-énergétiques sont pertinentes comme cadre initial de connaissances à partir duquel seront tentés les changements conceptuels recherchés. Par conséquent, le problème de l'élaboration du contenu du programme, quant à l'étude énergétique des phénomènes mécaniques, se pose comme un

problème de transformation des représentations pré-énergétiques des élèves en des conceptions compatibles avec le modèle de la chaîne énergétique.

Ainsi en prenant en compte d'une part les différences conceptuelles entre les représentations pré-énergétiques et le modèle de la chaîne énergétique (par exemple : le caractère qualitatif ou quantitatif des concepts et le niveau du formalisme) et d'autre part les éléments communs (par exemple : la reproduction du raisonnement linéaire causal « source-action-récepteur ») nous avons conçu le nouveau contenu du curriculum de telle manière que soient facilités :

- la mise en œuvre ou (si besoin est) la construction immédiate d'une conception pré-énergétique qui, pour les élèves, constituera le cadre initial de référence de leurs connaissances relatives à la notion d'énergie ;

- l'élaboration progressive d'une conception quantitative de l'énergie à l'aide de l'introduction d'un « germe de modèle »⁴ à savoir d'une forme première de modèle de la chaîne énergétique, de façon à ce que les conceptions pré-énergétiques qualitatives des élèves se transforment en des conceptions plus proches de la connaissance scientifique ;

- la différenciation et l'unification simultanées des concepts énergétiques qui permettent au concept d'énergie d'acquérir un caractère autonome durant son application ;

- l'élargissement progressif du champ d'application du concept afin de fixer les nouvelles représentations énergétiques.

En nous appuyant sur l'ensemble précédent de nos objectifs didactiques, nous avons établi un « noyau dur »⁵ en élaborant un certain nombre de principes généraux d'organisation concernant le contenu du nouveau curriculum. Ces principes se réfèrent à l'organisation, à la nature et au champ d'application phénoménologique du contenu.

2.1. L'organisation conceptuelle du contenu

L'organisation conceptuelle du contenu consiste d'abord à élaborer une séquence de thèmes. On commence par introduire le concept d'énergie à propos de phénomènes thermiques qui, comme nous l'avons déjà mentionné, permettent facilement l'apparition des représentations pré-énergétiques. Un premier changement conceptuel consiste à passer des représentations pré-énergétiques à la représentation symbolique en chaîne énergétique. Ensuite, on aborde les phénomènes mécaniques (et donc l'énergie mécanique et le travail) en utilisant la représentation en chaîne énergétique construite préalablement (**tableau 2**). Un autre aspect de

l'organisation conceptuelle du contenu est l'élaboration d'une séquence d'approche « qualitative-quantitative » dans laquelle les mesures et les formules mathématiques s'appuient sur la structure qualitative de la chaîne énergétique. Chaque thème comporte une organisation interne en unités conceptuelles en accord avec la suite des objectifs didactiques formulés précédemment (**tableau 2**).

A	PHÉNOMÈNES THERMIQUES ET ÉNERGIE
1	Température – Chaleur – Énergie
2	Mesure de la température
3	Mesure de la variation de l'énergie thermique
4	Pertes d'énergie
5	Comment la chaleur est-elle transférée ?
B	TRANSFORMATION DE LA CHALEUR EN TRAVAIL
6	Effets mécaniques de l'énergie thermique
C	PHÉNOMÈNES MÉCANIQUES ET ÉNERGIE
7	Quelle forme d'énergie acquiert un corps quand on lui fournit du travail ?
8	Mesure du travail
9	Mesure de la variation de l'énergie cinétique
10	De l'énergie cinétique à l'énergie potentielle

Tableau 2 : **Unités thématiques du programme constructiviste proposé**

L'organisation proposée diffère des approches stéréotypées rencontrées dans les programmes traditionnels (comme celui en vigueur en Grèce) où l'introduction et la conceptualisation de l'énergie s'appuient sur la définition mathématique du travail mécanique, que l'on commence par l'étude des phénomènes thermiques ou par celle des phénomènes mécaniques. De même, elle diffère des approches « phénoménologiques » où l'on demande aux élèves de construire des concepts énergétiques à travers l'étude systématique de situations mono ou pluri-phénoménologiques.

2.2. Le contenu conceptuel

Le contenu conceptuel est, comme nous l'avons dit, présenté sous la forme d'un modèle conceptuel que nous nommons chaîne énergétique⁶. Ce modèle fonctionne à trois niveaux.

2.2.1. Au niveau verbal qualitatif

Au niveau verbal qualitatif, l'accent est mis sur les codes de la représentation symbolique. Ce niveau verbal qualitatif peut aider à la transformation des représentations pré-énergétiques qualitatives des élèves en des représentations pré-énergétiques quantitatives, grâce à la distinction faite entre la notion d'énergie stockée, (à savoir l'énergie en tant que caractéristique d'un système physique – par exemple l'énergie cinétique et/ou potentielle –) et l'énergie transférée entre la source et le récepteur pendant la durée du phénomène (par exemple le travail). La représentation symbolique joue un rôle important dans cette distinction où les formes d'énergie stockée correspondent à des rectangles, alors que les formes d'énergie transférée correspondent aux flèches qui relient les rectangles (**voir annexe 1a**).

2.2.2. Au niveau quantitatif

À partir de mesures, les variations d'énergies stockées, notées à l'intérieur des rectangles, sont reliées numériquement aux énergies transférées, notées sur les flèches (**voir annexe 1b**). Cette relation dépend bien sûr d'une conception exprimée ou sous-entendue du principe de conservation de l'énergie.

2.2.3. Au niveau des relations entre grandeurs physiques

Il est possible de représenter les quantités d'énergie par des combinaisons d'autres grandeurs physiques (par exemple, voir en annexe 1c : $W = F.d$, entre travail, force et distance). Ces combinaisons prennent leur sens dans le cadre de la chaîne énergétique.

2.3. Le champ d'application phénoménologique

Le champ d'application phénoménologique n'apparaît pas comme un élément indépendant qui jouerait simplement le rôle de support phénoménologique, mais comme un élément intimement lié aux caractéristiques conceptuelles du modèle. Les catégories de phénomènes, considérées comme spécialement pertinentes pour l'application du modèle conceptuel proposé, font intervenir des systèmes thermodynamiques non isolés où les élèves reconnaissent facilement une source d'énergie ainsi qu'un récepteur d'énergie (par exemple : la déformation d'un ressort par un objet, ou encore le fonctionnement d'un modèle de machine thermique). Par contre, des phénomènes tels que le mouvement d'un pendule simple ou l'utilisation du plan incliné en tant que machine simple ne sont pas

	Unité	Situation problématique	Phénomènes physiques	Contenu conceptuel
1	Température-Chaleur-Énergie	Explication du réchauffement d'une quantité d'eau	Réchauffement d'une quantité d'eau à l'aide d'un camping-gaz	<ul style="list-style-type: none"> Introduction du modèle de la chaîne énergétique Différenciation des concepts de température, de chaleur et d'énergie au niveau verbal qualitatif
2	Mesure de la température	Mesure de température	Réchauffement-refroidissement d'une quantité d'eau à l'aide d'un camping-gaz	<ul style="list-style-type: none"> Application du modèle de la chaîne énergétique Introduction du concept de l'équilibre thermique
3	Mesure de la variation de l'énergie thermique	Comment mesurer l'augmentation de l'énergie thermique d'un liquide ?	Réchauffement d'une quantité d'eau à l'aide d'un camping-gaz	<ul style="list-style-type: none"> Différenciation des notions de température et d'énergie (thermique) au niveau quantitatif Renforcement de la nature quantitative de l'énergie avec l'utilisation de l'algorithme $\Delta E = mc\Delta\theta$
4	Pertes d'énergie	La chaleur fournie par le camping-gaz est-elle toujours égale à l'augmentation de l'énergie thermique de l'eau ?	Réchauffement d'une quantité d'eau à l'aide d'un camping-gaz	<ul style="list-style-type: none"> Différenciation des concepts d'énergie (thermique) et de chaleur au niveau quantitatif
5	Comment la chaleur est-elle transférée ?	Comment envisager les pertes d'énergie ?	<ul style="list-style-type: none"> Réchauffement-refroidissement d'une quantité d'eau contenue dans des récipients de matière différente Phénomènes de transfert par convection 	<ul style="list-style-type: none"> Application du modèle de la chaîne énergétique Enrichissement du concept de chaleur au moyen du mécanisme de transfert
6	Transformation de la chaleur	Description et explication des résultats mécaniques du réchauffement	<ul style="list-style-type: none"> Éjection du bouchon d'un tube à essais contenant de l'eau qui chauffe Fonctionnement d'une maquette de machine à vapeur 	<ul style="list-style-type: none"> Introduction du concept de travail, par analogie avec celui de chaleur, en tant que transfert d'énergie en signalant les différents mécanismes de transfert
7	Quelle forme d'énergie acquiert un corps quand on lui fournit du travail ?	Quelle forme d'énergie acquiert un corps quand on lui fournit du travail ?	<ul style="list-style-type: none"> Déplacement d'une voiture poussée par un homme 	<ul style="list-style-type: none"> Différenciation entre concept de travail et différentes formes d'énergie stockée (au niveau verbal /qualitatif)

8	Mesure du travail	Comment mesurer le travail ?	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement d'une voiture poussée par un homme - Fonctionnement de machines simples (levier et poulie) 	<ul style="list-style-type: none"> - Renforcement de la nature quantitative de l'énergie avec l'utilisation de l'algorithme $W=Fd$ - Différenciation des concepts de force et de travail aux niveaux verbal et symbolique et au niveau des grandeurs physiques
9	Mesure de la variation de l'énergie cinétique	Quelle est la quantité d'énergie cinétique que les corps acquièrent ?	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement d'une voiture poussée par un homme 	<ul style="list-style-type: none"> - Élaboration d'une forme simplifiée du théorème de l'énergie cinétique
10	De l'énergie cinétique à l'énergie potentielle	Les corps possèdent-ils de l'énergie quand ils ne bougent pas ?	Lancement d'une flèche au moyen d'un arc tendu	<ul style="list-style-type: none"> - Introduction à la transformation de l'énergie cinétique en énergie potentielle et vice versa

Tableau 3 : Succession des unités qui s'appuient sur le noyau dur du contenu conceptuel proposé

spécialement pertinents pour la construction du modèle « chaîne énergétique ».

Les principes précédents d'élaboration du contenu du nouveau programme concernant l'énergie se sont opérationnalisés dans une série de séquences didactiques assurant une certaine continuité avec les traditions et les exigences du programme grec en vigueur, afin d'en faciliter la faisabilité. Le **tableau 3** donne l'opérationnalisation de l'organisation conceptuelle, présentée au tableau 2. Une évaluation de la validité de cette organisation conceptuelle sera décrite au paragraphe suivant.

3. L'ÉVALUATION DE LA VALIDITE DU CURRICULUM

La question principale était de savoir si le curriculum proposé pour l'énergie mécanique conduisait un nombre significatif d'élèves à des constructions conceptuelles fonctionnelles, dans les conditions d'enseignement actuellement en vigueur et en conservant l'organisation d'une classe traditionnelle. Une forme d'évaluation expérimentale, celle du produit de l'apprentissage, a été élaborée (Niedderer et al., 1991). En effet, notre objet d'étude était l'impact du curriculum proposé ; ce sont les apprentissages produits qui en donnent une mesure. La technique utilisée fut celle du questionnaire, avant et après enseignement, avec les mêmes questions. Nous avons utilisé cette technique, courante dans les pratiques de recherche, car elle permet une comparaison des résultats sans avoir à s'assurer de l'isomorphisme (toujours problématique) des questions avant et après. Le post-test étant passé six mois après le pré-test on peut supposer que les différences mises en évidence sont liées à l'enseignement et non à un effet de mémoire. Avant l'enseignement, fondé sur le curriculum constructiviste étudié ici, les élèves avaient suivi un cours élémentaire de mécanique concernant les forces, la mesure des forces, la cinématique élémentaire. Le seul enseignement concernant l'énergie remontait à l'école élémentaire, deux ans plus tôt, et comportait des définitions qualitatives des différentes formes d'énergie, en relation avec des exemples de la vie quotidienne.

L'enquête s'adressait à des élèves de 13-14 ans. L'échantillon comprenait 118 élèves de la même école divisés en quatre groupes. Ces derniers ont répondu à cinq questions (présentées en **annexe 2**) choisies selon les trois critères suivants :

- on les rencontre souvent dans les manuels scolaires ;
- les élèves peuvent répondre en utilisant exclusivement un raisonnement énergétique ou en utilisant une approche cinématique/

potentielle, c'est-à-dire en utilisant les concepts de force, de vitesse, de distance et de temps ;

– ces questions permettent de contrôler l'acquisition, au niveau quantitatif, du modèle de la chaîne énergétique.

Il s'agit de questions à choix multiple dans lesquelles il est demandé aux élèves de comparer deux situations concernant le même phénomène physique et différant sur le plan quantitatif, c'est-à-dire que certaines grandeurs physiques (la force, l'énergie, la vitesse, etc.), prennent des valeurs différentes d'une situation physique à l'autre (Weil-Barais, 1987). Les élèves devaient justifier leur choix à chaque question.

L'analyse des données a été réalisée à deux niveaux : au niveau descriptif-quantitatif où nous avons déterminé les fréquences relatives et absolues des réponses et des justifications respectives des élèves, et au niveau qualitatif où nous avons analysé ces justifications. Notre intérêt, dans cet article, sera focalisé sur l'analyse des justifications des apprenants, analyse qui mettra en évidence les différentes représentations à propos de l'énergie. **Le tableau 4** présente une hiérarchie des catégories de justification des élèves en les reliant aux types de descripteurs utilisés. Les six catégories ont été établies par une analyse *a priori* des questions et à partir de résultats de recherches préalables (Weil-Barais, 1987). Dans ce même tableau nous donnons des réponses d'élèves illustrant chaque catégorie.

Catégorie	Analyse	Exemple
1E	Expression correcte qui comprend une description complète et lisible des éléments conceptuels de la chaîne énergétique (p.e., présentation complète des transferts et/ou transformations de l'énergie)	<i>Je pense que le ressort sera moins comprimé. Et cela parce que nous savons que $E_p = B h$. Dans le 1er cas, on a $E_p = B h$. Dans le 2ème, h ayant diminué quand h se multipliera avec B, l'énergie potentielle sera moins grande que dans le 1er cas. En ayant une énergie potentielle moins grande, moins grand sera le W donné au ressort qui sera moins comprimé.</i>
2E	Expression correcte qui comprend une description incomplète et moins lisible des éléments conceptuels de la chaîne énergétique (p.e., présentation incomplète des transferts et/ou transformations de l'énergie)	<i>La réponse juste est la b, car quand on laisse la bille tomber, son énergie potentielle se transforme en énergie cinétique. Si l'on réduit l'inclinaison de la planche, alors l'énergie cinétique se réduit et le ressort sera donc moins comprimé.</i>
3E	Utilisation incorrecte des éléments conceptuels d'approche énergétique	<i>Le ressort sera moins comprimé si la planche a une moins grande inclinaison car l'énergie potentielle (c'est-à-dire l'énergie de déformation d'un corps) dépend du poids du corps (qui est le même dans les deux cas) mais aussi de la hauteur depuis laquelle il tombe ($E_p = B h$). Ainsi la hauteur étant plus petite, l'énergie potentielle sera moindre et le ressort sera moins comprimé.</i>
C/P	Utilisation correcte ou incorrecte d'éléments conceptuels d'une approche cinématique/potentielle	<i>Le ressort sera moins comprimé car plus l'inclinaison est réduite, plus petite est la force que la bille acquiert. Dans le 1^{er} cas, le poids sera neutralisé par F mais moins que dans le 2e cas.</i>
Ph	Description en termes d'événements ou utilisation d'une simple réflexion qui comprend des éléments phénoménologiques du problème	<i>Le ressort sera moins comprimé car quand on réduit l'inclinaison de la planche se réduit également la force avec laquelle la bille tombe, c'est-à-dire sa vitesse. Et cela dépend de l'inclinaison de la planche : plus elle est raide et plus la bille prend d'élan.</i>
X	Juxtaposition ou mélange de descriptions en termes énergétiques et de descriptions en termes phénoménologiques ou d'autres cadres conceptuels	<i>Le ressort sera moins comprimé car l'inclinaison de la planche sera plus petite (réduite) et la bille tombera ainsi avec une force moins grande sur le ressort et celui-ci sera moins comprimé. C'est-à-dire que seront réduites son énergie potentielle et cinétique ($E_p = B h$).</i>

Tableau 4 : Catégories des justifications des élèves ayant répondu au questionnaire d'évaluation

L'étude des justifications des élèves au pré-test montre que, à propos des phénomènes mécaniques en question, aucun élève n'a présenté de représentation compatible avec des concepts énergétiques (des représentations pré-énergétiques par exemple) ni n'a utilisé le terme

d'énergie ou ne serait-ce qu'une des formes alternatives présentées dans la bibliographie (Driver et al., 1994). La non apparition de telles représentations est due au fait que, comme nous l'avons déjà noté, les élèves n'expriment pas spontanément de telles conceptions quand ils décrivent et/ou expliquent des phénomènes mécaniques. Il semblerait donc que l'intervention didactique devienne une condition *sine qua non* à la formation par les élèves de conceptions pré-énergétiques évoluant ensuite en conceptions énergétiques.

Le tableau 5 offre une image complète de l'analyse quantitative des résultats du post-test. Y figure l'ensemble des fréquences relatives et absolues des catégories des justifications données par les élèves à chaque question. Une sixième colonne indique le nombre d'élèves qui, dans plus de trois questions sur cinq, utilisent des justifications considérées comme liées à des conceptions énergétiques correctes (E1 et E2). Les résultats de cette colonne sont particulièrement significatifs car ils informent sur le nombre d'élèves ayant élaboré une conception énergétique plus opérationnelle, ce qui représente une preuve crédible d'un changement conceptuel efficace des élèves.

	1	2	3	4	5	1/2E>= 3
1E	28 24%	25 21%	29 25%	11 9%	31 26%	32 27%
2E	6 5%	27 23%	6 5%	0	15 13%	
3E	1	1	1	16 14%	14 12%	
C/P	0	0	1	1	0	
X	24 20%	23 19%	24 20%	23 19%	20 17%	
Ph	59 50%	41 35%	56 47%	66 56%	32 27%	
sans justification	0	1	1	1	6 5%	
TOTAL	118	118	118	118	118	

Tableau 5 : Fréquences relatives et absolues des réponses au post-test dans les catégories des justifications

D'après ce tableau, les conceptions énergétiques opérationnelles sont disponibles pour un tiers environ des élèves. Plus précisément, il semble que les élèves donnent des justifications qui ne comportent pas uniquement les relations quantitatives nécessaires ; ils expriment des éléments qualitatifs du modèle de la chaîne énergétique, comme la source et le récepteur d'énergie, ou encore le processus de transfert de l'énergie.

Le tableau 6 présente, à titre d'exemple de ce que nous nommons « conception énergétique opérationnelle », les justifications données par un élève qui a suivi l'enseignement dans le cadre du curriculum constructiviste.

Question	Justification	Catégorie
1	$W_1 = F d$, $W_2 = 2 F d$ donc W_2 est le double de W_1 . Le conducteur a dépensé plus de calories dans le deuxième cas car la distance d étant doublée, la conséquence logique est l'augmentation du travail donné.	1E
2	Si l'on réduit l'inclinaison de la planche, le ressort sera moins comprimé. Selon la formule de l'énergie potentielle $E_{p \text{ hauteur}} = B h$. C'est-à-dire que plus la hauteur h est réduite, plus l'inclinaison se réduit et donc l'énergie potentielle puisque le poids reste stable. Par la suite, l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique. Il est ainsi normal que plus l'énergie cinétique est petite, plus petite sera la vitesse avec laquelle la bille tombera et donc moins le ressort sera comprimé.	1E
3	On sait que l'énergie potentielle est donnée par la formule $E_{p \text{ hauteur}} = B h$. Au troisième étage ou d'ailleurs h (hauteur) augmente, augmente en même temps l'énergie potentielle. Le fait que l'énergie potentielle augmente présuppose que la source d'énergie augmente la quantité d'énergie qu'elle donne. Donc dans le deuxième cas, nous consommons davantage de calories.	1E
4	Puisque dans le deuxième cas, on parcourt une plus petite distance cela a pour conséquence un moins grand besoin de temps que dans le premier, donc la vitesse qu'acquiert la caisse est plus grande dans le deuxième cas, en considérant que le poids et la force sont stables.	C/P
5	La vitesse avec laquelle la voiture heurte le ressort est égale à celle qui la propulse car la voiture possède une énergie cinétique qui est transmise au ressort. Celui-ci en la possédant la transforme en énergie de déformation ou de contraction si l'on peut dire. Cependant l'énergie retrouve à la fin sa forme initiale.	1E

Tableau 6 : Exemple de « conception énergétique opérationnelle » d'un élève qui a suivi l'enseignement dans le cadre du programme constructiviste

Nombreux sont ceux qui, malgré tout, ne sont pas parvenus à surmonter les représentations phénoménologiques exprimées au pré-test. En effet, soit elles sont reproduites telles quelles, soit elles sont mélangées à des éléments du cadre énergétique, comme dans le cas suivant : « *Le chauffeur a consommé plus de calories parce qu'il dit avoir exercé la même force sur toute la durée mais en ayant parcouru une distance deux fois supérieure. Ainsi, la deuxième fois en poussant sa voiture sur une double distance l'homme a-t-il perdu plus de calories parce qu'il a fait un plus grand effort. C'est-à-dire que le travail qu'il a fourni pour pousser la voiture était plus grand et il a ainsi par conséquent consommé plus de calories* » (question 1). Nous avons classé ces conceptions sous la catégorie X, en évitant de les définir comme énergétiques, puisque nous ne sommes pas sûrs que ces conceptions soient utilisées de façon fonctionnelle par les élèves, c'est-à-dire qu'elles soient mises en rapport direct avec les caractéristiques phénoménologiques et conceptuelles particulières au phénomène physique considéré.

Il faut aussi noter le petit nombre de justifications pour lesquelles a été utilisé un cadre conceptuel cinématique/potentiel. Petit nombre qui peut s'expliquer par le faible temps d'enseignement consacré à des sujets traditionnels du curriculum grec comme l'étude du mouvement des corps et l'introduction au concept de la force newtonienne. Ce faible temps d'enseignement, résultant des objectifs cognitifs du curriculum proposé, semble avoir empêché les élèves de combiner les différents cadres, ce qui a entraîné la domination des conceptions énergétiques. Cependant, comme l'analyse qualitative l'a montré, ces conceptions (cinématiques/potentielles) étaient souvent justes et complètes.

4. DISCUSSION

On peut se demander si le pourcentage d'élèves ayant utilisé des représentations énergétiques, après enseignement dans le cadre du curriculum constructiviste, est satisfaisant. Une réponse positive permettrait de conclure que le noyau dur du curriculum est fonctionnel, c'est-à-dire applicable dans des situations réelles d'enseignement. La réponse dépend bien sûr des critères adoptés. Si on considère la bibliographie concernant les représentations des élèves relatives aux concepts énergétiques dans le domaine de la mécanique, alors, un tiers des élèves capables de répondre en utilisant des concepts énergétiques peut être apprécié comme un progrès notable. Les pourcentages précédents peuvent être décrétés satisfaisants. Un autre critère que l'on pourrait prendre en compte est celui de la qualité des conceptualisations finales des élèves. Nous évaluons la qualité des conceptualisations de deux façons : le fait qu'elles sont utilisées pour la

justification dans au moins trois questions sur cinq (voir dernière colonne du tableau 5), la complétude et la clarté (voir tableau 6).

Les conclusions précédentes valident notre hypothèse que, au premier niveau de l'enseignement secondaire, le noyau dur du curriculum proposé permet des apprentissages opérationnels des concepts énergétiques dans le domaine de la mécanique. La chaîne énergétique, qui constitue l'élément conceptuel central du noyau dur, semble être le vecteur principal des conceptualisations. Un aspect important de notre démarche est que la conceptualisation en chaîne énergétique s'appuie sur des représentations initiales des élèves : les représentations pré-énergétiques⁷. Cette compatibilité est due à des ressemblances syntaxiques et au type d'explication donnée⁸. La conceptualisation en termes de chaîne énergétique organise et facilite le passage d'une approche qualitative à une approche quantitative et l'utilisation des propriétés analogiques du modèle de la chaîne énergétique. Ces deux aspects ont permis l'introduction des concepts particulièrement abstraits de travail, d'énergie cinétique et d'énergie potentielle, dans un deuxième temps, après l'approche des éléments du modèle de la chaîne énergétique à travers l'élaboration des phénomènes thermiques pour lesquels les élèves expriment plus facilement des conceptions pré-énergétiques.

Est-il possible d'améliorer l'apprentissage produit par ce curriculum ? La réponse à cette question semble positive puisque le noyau dur du curriculum constitue un cadre et une organisation et non une méthode d'enseignement, c'est-à-dire qu'il ne comporte pas d'informations sur la façon dont le contenu sera mis en oeuvre par celui qui passerait de ce noyau dur à un programme d'enseignement précis. Si, par exemple, la stratégie d'enseignement était, elle aussi, pensée dans le cadre constructiviste (comme le décrit un certain nombre d'études que nous avons présentées au début de cet article), on peut espérer une augmentation du nombre d'élèves qui conceptualiseraient de manière opérationnelle l'approche énergétique des phénomènes mécaniques. Une étude plus systématique donnerait évidemment des réponses précises à la question précédente.

Comme nous l'avons vu, ce curriculum donne des résultats intéressants pour la conceptualisation de l'énergie mécanique. Peut-on envisager le même type de construction de curriculum pour généraliser le concept d'énergie à d'autres champs de phénomènes (comme les phénomènes biologiques) ou avec des élèves plus jeunes ou plus âgés ? Pour toutes ces raisons, le programme de recherche de l'enseignement et/ou de l'apprentissage de l'énergie dans le cadre de la didactique des sciences physiques reste un programme de recherche progressif, vivant et ouvert.

NOTES

1. Nous nous basons sur des échantillons issus de la population grecque.

2. Terme emprunté à Tobin et al. (1994).

3. Menck (1995) mentionne une catégorisation utile des manières d'approche du programme, et distingue quatre niveaux d'intervention : le niveau politique où sont formulés les principes de base du système éducatif ; le niveau d'un domaine comme les sciences physiques, où les principes de base du système éducatif sont formulés pour le domaine en question ; le niveau de l'unité thématique, où sont abordés des sujets comme ceux de l'élaboration du contenu du programme sur une ou plusieurs unités didactiques, ou ceux de l'élaboration des manuels scolaires, et enfin le niveau de la classe, où l'on insiste sur l'organisation et l'application en classe des activités didactiques en général. Notre étude concerne principalement le niveau de l'unité thématique.

4. Le terme est utilisé dans le cadre de la recherche francophone (Méheut et al., 1987 ; Tiberghien & Mégalakaki, 1995). On le rencontre dans des interventions relatives à des objets d'enseignement particulièrement abstraits, comme l'énergie ou la théorie corpusculaire, où il est difficile de trouver des représentations auxquelles peut s'appliquer l'enseignement constructiviste.

5. Par « noyau dur » du contenu du curriculum nous entendons les sélections principales qui concernent l'organisation conceptuelle, sa nature et son champ d'application, en se basant sur les intentions et les objectifs didactiques qui se formulent. Il est impossible de douter de ces sélections quant à une éventuelle application du curriculum dans l'enseignement. Mais elles ne peuvent que se spécifier, se compléter et/ou s'adapter dans le cadre de l'enseignement où le noyau dur sera appliqué.

6. La transposition du fonctionnement d'un système thermodynamique ouvert peut conduire à plusieurs modèles de chaîne énergétique ayant des propriétés similaires (Koliopoulos, 1997). Un des critères principaux, dans le cas du choix d'un programme constructiviste, est le degré de compatibilité du modèle avec les représentations des élèves. Dans notre cas, par exemple, ce sont la structure et le contenu des représentations pré-énergétiques des élèves qui ont conduit au choix d'un tel modèle dans lequel, d'une part, apparaissent clairement les sources et les récepteurs d'énergie et, d'autre part, soient déclarées les formes de transfert de l'énergie. En annexe 1 est donné un exemple des différents niveaux du modèle de chaîne énergétique. Ce modèle s'écarte de l'approche du

physicien qui tiendrait compte des échanges de chaleur entre l'homme et l'environnement, l'homme et le sol et/ou la voiture et l'environnement.

7. Les représentations pré-énergétiques constituent un précurseur indispensable pour la conceptualisation en termes de chaîne énergétique ; c'est pourquoi le curriculum est conçu de façon à les faire construire si elles ne sont pas initialement présentes chez les élèves.

8. D'après la typologie de Halbwachs (1973), le genre de l'explication donnée tant par le modèle de la chaîne énergétique que par les représentations pré-énergétiques correspond à une explication hétérogène ou causale, selon laquelle la cause est en rapport avec les facteurs extérieurs du changement du système physique étudié. Les deux autres genres d'explication de la typologie sont l'explication homogène, qui se réfère à une description interne du système physique et l'explication bathyène qui demande le recours au niveau microscopique.

BIBLIOGRAPHIE

- AGABRA J. (1986). Échanges thermiques. *Aster*, n° 2, pp. 1-41.
- CLIS Project (1987). *Approaches to teaching energy*. Leeds, University of Leeds.
- DRIVER R. & MILLAR R. (1985). *Energy matters*. Leeds, University of Leeds.
- DRIVER R. & OLDHAM V. (1986). The constructivist approach to curriculum development in science. *Studies in Science Education*, n° 13, pp. 105-122.
- DRIVER R., SQUIRES A., RUSHWORTH P. & WOOD-ROBINSON V. (1994). *Making sense of secondary science. Research into children's ideas*. London, Routledge.
- DUIT R. (1985). In search of an energy concept. In R. Driver & R. Millar (Éds), *Energy Matters*. Leeds, University of Leeds, pp. 67-101.
- DUIT R. & HAEUSSLER P. (1994). Learning and Teaching Energy. In P. Fensham, R. Gunstone & R. White (Éds.), *The Content of Science. A Constructivist Approach to its teaching and learning*. London, The Falmer Press, pp. 185-200.
- FENSHAM P.J., GUNSTONE R.F. & WHITE R.T. (1994). Science content and Constructivist Views of Learning and Teaching. In P. Fensham, R. Gunstone & R. White (Éds), *The Content of Science. A Constructivist Approach to its teaching and learning*. London, The Falmer Press, pp. 1-8.
- GUIDONI P. (1985). A phenomenological approach to the development and differentiation of energy ideas. In R. Driver & R. Millar (Éds), *Energy Matters*. Leeds, University of Leeds, pp. 103-132.
- HALBWACHS F. (1973). L'Histoire de l'explication en Physique. *L'Explication dans les Sciences*. Paris, Flammarion, pp. 72-102.
- KOLIOPOULOS D. (1997). *Approches épistémologiques et didactiques du processus de construction de curriculum : Le cas de la transposition didactique et de l'apprentissage du concept d'énergie*. Thèse, Université de Patras.
- KOLIOPOULOS D. & TIBERGHIE A. (1986). Éléments d'une bibliographie concernant l'enseignement de l'énergie au niveau des collèves. *Aster*, n° 2, pp. 167-178.

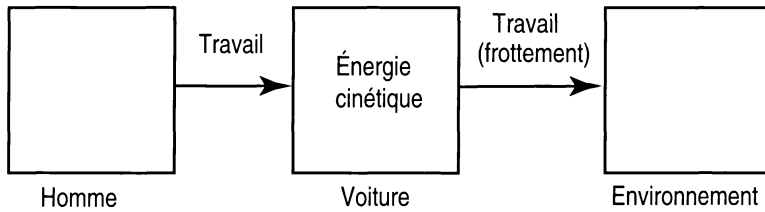
- KOLIOPOULOS D., BAGAKIS G. & PAPAMICHAEL Y. (1996). Qualitative analysis of junior secondary science textbooks : the case of energy concept. In M. Kondyli & Y. Papamichael (Éds), *Textbooks : Research and Evaluation*. Athens, Hellenique National Commission for the UNESCO, pp. 153-161.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1990). *L'apprentissage de la modélisation dans l'enseignement de l'énergie, Rapport de recherche*. Paris, LIREST Université Paris 7.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1994). A developmental approach to cognitive change in mechanics. *International Journal of Science Education*, vol. 16, n° 1, pp. 99-120.
- LIJNSE P. (1990). Energy between the life-world of pupils and the world of Physics. *Science Education*, vol. 74, n° 5, pp. 571-583.
- MÉHEUT M., LARCHER C., CHOMATA. & BARBOUX M. (1987). *Modèle particulière et activités de modélisation en classe de 4ème. Rapport de fin de contrat MIR-MEN. Enseignement et apprentissage de la modélisation*. Paris, LIREST Université Paris 7.
- MENCK P. (1995). « Bildung » – A core of german Didactics. Paper presented in the *European Conference on Educational Research 95*, University of Bath.
- MILLAR R. (1989). Constructivism criticisms. *International Journal of Science Education*, vol. 11, n° 6, pp. 587-596.
- NIEDDERER H., GOLDBERG F. & DUIT R. (1991). Towards learning process studies: a review of the workshop on research in physics learning. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Éds), *Research in Physics Learning : Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel, IPN University of Kiel, pp. 10-28.
- PSILLOS D. (1995). Adapting science teaching to student's reasoning. In D. Psillos (Éd), *Proceedings of the 2nd PhD Summerschool "European Research in Science Education"*. Thessaloniki, Art of Text, pp. 57-71.
- SHIPSTONE D.M. & GUNSTONE R.F. (1985). Teaching children to discriminate between current and energy. In R. Duit, W. Jung & C. von Rhoneck (Éds), *Aspects of understanding electricity*. Kiel, IPN University of Kiel, pp. 287-297.
- SOLOMON J. (1985). Teaching the conservation of energy. *Physics Education*, vol. 20, pp. 165-170.
- SOLOMON J. (1992). *Getting to know about energy - in school and society*. London, The Falmer Press.
- TIBERGHIE A. (1988). Learning and teaching at middle school level of concepts and phenomena in physics: the case of temperature. In H. Mandl, E. De Corte, N. Bennett & H.F. Friedrich (Éds), *Learning and Instruction : European research in an International context*. Oxford, Pergamon Press, pp. 631-648.
- TIBERGHIE A. & MEGALAKAKI O. (1995). Characterisation of a modelling activity for a first qualitative approach to the concept of energy. *European Journal of Psychology of Education*, vol. X, n° 4, pp. 369-383.
- TOBIN K., TIPPINS D.J. & GALLARD A.J. (1994). Research on instructional strategies for teaching science. In D.L. Gabel (Éd.), *Handbook of research on science teaching and learning*. New York, Macmillan Publishing Company, pp. 45-93.
- TRUMPER R. (1990). Being constructive: An alternative approach to the teaching of the energy concept - Part one. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 4, pp. 343-354.
- TRUMPER R. (1991). Being constructive : An alternative approach to the teaching of the energy concept – Part two. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 1, pp. 1-10.
- WEIL-BARAIS A. (1987). *Manuel pratique de méthodologie pour la recherche en Didactique des Sciences Expérimentales : analyse des données*. Paris, LIREST Université Paris 7.

REMERCIEMENTS

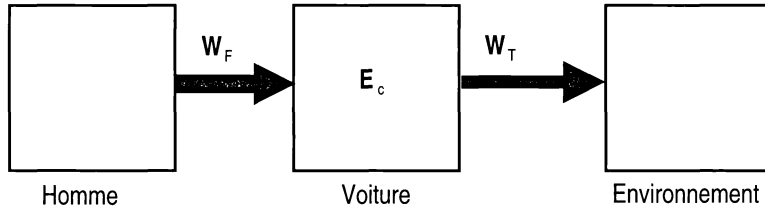
Nous remercions vivement A. Dumas-Carré et A. Weil-Barais pour la révision du texte français et pour leurs très intéressantes remarques.

ANNEXE 1

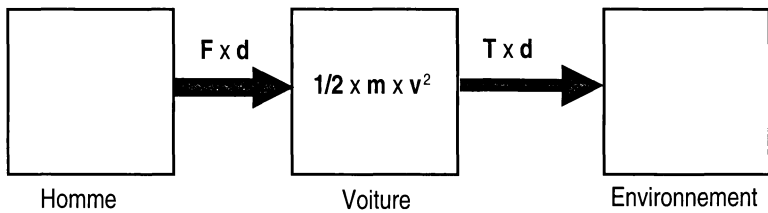
Exemple de représentation symbolique d'une chaîne énergétique. Cette représentation réfère au déplacement d'une voiture poussée par un homme.



Annexe 1a



Annexe 1b



Annexe 1c

ANNEXE 2

Questionnaire donné aux élèves avant et après enseignement.

1. Un conducteur pousse sa voiture en panne d'essence sur l'autoroute sur une distance de 20 mètres. Il se repose un peu puis repousse la voiture en couvrant une distance deux fois supérieure. Dans les deux cas, il exerce la même force sur le véhicule. Laquelle des phrases suivantes est-elle juste ?

a. Le conducteur a dépensé plus de calories dans le premier cas. b. Le conducteur a dépensé le même nombre de calories dans les deux cas. c. Le conducteur a dépensé plus de calories dans le deuxième cas. Justifiez votre réponse.

2. On laisse glisser une bille de fer sur une planche. Au coin de la planche, un ressort retient la bille qui tombe. Si l'on diminue l'inclinaison de la planche, c'est-à-dire si la bille tombe de moins haut, tout en couvrant la même distance, laquelle des phrases suivantes est-elle juste ?

a. Le ressort va se compresser davantage. b. Le ressort va moins se compresser. c. Le ressort va se compresser autant. Justifiez votre réponse.

3. Sur un chantier, un ouvrier fait monter avec l'aide d'une poulie et avec une vitesse régulière un chargement de briques de 40 kilos. La première fois, le chargement monte du rez-de-chaussée au deuxième étage. La deuxième fois, il monte du rez-de-chaussée au troisième étage. Laquelle des phrases suivantes est-elle juste ?


a. L'ouvrier dépense plus de calories dans le premier cas. b. L'ouvrier dépense le même nombre de calories dans les deux cas. c. L'ouvrier dépense plus de calories dans le deuxième cas. Justifiez votre réponse.

4. Un déménageur pousse une caisse sur une route horizontale sur une distance de 10 mètres. Un peu plus tard, le même déménageur, sur la même route, pousse une caisse du même poids, en employant la même force constante, sur une plus petite distance. Dans les deux cas, il exerce la même force sur la caisse. Laquelle des phrases suivantes est-elle juste ?

a. La caisse acquiert une plus grande vitesse dans le premier cas. b. La caisse acquiert la même vitesse dans les deux cas. c. La caisse acquiert une plus grande vitesse dans le deuxième cas. Justifiez votre réponse.

5. Une petite voiture-jouet vient heurter un ressort, elle est stoppée alors que le ressort se contracte puis elle est propulsée vers l'arrière. La vitesse avec laquelle la voiture est propulsée vers l'arrière est a. plus grande, b. plus petite, c. égale à la celle avec laquelle elle heurte le ressort. Justifiez votre réponse.

Cet article a été reçu le 13/11/97 et accepté le 10/06/98.



**Les intentions didactiques
manifestées dans les programmes
d'électricité de 1993, classe
de quatrième : mise en oeuvre
d'un outil pour en évaluer l'impact
sur les acquis des élèves**

**Evaluating the effects of a new syllabus
in electricity in grade 8**

Monique COUCHOURON

Université Paris 13
Groupe de Recherches pour l'enseignement des Sciences Physiques
93430 Villetaneuse, France.

Laurence VIENNOT

Université Paris7
Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Tour 24, case 7021
2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

L'électricité élémentaire est un des domaines où des points de vue consensuels, rejoignant ceux de la recherche en didactique, ont marqué la rédaction des programmes français de 1993. La question est alors de savoir comment la prise en compte, dans les textes officiels, des difficultés rencontrées par les élèves, se traduit dans les acquis des élèves eux-mêmes. Cette étude, réalisée à l'aide de questionnaires papier-crayon, vise à explorer d'éventuels effets d'ensemble et à contribuer à l'élaboration d'un outil pertinent pour ce type d'enquête. Les résultats présentés concernent deux thèmes abordés en classe de quatrième : la conservation de l'intensité du courant dans un circuit série et le générateur, propulseur (en circuit fermé) et non réservoir de charges.

Mots clés : didactique, circuits électriques, changement de programme, outil d'évaluation, classe de quatrième.

Abstract

Consensus reached in the field of basic electricity had influenced the development of new academic programs in France in 1993. The question then raised was whether taking into account the pupils' difficulties affected their performances. A survey was subsequently carried out among the pupils to assess the extent of the improvement. The survey also contributed to the development of a relevant evaluation tool. The findings bear upon two areas: intensity of electric current and generator.

Key words : didactics, electric circuits, curricular development, evaluation tool, middle class level.

Resumen

La electricidad elemental es uno de los dominios donde los puntos de vistas consensuales, agregando aquellos de la didáctica, han marcado la redacción de los programas franceses del año 1993. La pregunta es de saber cómo la toma en cuenta en los textos oficiales, de las dificultades encontradas por los alumnos, se traduce en las adquisiciones de ellos mismos. Este estudio realizado con la ayuda de cuestionarios papel-creyón, tiene como objetivo explorar eventuales efectos de conjuntos y contribuir en la elaboración de un instrumento pertinente para ese tipo de estudio. Los resultados presentados conciernen dos temas abordados en clase de cuarto e tercer año del colegio francés) : la conservación de la intensidad de corriente en un circuito en serie y el generador, propulsor (en circuito cerrado) y no almacenador de carga.

Palabras claves : *didáctica, circuitos eléctricos, cambio de programa, herramienta de evaluación, clase de cuarto.*

1. INTRODUCTION

Certaines difficultés communes mises au jour depuis une vingtaine d'années sont maintenant largement reconnues dans la communauté enseignante. L'électricité élémentaire est un de ces domaines où des points de vue consensuels, rejoignant ceux de la recherche en didactique ont marqué la rédaction des programmes français de 1993 pour la classe de quatrième. Par l'organisation générale du programme comme par les « compétences exigibles » déclarées, les « activités-supports » suggérées et diverses indications, les textes officiels (BOEN, 1992) et les documents d'accompagnement (GTD de Physique, 1992) apportent un éclairage neuf aux concepts, par ailleurs très classiques, traités dans cette classe.

Plus précisément les élèves, quel que soit leur niveau, ont des difficultés importantes à envisager le circuit électrique comme un système, et une tendance à considérer le générateur comme la source, à débit constant, d'une entité (« courant », « électricité », « électrons », « tension ») dont les aventures vont ensuite se dérouler au gré des obstacles rencontrés (Closset, 1983, 1989 ; Duit et al., 1991 ; Johsua, 1985 ; Johsua & Dupin, 1989 ; Härtel, 1993 ; Shipstone et al., 1988). Parmi ces raisonnements non systémiques, certains comportent explicitement une usure du courant tout le long du circuit, d'autres se limitent à envisager une perturbation uniquement locale de l'intensité.

Ces difficultés sont largement prises en compte dans les textes du programme de 1993. Celui-ci comprend, en électricité, deux parties bien distinctes. L'une est centrée sur les décharges, phénomènes limités dans le temps, et l'autre sur le circuit électrique « série », lequel doit être compris (« compétences exigibles ») comme un système parcouru, en régime permanent, par un courant partout identique mais fonction de l'ensemble du circuit, dont l'ordre des éléments n'a pas d'importance. La distinction intensité/tension est également accentuée, en particulier dans l'étude du fil de connexion présenté comme un dipôle à part entière, qui peut être parcouru, en circuit fermé, par un courant sans tension notable à ses bornes. On peut lire dans Couchouren et al. (1996) une analyse plus complète de ce programme et des réactions que sa lecture a suscitées, avant tout enseignement, chez une dizaine d'enseignants de collège.

La question est ici de savoir comment cette prise en compte, dans les textes officiels, des difficultés communément rencontrées par les élèves,

cet éclairage bien particulier d'un contenu au demeurant classique, se traduisent dans les acquis des élèves eux-mêmes.

Poser cette question n'est pas nier le caractère probablement déterminant des maîtres, de leur compréhension particulière des intentions didactiques sous-jacentes aux suggestions présentes dans les textes. Les conclusions de l'article déjà cité (Couchouron et al., 1996) et de son homologue pour la partie optique du programme (Hirn, 1995), les résultats d'une étude de même nature que celle-ci, portant sur les acquis des élèves eux-mêmes, à propos de l'optique (Saltiel & Kaminski, 1996) semblent indiquer, de manière convergente, l'influence importante du maître sur l'impact, au niveau des élèves, d'une innovation issue d'une instance officielle.

La présente étude vient en complément des précédentes ; elle s'attache à explorer d'éventuels et importants effets d'ensemble, tout en contribuant à constituer un outil d'évaluation pertinent pour ce type d'enquête. Anticipant sur les détails de notre méthodologie, indiquons simplement que, au-delà d'une appréciation globale comparative d'élèves ayant appris respectivement avec l'ancien et le nouveau programme, nous souhaitons pouvoir donner un aperçu de l'évolution des réponses aux questions portant sur les difficultés repérées. C'est à la fois à l'importance et à la résistance relatives des difficultés que nous nous intéressons.

Nous avons centré notre étude sur quatre thèmes sur lesquels le nouveau programme met un accent particulier :

- la conservation de l'intensité du courant dans un circuit série ;
- le générateur, propulseur (en circuit fermé) et non réservoir de charges ;
- la distinction intensité/tension ;
- le fil de connexion et le court circuit.

Cet article concerne les deux premiers de ces thèmes. Il présente également, à propos du premier thème, les résultats d'une enquête complémentaire (1996) en classe de seconde, auprès d'élèves ayant appris avec le programme de quatrième de 1993. Cette investigation complémentaire vise à vérifier la résistance à long terme de la plus importante des difficultés mises en évidence dans l'enquête initiale : le raisonnement séquentiel.

2. MÉTHODE

Sur l'ensemble des quatre thèmes ci-dessus, nous avons établi huit questions (dont sept seulement sont exploitées ici, la rédaction maladroite

de l'une d'entre elles ayant favorisé des réponses ambiguës). Celles-ci peuvent se regrouper par paires, où l'une des questions apparaît, en première approximation, comme une variante de l'autre. Deux questionnaires, A et B, sont constitués chacun d'un élément par paire et ont été proposés à des élèves différents. Ceci permet à la fois de limiter la durée de l'interrogation par sujet, et d'éviter d'éventuels effets de proximité entre questions pour un même élève. Les questionnaires ont été soumis à des élèves de quatrième de diverses régions de France, une première fois à la fin de l'année scolaire 1992-1993 ($N_A=79$ et $N_B=260$) et une nouvelle fois en 1993-1994 ($N_A=115$ et $N_B=65$), soit respectivement juste avant et juste après la mise en oeuvre des nouveaux programmes de 1993. Les maîtres impliqués chaque année ne sont pas les mêmes, pour éviter une perturbation d'une année sur l'autre.

Les aspects particuliers liés à l'enseignement des maîtres ayant participé à cette enquête ne peuvent être considérés comme lissés par l'effectif de ces derniers qui reste limité : 12 au total, seulement 5 dans certaines comparaisons. Ceci reste donc une limite importante dans l'interprétation des comparaisons d'une année sur l'autre. Remarquons d'ailleurs que, si l'on considère ce facteur, la limitation liée au faible nombre de maîtres impliqués est encore présente avec des effectifs de l'ordre de 180 élèves par population (six enseignants), par exemple dans l'étude comparative entre pays européens de Shipstone et al. (1988). De plus, il faut garder présent à l'esprit que les enseignants qui acceptent de participer à une telle étude font assurément partie de ceux qui sont le plus à l'écoute de leurs élèves et de leurs difficultés.

Nous l'avons dit, ce n'est pas une performance globale qui nous intéresse, mais les éventuels effets différents d'un type de difficulté à l'autre. C'est donc un ensemble d'aspects de la compréhension des élèves que nous recueillons pour chaque population et c'est une forme dans cet ensemble que nous cherchons à repérer. Après un premier tri des réponses brutes, nous nous intéressons aux justifications, lesquelles sont demandées dans toutes nos questions. Les indicateurs que nous définissons pour cette analyse sont des couples élément de réponse-question (le terme « réponse » incluant l'argumentation associée), que nous désignons par l'expression « aspect de compréhension » ou, plus brièvement, par le terme « aspect ». Il est essentiel en effet de rapporter un élément de réponse donné - par exemple : « *l'intensité est la même dans tout le circuit* » - à la question qui en a suscité l'apparition, car un tel commentaire peut se révéler beaucoup plus fréquent pour certaines questions que pour d'autres, alors qu'il constitue, dans les deux cas, la clé de la réponse correcte. L'observation de tels effets remonte au tout début des études sur les raisonnements et conceptions des étudiants (Viennot, 1977 ; Saltiel, 1978). Elle a inspiré des travaux récents (Chauvet, 1996a, 1996b ; Rainsou, 1995), dont les résultats

s'expriment, comme ceux que nous présentons ici, par des « profils conceptuels » fondés sur les taux d'occurrence d'aspects de compréhension définis comme ci-dessus.

Une telle méthode n'interdit pas de laisser de côté des catégories de réponses jugées non pertinentes, par exemple parce qu'à la fois sans contenu significatif identifié et représentées par un très faible nombre de réponses. Mettant néanmoins en oeuvre une multiplicité d'éléments d'information, elle comporte un risque : celui de faire apparaître, en fait de forme, un bruit ininterprétable. Il faut donc aussi y faire apparaître des regroupements.

Nous avons d'abord regroupé nos résultats par thème (voir les quatre thèmes cités plus haut) puis selon qu'ils correspondent ou non à des aspects de compréhension corrects du point de vue de la physique. Nous obtenons ainsi un profil conceptuel « conforme » au modèle de la physique et un profil conceptuel « non conforme » par thème et par année d'enseignement. Ensuite, à l'intérieur de chacun de ces profils, nous pouvons éventuellement exploiter divers regroupements entre aspects de compréhension, notamment en rassemblant tous les aspects relatifs à une même question si c'est là un paramètre qui semble déterminant. Le critère qui permet d'évaluer l'intérêt des regroupements tentés est la plus ou moins grande similarité des réactions des élèves (ici évaluée sur la base des taux d'occurrence) à propos de chacun des aspects regroupés.

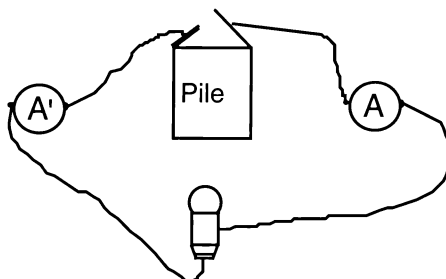
3.1. Conservation de l'intensité du courant dans un circuit série : analyse des réponses et profils conceptuels mis au jour

Les questions concernées par ce thème sont indiquées dans l'encadré 1. Leur numéro d'identification est suivi d'une lettre indiquant le questionnaire dont elles font partie, A ou B : deux questions assorties de lettres différentes ne peuvent avoir été posées aux mêmes élèves.

Les questions 1A et 2B sont ciblées sur la conservation de l'intensité du courant en circuit fermé, la première de la manière la plus dépouillée qui soit, la seconde proposant deux circuits qui ne diffèrent que par l'ordre des éléments. La première de ces questions et, à un moindre degré, la seconde se retrouvent fréquemment, sous une forme plus ou moins équivalente, dans la littérature sur les conceptions en électricité (voir les études citées plus haut). Curieusement, les questions 3A et 4B, qui portent sur la conservation de l'intensité dans une situation où celle-ci est nulle, à savoir en circuit ouvert, est absente de ces mêmes études : c'est comme si les seuls problèmes qu'on pouvait poser en circuit ouvert concernaient la

possibilité d'allumer une ampoule, ou bien les tensions entre divers couples de points.

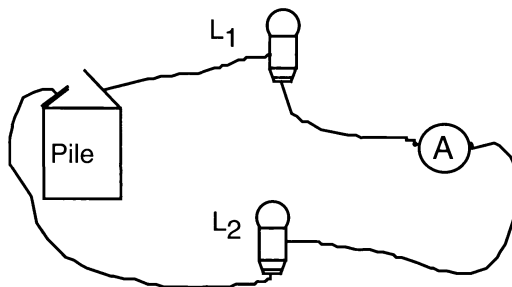
1A – Dans le circuit ci-dessous, les deux ampèremètres A et A' indiquent-ils la même intensité ?



Justifiez votre réponse :

2B – Dans le circuit ci-dessous l'ampoule L_1 et l'ampoule L_2 sont différentes. On lit l'intensité I sur l'ampèremètre A.

On échange L_1 avec L_2 . L'ampèremètre indiquera-t-il une intensité égale à I ? différente de I ?

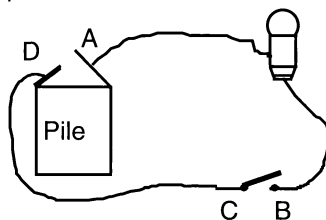


Justifiez votre réponse :

3A – Dans le montage ci-dessous où l'interrupteur est ouvert comme sur la figure, répondez par « oui » ou « non » aux questions posées :

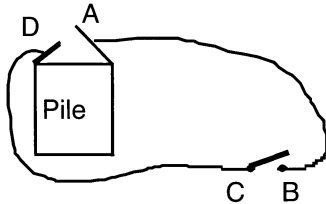
Un courant circule-t-il

- | | | |
|------------------|-----|-----|
| – entre A et B ? | OUI | NON |
| – entre C et D ? | OUI | NON |
| – entre B et C ? | OUI | NON |
| – entre A et D ? | OUI | NON |



Justifiez vos réponses :

4B - Dans le montage ci-dessous où l'interrupteur est ouvert comme sur la figure, répondez par « oui » ou « non » aux questions posées :



Un courant circule-t-il

- entre A et B ? OUI NON
- entre C et D ? OUI NON
- entre B et C ? OUI NON
- entre A et D ? OUI NON

Justifiez vos réponses :

Encadré 1 : Questions concernant l'intensité du courant dans un circuit série

Les taux de réponses brutes correctes sont donnés en tableau 1.

	Question 1A	Question 2B	Question 3A	Question 4B
Taux de réponses brutes « correctes » en 1993	66%	54%	38%	41%
Taux de réponses brutes « correctes » en 1994	76%	56%	57%	49%

Tableau 1 : Taux de réponses « correctes » obtenues pour les questions concernant l'intensité du courant dans un circuit série

De ce tableau, nous ne retenons relativement que peu d'information. En effet, selon les questions, le risque est plus ou moins grand d'avoir une réponse « correcte » pour de « mauvaises raisons », comme en témoigne ce commentaire en question 1A : « *Les intensités sont les mêmes parce que les ampèremètres sont tous les deux près du générateur* ». Le seul examen des réponses brutes laisse, dès lors, plus ou moins d'incertitude sur la justesse du raisonnement selon la question. Ainsi on peut estimer qu'une réponse totalement correcte en 3A ou 4B garantit pratiquement une bonne compréhension de la situation, ce qui n'est pas le cas pour d'autres questions.

On peut noter malgré tout que, si tous les écarts d'une année sur l'autre vont dans le même sens, on n'observe en fait une progression significative des réponses correctes que pour la question 3A (écart de +19% et pour le χ^2 , $p \leq 0,1\%$).

Examinons maintenant les argumentations. Les justifications correctes du point de vue de la physique permettent, en association avec les questions qui les ont suscitées, de constituer la liste des aspects de compréhension retenus pour ce thème, et donc le profil « conforme » au modèle de la physique des populations interrogées. Ces aspects de compréhension sont les suivants :

- « *les intensités sont égales car le circuit est un circuit série* » (ou formulation équivalente), en question 1A : aspect 1c ;
- « *l'intensité est égale à I car c'est un circuit série* », en question 2B : aspect 2c ;
- « *l'intensité est nulle dans tout le circuit car le circuit, ou l'interrupteur, est ouvert* », en question 3A : aspect 3c ;
- « *l'intensité est nulle dans tout le circuit car le circuit, ou l'interrupteur, est ouvert* », en question 4B : aspect 4c.

Les profils ainsi obtenus, correspondant à chaque année, sont donnés en figure 1.

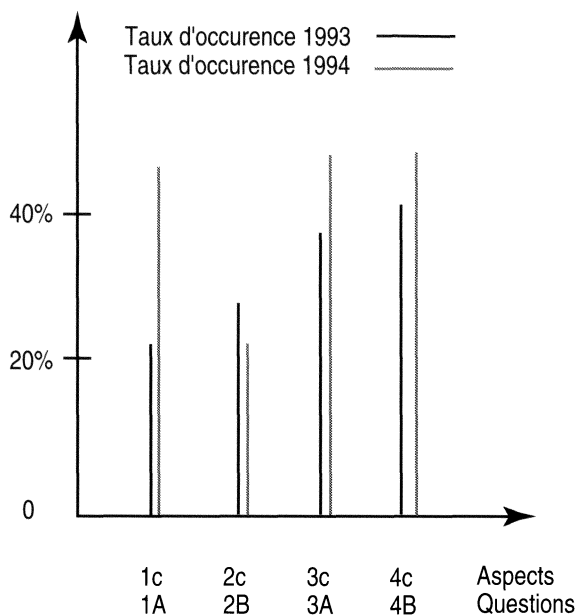


Figure 1 : Taux d'occurrence des aspects « conformes » au modèle de physique pour le thème : « conservation de l'intensité dans un circuit série »

On observe une fréquence de justification correcte toujours inférieure à 50%, et un accroissement notable d'une année sur l'autre, essentiellement à la question 1A (χ^2 , $p \leq 0,001$), tandis qu'elle stagne en question 2B.

Cependant, si nous cumulons les effectifs associés aux aspects 1c et 2c (qui concernent des populations différentes), nous mettons encore en évidence (χ^2 , $p \leq 0,01$) une perception systémique du circuit fermé plus fréquente en 1994.

De même, en cumulant les effectifs des aspects 3c et 4c, (qui concernent des populations différentes), nous mettons en évidence une perception systémique du circuit ouvert (χ^2 , $p \leq 0,05$) plus fréquente pour l'année 1994.

Ces résultats cumulés sont présentés en figure 2.

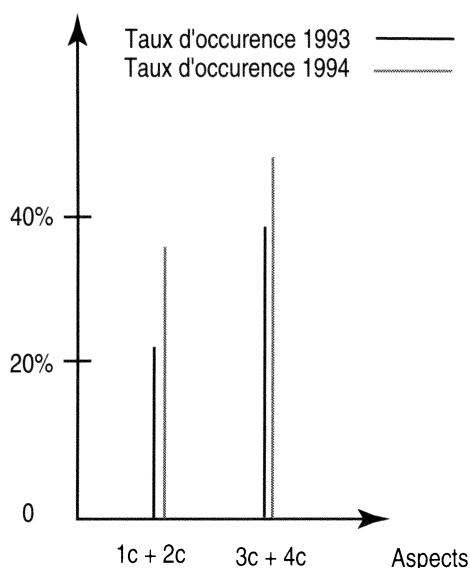


Figure 2 : **Taux d'occurrence des aspects « conformes » au modèle de la physique avec effectifs cumulés**

Analysons maintenant les différences qui concernent les aspects « non conformes » ; ceux que nous repérons (figure 3) sont les suivants :

– « *les intensités sont égales* », mais intervention dans le commentaire de la localisation des différents composants du circuit par rapport au générateur, ceci

- pour la question 1A : aspect 5n ;

– « *les intensités ne sont pas égales* » et mention de la consommation de l'ampoule, ceci

- pour la question 1A : aspect 6n,
- pour la question 2B : aspect 8n ;
- « *les intensités ne sont pas égales* » et intervention de la localisation des différents composants du circuit par rapport au générateur, ceci
 - pour la question 1A : aspect 7n,
 - pour la question 2B : aspect 10n ;
- *les intensités sont différentes car les ampoules sont différentes* », ceci
 - pour la question 2B : aspect 9n ;
- « *le circuit est ouvert* » ou « *l'interrupteur est ouvert* » ou « *le courant ne peut pas passer* » accompagnant une intensité non nulle dans une portion du circuit (avant l'interrupteur ouvert), et nulle dans l'autre, ceci
 - pour la question 3A : aspect 11n,
 - pour la question 4B : aspect 13n ;
- « *le circuit est ouvert* » ou « *l'interrupteur est ouvert* » ou « *le courant ne peut pas passer* » accompagnant deux courants antagonistes, d'intensité non nulle, dans les deux portions du circuit situées de part et d'autre du générateur, ceci
 - pour la question 3A : aspect 12n,
 - pour la question 4B : aspect 14n.

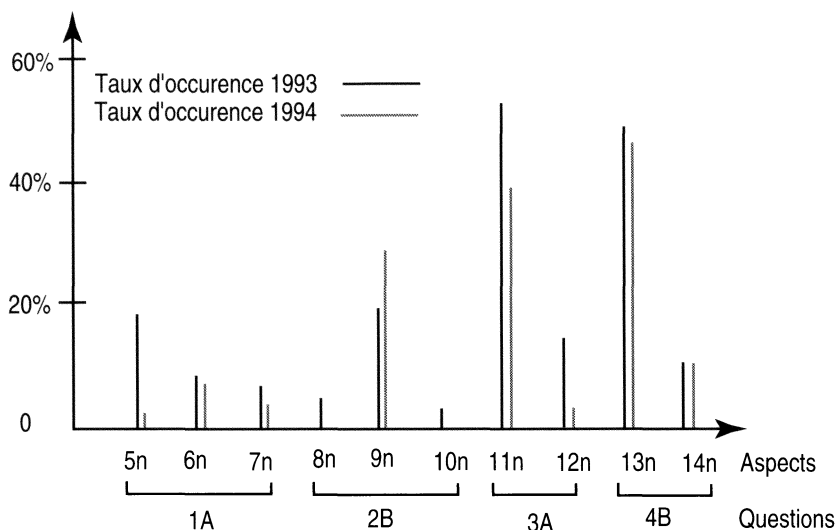


Figure 3 : Taux d'occurrence des aspects « non conformes » au modèle de la physique pour le thème : conservation de l'intensité dans un circuit série

Ces différents aspects manifestent tous un point de vue non systémique concernant un circuit série fermé (question 1A : aspects 5n, 6n et 7n ; question 2B : aspects 8n, 9n et 10n) ou ouvert (question 3A : aspects 11n, 12n et question 4B : aspects 13n et 14n).

Une mention particulière est peut-être à attribuer à l'aspect 9n. En effet, celui-ci correspond, pour la question 2B, à une fréquence non négligeable de justifications associant directement la donnée du texte « ampoules différentes » et la réponse « intensités différentes ». Ceci peut être considéré comme la trace d'un raisonnement séquentiel, mais dont la fréquence est peut-être renforcée par une proximité verbale, une sorte d'effet d'entraînement de l'adjectif « différentes ». L'année 1994 n'est associée à aucune diminution de cette erreur, au contraire.

La figure 4 présente le cumul de ces taux de raisonnement non systémique (aspect 9n compris) pour chaque question et chaque année. Le circuit ouvert y apparaît comme suscitant ces raisonnements non systémiques nettement plus fréquemment, dans une année donnée, que le circuit fermé, ceci dans les populations associées au questionnaire A comme dans celles qui relèvent du questionnaire B. De manière plus détaillée, les remarques suivantes se présentent.

Analysons d'abord ce qui concerne les circuits ouverts. On note la présence discrète (aspects 12n et 14n) d'un modèle de courants antagonistes dans chaque population et chaque année. Les aspects 11n et 13n traduisent un raisonnement séquentiel simple, le courant partant d'une borne du générateur pour s'arrêter sur l'obstacle de l'interrupteur ouvert. Ce raisonnement est très en faveur, puisqu'il rassemble 54% des réponses en 1993, 40% en 1994 pour la question 3A, et reste stable autour de 50% pour la question 4B. La comparaison d'une année sur l'autre des occurrences cumulées des aspects 11n et 13n (chacun relatif à une population différente) fait apparaître une régression de ce type de raisonnement (χ^2 , $p \leq 0,001$).

Concernant les circuits fermés, les raisonnements non systémiques observés qui sont explicitement associés soit à une consommation de courant (question 1A : aspects 6n et question 2B : aspect 8n), soit à une localisation de l'ampèremètre (question 1A : aspects 5n et 7n ; question 2B : aspects 9n et 10n) traduisent également une analyse séquentielle du circuit. On peut, de ce point de vue, regrouper entre eux d'une part les aspects 5n, 6n et 7n qui concernent la question 1A, d'autre part les aspects 8n et 10n qui concernent la question 2B, constituant ainsi les traces du raisonnement séquentiel pour chaque question. Effectuant ce regroupement, nous obtenons les profils « cumulés », non conformes au modèle de la physique, représentés en figure 4.

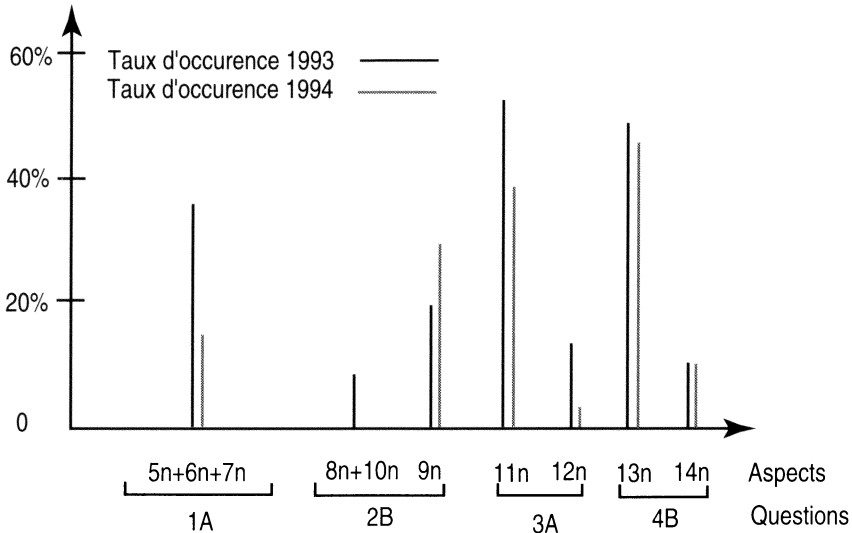


Figure 4 : **Profils conceptuels « cumulés » non conformes au modèle de la physique pour le thème : « conservation de l'intensité dans un circuit série »**

On note une diminution importante du raisonnement séquentiel à propos de la question 1A (36% des réponses en 1993 et 14% en 1994 ; χ^2 , $p \leq 0,001$) d'une année sur l'autre. Si l'on s'intéresse plus finement à l'expression d'une usure ou d'une consommation de courant, on peut reprendre les profils détaillés de la figure 3 et cumuler les effectifs sur les aspects 6n et 8n qui concernent des populations différentes (χ^2 , $p \leq 0,01$).

En résumé, l'analyse des aspects de compréhension « non conformes » fait apparaître, dans nos populations, une moindre fréquence du raisonnement séquentiel après le changement de programme. L'écart le plus important d'une année sur l'autre (-21%) se manifeste sur la question 1A, qui présente un circuit fermé simple. Les situations de circuit ouvert, en questions 3A et 4B, suscitent des taux de justification non systématique plus importants (tous supérieurs à 40%) que ne le font les autres questions. Ces taux n'évoluent que relativement peu d'un an sur l'autre.

Si l'on rassemble les informations détaillées ci-dessus, on observe la cohérence des profils « conformes » et « non conformes ». La progression des justifications correctes et la régression des raisonnements séquentiels après le changement de programme se concentrent sur la situation prototypique du circuit fermé simple. Les taux importants de réponses non systématiques en situation de circuit ouvert, situation sur laquelle le nouveau programme ne dit rien de particulier, évoluent dans une moindre mesure et

c'est encore pratiquement la moitié des élèves qui affirme, en 1994, qu'un circuit ouvert est parcouru par un courant dans au moins l'une de ses portions.

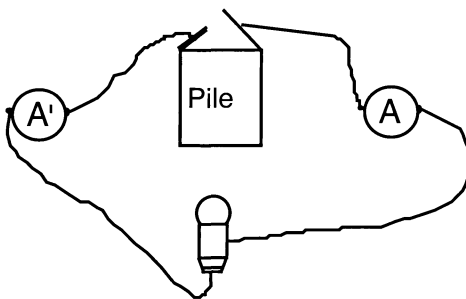
La question impliquant l'ordre des éléments dans un circuit fermé simple (2B) est l'objet de réponses explicitement séquentielles qui sont rares en 1993 (10%) et absentes après le changement de programme, tandis que les justifications erronées consistent principalement à associer la différence des intensités à la différence des ampoules, sans plus de commentaires, avec une fréquence (20% en 1993, 30% en 1994) qui doit peut-être une partie de son importance à un effet d'entraînement verbal.

3.2. Conservation de l'intensité du courant dans un circuit série : complément d'enquête en classe de seconde

Devant les difficultés qu'indiquent ces résultats à propos des circuits ouverts, nous avons cherché à savoir ce qu'il en était chez des élèves de seconde qui ont reçu l'enseignement de quatrième selon le nouveau programme et qui viennent de bénéficier d'un nouvel enseignement d'électricité qui reprend ces notions de base sur le circuit série. Un test a été proposé à 94 élèves de seconde de la région parisienne (encadré 2).

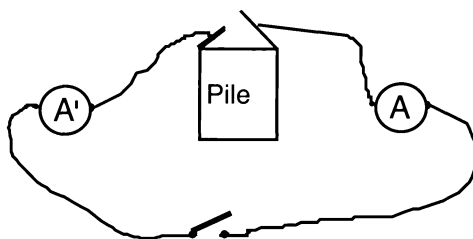
Les ampèremètres A et A' sont identiques et réglés de la même façon.
Dans chacun des circuits ci-dessous, les deux ampèremètres A et A' indiquent-ils les mêmes valeurs?

1°)



Justifiez votre réponse :

2°)



Justifiez votre réponse :

Encadré 2 : Questionnaire proposé aux élèves de seconde

Les résultats sont éloquentes : 53% des élèves font un raisonnement séquentiel dans le cas du circuit ouvert et 11% seulement des élèves interrogés annoncent bien une intensité identique en tout point d'un circuit série, que celui-ci soit ouvert ou fermé.

La question 1A du questionnaire suscite le même niveau de succès qu'en quatrième : environ 70% de réponses correctes. La situation de circuit ouvert, inhabituelle pour les élèves, provoque le même échec massif : 53% de réponses fausses.

Nous reviendrons, en conclusion, sur les questions que posent ces résultats. Notons dès à présent qu'ils convergent avec ceux de l'enquête principale : si la conservation de l'intensité du courant dans un circuit série paraît, sinon acquise par les élèves de quatrième, du moins objet de progrès notable entre 1993 et 1994, ceci concernant la situation d'enseignement du circuit fermé, la situation de circuit ouvert est l'objet d'un important blocage, encore manifeste chez les élèves de seconde interrogés.

Le second thème analysé dans cet article conduit à des résultats qui n'étaient pas davantage prévisibles et éclairent ces premières indications.

4. GÉNÉRATEUR, PROPULSEUR ET NON RÉSERVOIR DE CHARGES : ANALYSE DES RÉPONSES ET PROFILS CONCEPTUELS

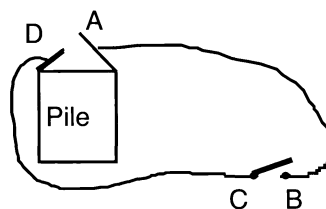
Le raisonnement séquentiel est tout à fait compatible avec les visions communes du générateur comme réservoir déversant, souvent à débit invariable, son surplus de charge d'un pôle vers l'autre à travers le circuit.

Quant à ce qui se passe dans le générateur lui-même, le nouveau programme de 1993 insiste sur la continuité du circuit fermé mais ne souligne pas la difficulté engendrée par la symbolisation habituelle des piles qui suggère, par deux traits parallèles, l'absence de lien interne entre les pôles, ainsi que l'ont déjà fait remarquer d'autres auteurs (Benseghir & Closset, 1996). De ce fait, nous avons posé aux élèves de quatrième les questions 5A et 6B indiquées en encadré 3, et la question 7A sur laquelle nous reviendrons plus loin (encadré 4).

5A – Dans le montage ci-dessous où l'interrupteur est ouvert comme sur la figure, répondez par « oui » ou « non » aux questions posées :

Un courant circule-t-il

– entre A et D ? OUI NON



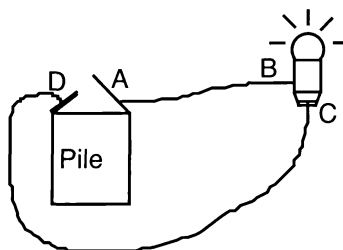
Justifiez vos réponses :

– Y-a-t-il une tension différente de zéro entre A et D ? OUI NON

Justifiez vos réponses :

6B – Dans le circuit représenté ci-contre, la lampe brille. Répondez par « oui » ou « non » aux questions suivantes :

– Y-a-t-il une tension différente de zéro entre A et D ? OUI NON



Justifiez votre réponse :

– Y-a-t-il un courant dans la pile ? OUI NON

Justifiez votre réponse :

Encadré 3 : Questionnaire concernant le générateur

La question 5A traite de l'intensité qui traverse la pile et de la tension à ses bornes en circuit ouvert et la question 6B des mêmes grandeurs en circuit fermé. Le tableau 3 rassemble les divers taux de réponses « correctes » obtenues pour ces questions.

	circuit ouvert		circuit fermé	
	Question 5A pour V pile	Question 5A pour I pile	Question 6B pour V pile	Question 6B pour I pile
Taux de réponses brutes « correctes » en 1993	46%	68%	79%	81%
Taux de réponses brutes « correctes » en 1994	41%	81%	77%	87%

Tableau 3 : Taux de réponses « correctes » obtenues pour les questions 5A et 6B

Globalement, les taux de succès aux questions portant sur le fonctionnement du générateur font preuve de stabilité. Toutefois, on peut remarquer une amélioration dans les réponses concernant l'intensité du courant qui le traverse en circuit ouvert (+ 13%). Comme pour le premier thème, des réponses qui sont « correctes », en ceci qu'elles déclarent non nulle l'intensité qui traverse le générateur en circuit fermé, cessent d'être justes lorsqu'on prend en compte les justifications, ainsi celles qui mettent en jeu un raisonnement séquentiel dans lequel le courant part du générateur mais ne peut y revenir à cause d'un obstacle.

En circuit ouvert, dans certaines réponses, le courant part du générateur, parcourt une portion du circuit et s'arrête sur l'obstacle : l'intensité du courant est alors perçue comme non nulle dans le générateur et dans une partie du circuit. Une variante de cette vision du générateur consiste à faire circuler un courant seulement dans une partie du circuit partant du générateur en considérant comme nulle l'intensité qui traverse celui-ci. De ce fait, nous avons retenu comme indicateurs de compréhension les aspects détaillés dans ce qui suit pour les versants respectivement « conforme » et « non conforme » à la physique des profils conceptuels des groupes interrogés.

Le profil conceptuel « conforme » est constitué à partir des aspects suivants :

– « *la tension n'est pas nulle aux bornes d'une pile* », d'une part pour la question 5A qui traite d'un circuit ouvert (aspect 15c) et, d'autre part, pour la question 6B qui traite d'un circuit fermé (aspect 18c) ;

– « *il n'y a pas de courant qui traverse la pile car le circuit est ouvert* », pour la question 5A (aspect 16c) ;

– « *il y a un courant qui traverse la pile car le circuit est fermé* », pour la question 6B (aspect 17c).

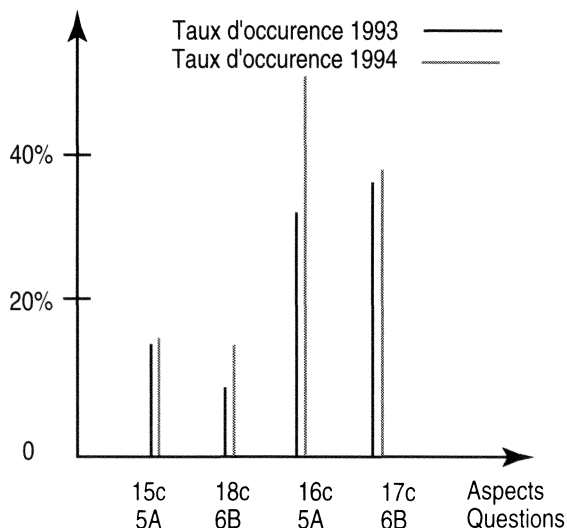


Figure 5 : **Taux d'occurrence des aspects « conformes » au modèle de la physique pour le thème : « générateur »**

L'absence de courant dans le générateur en circuit ouvert (aspect 16c) se voit mentionnée avec une fréquence qui progresse de façon significative (écart de 13% ; χ^2 , $p \leq 0,01$), tandis que le cas du circuit fermé (aspect 17c) ne manifeste aucune évolution. De même, les taux d'occurrence des aspects 15c et 18c concernant la tension restent stables, inférieurs à 20% dans les deux populations interrogées.

Pour le profil conceptuel « non conforme » de ce thème, les aspects retenus sont les suivants :

– « *la tension aux bornes de la pile est nulle* », avec ou sans justification pour la question 5A (aspect 19n) ;

– « *la tension aux bornes de la pile est nulle* » avec ou sans justification pour la question 6B qui traite d'un circuit fermé (aspect 20n) ;

– « *un courant circule dans la pile* » avec ou sans justification pour la question 5A qui traite d'un circuit ouvert (aspect 21n) ;

– « *il n'y a pas de courant dans la pile* » avec ou sans justification pour la question 6B qui traite d'un circuit fermé (aspect 22n).

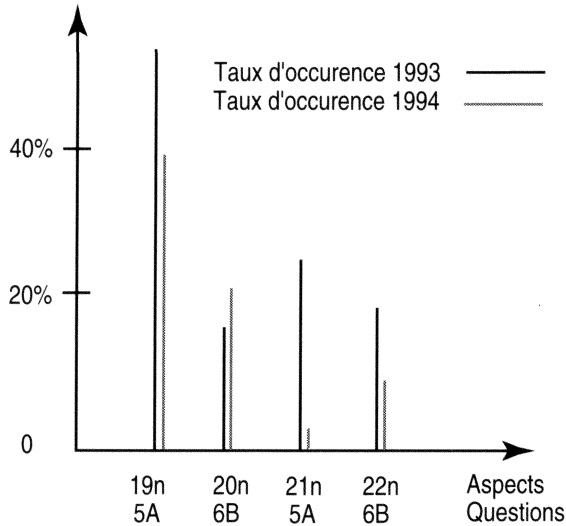


Figure 6 : Taux d'occurrence des aspects « non conformes » au modèle de la physique pour le thème : « générateur »

Examinons d'abord les aspects de raisonnement 21n et 22n qui concernent l'intensité du courant qui traverse la pile. L'aspect 21n correspond à une situation de circuit ouvert et l'aspect 22n à un circuit fermé. Il semble que le générateur soit, pour l'intensité du courant qui le traverse, mieux perçu par les élèves après enseignement du nouveau programme, que le circuit soit ouvert ou fermé ; le progrès le plus net apparaît pour le circuit ouvert (écart de 20%, $p \leq 0,001$) qui n'est plus associé qu'à un très faible taux de réponses « I non nulle », alors que le circuit fermé voit aussi un progrès significatif mais moindre (écart de 9%, $p \leq 0,05$) et correspond encore à 10% de réponses fausses.

La tension qui existe aux bornes d'une pile semble causer plus de difficultés aux élèves. L'aspect de raisonnement 19n, soit la déclaration d'une tension nulle aux bornes du générateur en situation de circuit ouvert, recueillait 53% des réponses en 1993 ; on observe une amélioration, puisque le taux d'occurrence associé tombe à 40% (écart de 13%, $p \leq 0,01$). Mais ce dernier taux est encore important. Ces réponses erronées peuvent s'interpréter par une adhérence courant-tension appliquée au générateur, qui apparaît très résistante.

L'aspect 20n, soit la déclaration d'une tension nulle aux bornes de la pile en circuit fermé augmente son score, mais pas de façon significative.

Quant à ce que deviennent les électrons lorsque le circuit est ouvert, les réponses à la question 7A (encadré 4) montrent que pour un élève sur 5 environ, les électrons retournent dans la pile (proposition 1) qui apparaît comme un réservoir d'électrons. Cette conception a subi une augmentation significative en passant de 14% à 23% des réponses (écart 9%, $p \leq 0,01$).

Parfois le raisonnement séquentiel semble s'adapter au circuit ouvert par l'une des réponses doubles suivantes (27% en 1993 et 20% en 1994) :

- les électrons retournent dans la pile **et** sortent du fil en A (ou en B),
- les électrons retournent dans la pile **et** restent dans le fil,
- les électrons restent dans le fil **et** sortent du fil en A (ou en B).

Ainsi les électrons quittent le générateur mais tous ne peuvent y retourner : gênés par l'interrupteur ouvert, ils s'écoulent ou restent dans le fil en amont de l'obstacle et s'ils ont déjà franchi l'interrupteur au moment de l'ouverture, ils terminent leur parcours jusqu'au générateur.

Si l'on totalise les réponses choisissant la proposition 1 et les réponses doubles citées, c'est-à-dire les réponses montrant une compréhension erronée de la circulation électronique, le score passe de 28% en 1993 à 36% en 1994 (augmentation significative de 8%, avec $p \leq 0,05$).

7A - Le circuit représenté ci-contre contient une pile, une ampoule, un interrupteur et des fils de connexion. L'interrupteur est initialement fermé comme sur la figure 1. Un courant d'électrons parcourt le circuit.

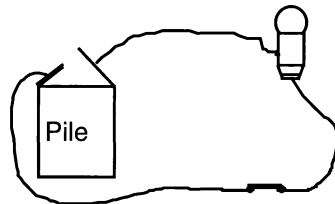


Figure 1

On ouvre l'interrupteur comme sur la figure 2. Que deviennent alors ces électrons ?

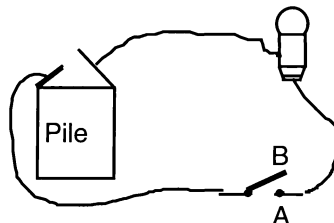


Figure 2

Répondez par « vrai » ou « faux » aux affirmations suivantes et justifiez vos réponses :

1) – Les électrons retournent tous dans la pile : VRAI FAUX

.....

2) – Les électrons restent tous dans le fil : VRAI FAUX

.....

3) – Les électrons sortent en A : VRAI FAUX

.....

4) – Les électrons sortent en B : VRAI FAUX

.....

5) – Autre réponse :

.....

Encadré 4 : Questionnaire concernant le devenir des électrons quand le circuit est ouvert

En bref, le générateur sur lequel le programme de 1993 met un accent particulier en insistant sur son rôle de « moteur » de l'ensemble des charges en circuit fermé et sur le fait qu'il est alors traversé par le courant, semble bénéficier d'une meilleure compréhension déjà remarquée dans l'analyse des réponses du thème précédent. Mais ce progrès se manifeste de façon relativement discrète d'une année sur l'autre. L'existence d'un courant dans le générateur en circuit ouvert est moins volontiers affirmée, tandis qu'elle est moins souvent niée dans le cas du circuit fermé. En revanche, les réponses justes concernant la tension aux bornes du générateur sont stables, que le circuit soit ouvert ou fermé, avec une proportion inférieure à 20% des deux populations interrogées.

5. CONCLUSION

Les résultats qui ressortent de cette étude sont à prendre avec précaution. Plusieurs raisons font que les élèves et enseignants qui ont participé à cette enquête ne sont sans doute pas complètement représentatifs de l'ensemble concerné : d'une part, le nombre d'élèves interrogés n'est pas assez important et surtout le nombre de maîtres impliqués reste faible. Si donc les différences observées sont significatives, il n'est pas certain, et de loin, que le changement de programme soit le seul

facteur déterminant. Ces résultats constituent cependant des indicateurs de tendance, les points qu'il convient de retenir prioritairement étant sans doute les effets différentiels d'une question à l'autre (par exemple entre circuit ouvert et circuit fermé).

Ainsi les points sur lesquels le programme de 1993 met l'accent semblent bénéficier de progrès appréciables, comme en témoigne l'avancée importante de la notion de circuit série fermé avec la même intensité du courant en tout point. Mais on apprend surtout que les écarts les plus sensibles concernent la situation de circuit série fermé. Pour le circuit ouvert, après la mise en oeuvre de ce programme, le raisonnement séquentiel subit un léger recul mais persiste pour environ la moitié des élèves. Cette constatation se maintient après l'enseignement d'électricité de seconde.

Ce résultat mérite l'attention. Il est à rapprocher du fait que la littérature sur les conceptions en électricité s'intéresse peu à la compréhension par les élèves de l'absence de courant dans toutes les portions d'un circuit ouvert. Il faut alors éviter de penser que la conservation du courant, pour dire vite, est une affaire réglée lorsqu'elle se révèle acquise dans le cas standard où la valeur correspondante est non nulle parce que le circuit est fermé.

De même, ces résultats rappellent qu'une vision systémique du circuit n'est absolument pas garantie par des réponses correctes à propos de l'indication d'ampèremètres situés respectivement avant et après une ampoule dans un circuit série.

La faible progression dans la compréhension du générateur, comparée par exemple à celle de la situation que l'on vient d'évoquer, témoigne abondamment de ce que, comme le disait Closset (1983), le raisonnement séquentiel s'adapte mais ne disparaît pas pour autant.

Dans cette difficile accession à une vision systémique du circuit, le rôle du générateur apparaît comme un élément tout à fait crucial, en l'occurrence comme un obstacle. Les quelques indications dont nous disposons sur ce qu'il advient des charges mobiles quand on ouvre un circuit méritent réflexion. Si le générateur n'est pas une réserve de charges qui se déplacent sous l'influence de leurs « excès » et « défaut » respectifs, reste à comprendre le lien entre générateur et déplacement de charges. La solidarité de ces charges en mouvement, bien nettement niée par les commentaires que nous avons cités plus haut, est pourtant un élément clé, charnière entre la compréhension des deux thèmes d'étude développés dans cet article : courant et générateur. Les analogies proposées par Closset (1983), Johsua & Dupin (1989) ont le mérite de souligner cette solidarité, à travers l'image d'une courroie de transmission. De cette manière ou d'une autre, il faudrait parvenir à en assurer la compréhension chez les élèves.

Alors, peut-être, leur serait-il inconfortable de penser que le courant circule dans certaines parties du circuit et pas dans d'autres, en circuit ouvert.

Remarquons que lors d'une enquête sur les réactions des maîtres à la lecture du programme de 1993 (Couchouron et al., 1996), le rôle du générateur était apparu comme le grand oublié. Cette lacune dans la transmission des intentions didactiques sous-jacentes au texte officiel tombait donc bien mal. Il faut, nous semble-t-il, en retenir l'importance, et ne pas se priver de mettre la situation de circuit ouvert à contribution pour développer une réflexion systémique.

BIBLIOGRAPHIE

BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1993). Prénance de l'explication électrostatique dans la construction du concept de circuit électrique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, n° 2, pp. 31-47.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Programmes des classes de quatrième et quatrième technologique*, n° 31, pp. 2086-2112.

CHAUVET F. (1996a). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, n° 8, pp. 61-79.

CHAUVET F. (1996b). *Teaching colour : designing and evaluation of a sequence*. *European Journal of Teacher Education*, vol. 19, n° 2, pp. 119-134.

CLOSSET J.-L. (1983). Sequential reasoning in electricity. In *Research on Physics Education. Proceedings of the First International Workshop*. La Londe les Maures, Éditions du CNRS, pp. 313-319.

CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 931-950.

COUCHOURON M., VIENNOT L. & COURDILLE J.-M. (1996). Les habitudes des enseignants et les intentions didactiques des nouveaux programmes d'électricité de quatrième. *Didaskalia*, n° 8, pp. 81-96.

DUIT R., GOLDBERG F. & NIEDDERER H. (Éds) (1991). *Research in physics learning : Theoretical issues and empirical studies*. Kiel, Institute for Science Education.

GROUPE TECHNIQUE DISCIPLINAIRE DE PHYSIQUE (1992). *Document d'accompagnement pour la classe de quatrième*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.

HÄRTEL H. (1993). New approach to introduce Basic Concepts in Electricity. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*, NATO ASI, Séries F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 5-21.

HIRN C. (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique de quatrième ? *Didaskalia*, n° 6, pp. 39-54.

JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique (essai de didactique expérimentale)*. Thèse d'État, Marseille, Université de Provence.

JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.

RAINSON S. (1995). *Superposition des champs électriques et causalité : « Étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques »*. Thèse, Université Paris 7.

SALTIEL E. & KAMINSKI W. (1996). Un exemple d'évaluation des nouveaux programmes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 786, pp. 1271-1287.

SALTIEL E. (1978). *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : étude de la compréhension des changements de référentiels galiléens par les étudiants en sciences*. Thèse d'État, Université Paris 7.

SHIPSTONE D.M., RHÖNECK C., VON JUNG W., KÄRRQVIST C., DUPIN J.-J., JOSHUA S. & LICHT P. (1988). A study of secondary students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, n° 10, pp. 303-316.

VIENNOT L. (1977). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Thèse d'État, Université Paris 7.

Cet article a été reçu le 5/03/98 et accepté le 18/09/98.

Étude, en inter-didactique des mathématiques et de la physique, de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité

Study, in inter-didactics of mathematics and physics, about acquisition of Ohm's law in high school : space of reality

**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, France.

Résumé

La question de déterminer sous quelles conditions des concepts élaborés dans le champ de la didactique d'une discipline donnée sont transposables à la didactique d'une autre discipline est régulièrement posée par de nombreux chercheurs. Pour notre part, nous nous sommes intéressés aux relations entre les mathématiques et la physique, en prenant l'exemple de la loi d'Ohm, première loi physique écrite et représentée sous forme mathématique au collège et au lycée en France. Pour rendre compte de nos observations, nous avons été amenés à définir un modèle théorique s'appuyant sur les notions de cadre et de registre développées de manière

spécifique en didactique des mathématiques, en leur adjoignant pour la didactique de la physique une notion nouvelle, celle d'espace de réalité.

Mots clés : *inter-didactique mathématique / physique, cadre de rationalité, registre, espace de réalité.*

Abstract

Many researchers have asked the question whether and in what conditions the didactic concepts in a given discipline can be transposed to another. We have examined the relations between mathematics and physics, taking Ohm's law as an example, the first law of physics written and represented in mathematical form in French high school. Our observations led us to define a theoretical model based on two didactical notions developed specifically in mathematics frame and register by adding a new element taken from physics which we call space of reality.

Keys words : *physics and mathematics relations, frame, register, space of reality.*

Resumen

La posibilidad de determinar bajo qué condiciones los conceptos elaborados en el campo de la didáctica de una disciplina pueden ser transpuestos a la didáctica de otra materia, es una pregunta que se hacen numerosos investigadores. Por nuestra parte, nos interesamos en las relaciones entre la matemática y la física, tomando en cuenta el ejemplo de la ley de Ohm, primera ley física escrita y representada bajo una forma matemática en los colegios y liceos franceses. Para presentar nuestras observaciones, nos vimos en la necesidad de definir un modelo teórico apoyándonos en las nociones de cuadro y registro desarrolladas de manera específica en didáctica de la matemáticas, agregándole para la didáctica de la física una nueva noción, la de espacio de realidad.

Palabras claves : *inter-didáctica matemática / física, cuadro de realidad, registro, espacio de realidad.*

1. INTRODUCTION

Depuis quelques années, les travaux inter-didactiques sont d'actualité. Ainsi, Caillot & Raisy (1996) se sont interrogés de manière générale sur la constitution d'un champ commun aux diverses didactiques : le didactique. De son côté, Arsac (1995) a posé plus particulièrement la question du transfert de la théorie des situations (Brousseau, 1986) au sujet

d'une étude sur la concentration molaire en classe de première scientifique (Tsoumpelis & Gréa, 1995).

De notre côté, nous avons centré nos recherches sur l'interface mathématiques / physique en nous proposant de montrer jusqu'à quel point certains concepts élaborés en didactique des mathématiques peuvent être féconds pour analyser en classe de physique les difficultés observées chez les élèves dans l'utilisation d'acquis du cours de mathématiques. Cette recherche s'inscrit dans l'évolution des programmes scolaires. En effet, les « outils mathématiques » sont de plus en plus nécessaires à l'enseignement de la physique, et les instructions des programmes de mathématiques privilégient la question du sens, en insistant sur la nécessaire référence aux situations concrètes, tout particulièrement celles de la physique. Par exemple, dans le programme de première scientifique (section S, pour élèves de 16-17 ans) il est indiqué : « *Comme en seconde (15-16 ans), on mettra en valeur l'utilité du concept de fonction pour l'étude des phénomènes continus ; on exploitera largement des situations issues de l'algèbre, de la géométrie, des sciences et des techniques et de la vie économique et sociale, en marquant les différentes phases : modélisation, traitement automatique, contrôle et exploitation des résultats* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1991, p. 39) ou bien : « *À travers quelques exemples issus de la mécanique et de la physique, on montrera que l'intérêt du calcul vectoriel ne se limite pas à la géométrie* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1991, p. 45). En terminale scientifique (section S, pour élèves de 17-18 ans), il est dit : « *Pour l'étude des fonctions, on s'appuiera conjointement sur les interprétations graphiques $y = f(x)$, électriques (signaux relatifs à l'évolution d'une intensité, d'une différence de potentiel...) et biologiques (évolution d'une population, d'un taux de concentration...)* » (Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, 1994, p. 49).

La question du sens des savoirs scolaires apparaît aujourd'hui fondamentale au regard des problèmes que posent les nouvelles populations scolarisées. De ce point de vue, le sens de nombreux concepts mathématiques enseignés au collège et au lycée renvoie implicitement à des objets et situations de la physique à partir desquels ils ont été historiquement construits. Cette relation entre les mathématiques et la physique sur la question du sens pose, sur le fond, l'intérêt de recherches inter-didactiques sur la conceptualisation.

Pour notre part, nous avons choisi la loi d'Ohm comme support à ce travail de recherche, car c'est une des premières lois physiques écrites sous forme mathématique que les élèves français rencontrent dans leur cursus scolaire. Elle donne lieu à une étude expérimentale (au cours de laquelle les élèves construisent des circuits électriques, procèdent à des mesures d'intensités et de tensions) mais aussi à un travail de modélisation

de type inductif qui fait passer d'un ensemble de valeurs numériques (et/ou de points) à une relation de proportionnalité (et/ou à sa traduction graphique par une droite), pour aboutir à la formule $U = R.I$ qui relie la tension U aux bornes de l'objet à l'intensité I du courant qui le traverse. La constante R est appelée résistance électrique de l'objet.

Dans le discours des enseignants que nous avons interviewés, cette opération de modélisation, conforme aux principes directeurs des programmes (1993), se justifie par le fait qu'elle permet une prise de distance conceptuelle de l'élève par rapport au phénomène physique observé. Or, pour les élèves, il semble que l'écart entre la réalité physique et sa présentation fonctionnelle en mathématique génère un certain nombre de difficultés. Pour pouvoir les analyser, nous proposons un modèle d'approche des processus de conceptualisation en inter-didactique des mathématiques et de la physique reposant sur les notions de cadre (Douady, 1984), de registre sémiotique (Duval, 1988) et de cadre de rationalité (Lerouge, 1992) déjà mises en œuvre en didactique des mathématiques. Notre objectif n'est donc pas d'étudier les difficultés dues à l'appropriation des concepts de courant et de tension électriques, ce qui a déjà fait l'objet de nombreuses publications (Closset, 1989 ; Johsua, 1985), mais plutôt d'analyser les procédures mises en jeu au cours du passage de la réalité expérimentale au modèle mathématique, en montrant pourquoi cette opération extrêmement complexe n'est pas réductible à un simple changement de cadre entre l'électrocinétique et l'algèbre linéaire.

Pour tester et affiner notre modèle, nous avons mené une expérimentation en classe de troisième (14-15 ans) qui a permis d'identifier, par analyse *a priori*, trois points particuliers nécessitant la mise en place d'observations didactiques :

- 1° l'influence de la perception de la nature des objets sur l'activité de production d'un schéma de circuit électrique ;
- 2° la recherche de régularités numériques et le passage à une « formule physique » traduisant la loi d'Ohm, à partir d'un ensemble de nombres correspondant aux mesures expérimentales des diverses tensions et de l'intensité d'un circuit série simple ;
- 3° la représentation graphique de la loi d'Ohm sous forme d'une droite passant par l'origine du repère (U, I) et la détermination graphique de la résistance du résistor.

Les deux derniers points de cette expérimentation sont développés par ailleurs (Malafosse et al., à paraître). Cet article s'intéresse uniquement au premier de ces trois thèmes. Nous y présentons d'abord quelques recommandations officielles concernant les relations mathématiques / physique d'une part, et l'introduction de la loi d'Ohm dans les manuels

scolaires français d'autre part. Puis, pour éclairer au niveau didactique les antagonismes et complémentarités épistémologiques entre les mathématiques et la physique, nous introduisons les concepts de cadre, de registre sémiotique et de cadre de rationalité, et nous définissons la notion complémentaire d'espace de réalité. Enfin, nous montrons la pertinence de ces notions en didactique de la physique en nous appuyant uniquement sur la première partie de l'expérimentation.

2. BREF HISTORIQUE

2.1. À propos des liens mathématiques / physique

Dès le début du siècle, la préoccupation d'un enseignement scientifique digne de ce nom transparait dans les programmes du secondaire français consécutifs à la réforme de 1902 visant à mettre en place une culture scientifique de référence opposable aux humanités classiques. Le positivisme ambiant fait que cet enseignement scientifique est conçu comme devant avoir un caractère expérimental très marqué même en ce qui concerne les mathématiques. La séparation entre l'analyse des phénomènes et l'établissement des lois empiriques par les physiciens expérimentateurs et la synthèse par les physiciens mathématiciens repose sur l'inductivisme considéré alors comme caractéristique aussi bien des processus de la recherche que des méthodes d'enseignement. Dans les conseils généraux du programme de Sciences Physiques de 1902, on peut lire que « *l'enseignement de la physique et de la chimie dans le premier cycle devra rester très élémentaire et d'un caractère pratique. Il sera toujours fondé sur des expériences* » (Arrêté du 31 mai 1902, p. 816). Pour la classe de seconde on trouve : « *... en évitant les développements mathématiques, il [l'enseignement de sciences physiques] doit toujours être fondé sur des expériences ... [le professeur] utilisera fréquemment les représentations graphiques, non seulement pour mieux montrer aux élèves l'allure des phénomènes, mais pour faire pénétrer dans leur esprit les idées si importantes de fonction et de continuité* » (Arrêté du 31 mai 1902, p. 822).

Dans les instructions de 1905 relatives à l'enseignement des mathématiques concernant l'algèbre, il est précisé : « *L'étude des variations d'une fonction sera accompagnée d'une représentation graphique aussi exacte que possible. La courbe une fois tracée, servira à déterminer une coordonnée en fonction de l'autre ; la comparaison des résultats graphiques aux nombres calculés directement permettra de faire apprécier l'importance de la précision dans le dessin et habituera ainsi l'élève à se rendre compte de la grandeur de l'approximation que peut donner le procédé graphique* » (Arrêté du 27 juillet 1905, p. 706). En géométrie : « *... on aura ainsi l'occasion*

de montrer qu'il y a deux certitudes d'ordres différents ; l'une expérimentale, qui appartient aux sciences physiques ; l'autre logique, qui est celle des vérités mathématiques ; mais il y aurait un grave inconvénient à donner à cette dernière une importance qu'elle n'a pas dans la réalité et à jeter le discrédit sur la première qui, il faut bien l'avouer, est la seule que nous possédions puisque les principes mathématiques n'ont pas d'autres fondements, tout au moins pour les élèves. Ce qu'il importe de faire ressortir, c'est l'importance du raisonnement logique pour réduire au minimum les faits expérimentaux » (Arrêté du 27 juillet 1905, p. 707).

Il est intéressant de noter que lorsqu'une modification (1905) du programme de mathématiques de terminale est susceptible d'avoir des répercussions sur le programme de physique, le Ministère précise dans une circulaire (23 mars 1906) :

« 1° les professeurs de mathématiques devront être invités à commencer leurs cours par la cinématique, qui leur demandera tout au plus une dizaine de leçons ;

2° les professeurs de physique devront être invités à ne commencer la physique qu'une fois la cinématique terminée. En attendant, ils feront uniquement de la chimie » (Circulaire du 23 mars 1906, p. 216).

Ceci montre le lien très fort qui existe entre les programmes de mathématiques et de physique, proposés alors simultanément, il est vrai, dans le cadre d'une restructuration globale de l'enseignement secondaire.

On constate que, dans les principes généraux, les mathématiques et la physique sont considérées depuis près d'un siècle comme des matières d'enseignement complémentaires et à coordonner. Ces intentions de principes sont-elles prises en compte dans les manuels sur le thème particulier de la loi d'Ohm ?

2.2. Évolution de la présentation de la loi d'Ohm dans les manuels scolaires

En 1902, la loi d'Ohm est introduite à la fois en classe de troisième moderne (sans langues anciennes) (14-15 ans) et en première scientifique (sections C et D) dans un alinéa : « *Résistance ; loi d'Ohm ; courants dérivés* ». Il est à noter que les programmes de sciences physiques ne subiront pas de modifications majeures jusque dans les années 70. Au début du siècle un certain nombre d'ouvrages peut servir de référence pour la constitution de manuels d'enseignement. Par exemple, le « Précis de Physique » de l'Inspecteur Général Fernet, qui dans le chapitre « Électricité dynamique » consacre, dans une partie intitulée « Lois des courants », un

paragraphe à la loi d'Ohm : « *L'intensité du courant produit par une pile dépend à la fois de la force électromotrice E de la pile et de la résistance totale du circuit (pile et circuit extérieur). Ohm a établi par le raisonnement les deux lois suivantes, connues sous le nom de lois d'Ohm. Ces lois ont été d'ailleurs vérifiées par l'expérience : 1° L'intensité du courant est proportionnelle à la force électromotrice de la pile en circuit ouvert ; 2° Elle est inversement proportionnelle à la résistance totale du circuit (...)* » (Fernet, 1903, p. 323).

Cette façon de présenter la loi d'Ohm comme obtenue suite à un raisonnement avalisé par l'expérience est assez unique en son genre. Tous les manuels adopteront une présentation dans laquelle des expériences minutieusement décrites précèdent ou suivent les énoncés des lois. Par exemple, dans l'ouvrage de Lemoine & Vincent destiné aux classes de première, un chapitre intitulé « Loi d'Ohm – Résistance » comporte un premier paragraphe « Objet des lois d'Ohm » qui s'appuie sur l'analogie hydraulique : « *Une différence de potentiel V étant établie et maintenue par un procédé quelconque entre deux points, quelle est l'intensité du courant qu'on peut faire circuler dans une canalisation établie entre ces deux points ? Une question analogue en hydrodynamique est la suivante ; deux bassins présentent une différence de niveau égale à 20 mètres, par exemple ; en utilisant cette différence de niveau, quel débit peut-on obtenir dans un tuyau reliant les deux bassins ?* » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 270).

Remarquons que cette analogie a persisté dans de nombreux ouvrages récents jusqu'à ce que soit pris en compte un certain nombre de travaux de didactique mettant en évidence « *que les élèves et les étudiants éprouvent pratiquement les mêmes difficultés lorsqu'ils doivent analyser le fonctionnement d'un circuit hydraulique que celles qu'ils rencontraient dans l'étude des circuits électriques* » (Closset, 1995, p. 54).

Après un paragraphe intitulé « Recherche expérimentale », les paragraphes suivants dans lesquels chaque fois sont présentées des expériences énoncent les lois d'Ohm ainsi :

- « *Première loi.* – *L'intensité du courant est proportionnelle à la différence de potentiel*
- Deuxième loi.* – *L'intensité du courant est inversement proportionnelle à la longueur du fil*
- Troisième loi.* – *L'intensité du courant est proportionnelle à la section du fil ...*
- Quatrième loi.* – *L'intensité du courant dépend de la nature du fil* » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 226),

jusqu'au dernier paragraphe de ce chapitre, intitulé « Unité de résistance :

ohm. », et qui mentionne que « *la loi d'Ohm peut s'écrire ; $I \text{ ampères} = \frac{V \text{ volts}}{R \text{ ohms}}$, ou encore $V \text{ volts} = I \text{ ampères} \cdot R \text{ ohms}$ » (Lemoine & Vincent, 1905, p. 226). Il faut noter que les relations de proportionnalité indiquées ne sont exemplifiées chaque fois que par trois mesures différentes et jamais par une courbe, ce qui finalement est en contradiction avec les recommandations sur les représentations graphiques, accompagnant le programme.*

Il faut attendre l'ouvrage de Faivre-Dupaigre & Carimey (1913) pour trouver quelques représentations graphiques, notamment celle représentant la variation du potentiel le long d'un fil métallique en fonction de la distance à un point pris comme origine, de divers points du fil.

En 1931, dans un ouvrage de Faivre-Dupaigre, Lamirand & Barrée, il est de plus indiqué, pour une courbe équivalente, que le coefficient angulaire négatif de la droite tracée correspond au courant traversant le fil. Cet ouvrage est intéressant car il propose également des exercices pratiques sur l'ensemble du programme de physique. Mais, concernant la loi d'Ohm, aucun de ces exercices ne prévoit de tracer une courbe de la tension en fonction du courant. Les seules courbes de ce type concernent les générateurs (Fraudet, 1931 ; Eurin & Guimiot, 1952) et/ou les récepteurs (Eurin & Guimiot, 1952).

Ce n'est qu'à la fin des années 70 que l'on trouve le terme de « caractéristique » pour la représentation graphique courant-tension dans, par exemple, l'ouvrage de Saison et al. (1978) qui en présente de nombreux tracés (dipôles passifs et actifs) et montre leur intérêt dans la recherche d'un point de fonctionnement. Mais, pendant la même période, la réforme dite des mathématiques modernes va introduire une coupure certaine entre les mathématiques abstraites enseignées et leur possible application à la physique, même si les promoteurs de cette réforme insistent sur la nécessité de s'appuyer sur « *une expérience concrète, riche et variée, voire nécessaire à l'abstraction* » (Trabal, cité par Belhoste et al., 1996, p. 103). La contre réforme des années 80 ramènera sur certains points une conception utilitariste des mathématiques enseignées au lycée, mais sans retrouver cependant la forte corrélation avec les programmes de physique imposée en 1902-1905.

2.3. Conclusion

Depuis près d'un siècle, les programmes officiels et les recommandations qui les accompagnent se soucient de coordonner l'enseignement de la physique et celui des mathématiques. La nécessité

de cette coordination semble reposer sur la complémentarité des deux disciplines dont l'enseignement simultané serait source de synergie au cours des apprentissages. Pourtant, les documents d'accompagnement des nouveaux programmes ne font jamais allusion à la différence de nature des objets conceptuels manipulés dans les deux disciplines, pas plus qu'à une divergence entre leurs rationalités. Néanmoins, ce début d'approche multidisciplinaire semble faire dépasser aux mathématiques et à la physique les rôles qui leur semblaient définitivement dévolus, à savoir celui de « discipline outil » pour les mathématiques vis à vis de la physique, cette dernière servant de « discipline d'application » aux premières. Mais cette évolution dialectique des consignes officielles ne se retrouve pas au niveau des manuels scolaires qui postulent la transparence des « outils mathématiques » lorsqu'ils sont utilisés par les élèves en physique.

La question se pose donc de savoir si les mathématiques telles qu'elles sont enseignées (autrement dit la construction de concepts dans l'enseignement des mathématiques) aident l'élève dans son activité de construction de concepts en physique, et comment ? Cette question est très générale. Aussi, dans un premier temps, nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure les modèles permettant d'étudier les phénomènes de conceptualisation en mathématiques étaient pertinents en physique.

3. ÉLÉMENTS D'ANALYSE DES PHÉNOMÈNES DE CONCEPTUALISATION EN DIDACTIQUE DES MATHÉMATIQUES

Nous avons choisi les concepts de « cadre », de « registre sémiotique », et de « champs conceptuels », qui se sont révélés pertinents dans l'analyse des phénomènes de conceptualisation en mathématiques parce qu'ils nous semblaient transposables en didactique des sciences expérimentales.

3.1. Les notions de « cadre » et de « registre sémiotique »

3.1.1. La notion de « cadre »

Pour Douady, un **cadre** est « constitué des objets d'une branche des mathématiques, des relations entre les objets, de leurs formulations éventuelles diverses et des images mentales associées à ces objets et ces relations » (Douady, 1984, p. 135). Plus tard, cet auteur précise la référence faite aux « images mentales » : « La référence naïve aux images mentales

est seulement l'indice que le chercheur fait partie de la définition du cadre, et qu'un transfert en didactique de cette notion demande d'y inclure l'acteur : maître, élève ou chercheur. Cela conduit à envisager la notion de cadre selon au moins trois dimensions : une dimension mathématique, une dimension socioculturelle, une dimension individuelle, chacune indexée par le temps » (Douady, 1992, p. 136). Cependant, si les changements de cadre entre différentes branches des mathématiques savantes ou scolaires s'avèrent pertinents pour construire des concepts en mathématiques savantes ou scolaires dans le contexte d'une dialectique outil/objet, ils s'avèrent difficilement transposables tels quels en physique. En effet, dans cette discipline, le statut des objets n'est pas le même qu'en mathématiques, car la construction des concepts se fait en référence à l'environnement expérimental que nous montrerons non modélisable sous forme d'un cadre. Par contre, la prise en compte des images mentales telle qu'elle est envisagée par Douady peut expliquer pourquoi les apprenants ont beaucoup de mal à décontextualiser des savoirs et à utiliser, notamment en physique, des notions récemment acquises en mathématiques.

3.1.2. La notion de « registre sémiotique »

« *Les objets mathématiques ne doivent jamais être confondus avec la représentation qui en est faite* » (Duval, 1993, p. 37). Cette citation de Duval présentant la distinction entre un objet et sa représentation sémiotique comme « *un point stratégique pour la compréhension des mathématiques* » (Ibid., p. 37) montre bien que l'activité cognitive demandée aux élèves en mathématiques est tout à fait paradoxale. En effet, l'objet mathématique 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 pour qui un **registre (sémiotique)** 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.

De ce point de vue, en mathématiques ou en physique, on peut repérer les registres suivants : la langue naturelle, un système d'écriture symbolique, le graphique cartésien, les figures géométriques, les tableaux de données, etc. Pour Duval, « *la compréhension (intégrative) d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité cognitive de conversion* » (Duval, 1993, p. 51), d'où l'importance de la mise en congruence d'unités significatives entre divers registres pour permettre l'activité de conversion. Par exemple, dans le cadre de l'analyse en mathématiques, le fait de mettre en correspondance le signe du coefficient directeur d'une droite dans le registre de l'écriture formelle des fonctions et l'inclinaison de cette droite dans le registre graphique établit une congruence entre les deux registres qui facilitera, dans d'autres situations, le passage automatique de l'un à l'autre, mais surtout l'appropriation du concept de croissance. Sans ces congruences automatisées, le sujet opère selon une approche mono-registre qui l'empêche de détacher le signifié du signifiant qui le représente.

3.2. La notion de « cadre de rationalité »

Lerouge (1992), prenant en compte ces deux aspects de la conceptualisation et intégrant, de plus, la dualité processus de conceptualisation « *du quotidien* » / processus de conceptualisation « *scientifiques* » mise en évidence par Vygotski (1934), introduit la notion de **cadre de rationalité**.

Un cadre de rationalité est un ensemble cohérent du fonctionnement de la pensée caractérisé par quatre composantes : son monde d'objets, ses processus de conceptualisation, ses règles de raisonnement et de validation, et enfin ses registres de signifiants. Pour lui, c'est au sein de cette structure que prennent sens, de manière dialectique, les informations sémiotiques et situationnelles. Les processus de conceptualisation en classe de mathématiques sont ainsi gérés à un instant donné par deux cadres de rationalité inter-réagissant : le cadre familial de l'élève, et le cadre culturel des mathématiques au sens de Douady.

À titre d'exemple nous présentons dans le tableau 1 suivant comment se modélisent les différences essentielles entre le cadre mathématique et le cadre familial d'un élève de collège en ce qui concerne les processus de conceptualisation de la droite au début de la classe de quatrième (13-14 ans).

	Monde d'objets	Processus de conceptualisation	Règles de raisonnement et de validation	Registres de signifiants
Cadre familial	Matériel : un bord de règle	Ascendant : de l'objet matériel au signe qui le représente	Par constat : mesurage sur dessin, fréquence de répétition	Figures
Cadre mathématique	Idéal un trait sans épaisseur	Descendant : du signe abstrait à l'objet idéal	Par déduction logique : théorème ou contre exemple	géométriques

Tableau 1 : Différences de conceptualisation dans deux cadres

Ainsi, sur cet exemple, le cadre de rationalité familial se trouve fondamentalement en rupture avec le cadre de rationalité mathématique. En particulier, si le registre des figures géométriques intervient dans les deux cadres, il ne renvoie pas du tout aux mêmes signifiés. Dans le premier cadre, la droite est identifiée au trait droit dessiné avec la règle, alors que dans le second, il s'agit d'un objet idéal inconnu que le trait droit sert à conceptualiser. Par la suite, le cadre scientifique auquel nous ferons référence sera assimilé au cadre culturel des mathématiques ou de la physique c'est-à-dire un ensemble cohérent de concepts, des modes de rationalité et des registres de signifiants. Le cadre familial, quant à lui, devra être considéré comme le lieu de production de l'activité intellectuelle du sujet pensant avec son ensemble de représentations familières des objets perçus, ses conceptions structurées, ses modes de rationalité et ses registres de signifiants.

3.3. La notion « d'homomorphisme » et les phénomènes de contagion

Dans le contexte de l'analyse des processus de conceptualisation en mathématiques, Vergnaud propose une théorie des champs conceptuels et donne une « *définition pragmatique d'un concept* [comme] *un triplet de trois ensembles* :

S : l'ensemble des situations qui donnent un sens au concept (la référence) ;

I : l'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationalité des schèmes (le signifié) ;

L : l'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept : ses propriétés, les situations et les procédures de traitement (le signifiant) » (Vergnaud, 1990, p. 145).

Il insiste sur le fait que « *étudier le développement et le fonctionnement d'un concept au cours de l'apprentissage ou lors de son utilisation, c'est nécessairement considérer ces trois plans à la fois. Il n'y a pas de bijection entre signifiants et signifiés, ni entre invariants et situations. On ne peut donc réduire le signifié ni aux signifiants, ni aux situations* » (Ibid., p. 145).

Il désigne par la notion d'**homomorphisme** entre signifié, signifiant et référence le transport de structures que le sujet peut établir entre ces différents niveaux dans la formation d'un concept. Il précise que cette notion n'est pas une simple métaphore, mais qu'elle permet d'analyser la complexité des processus de conceptualisation en termes de transport sur le signifié de structures propres aux divers systèmes de signifiants ou aux diverses situations ou objets de référence.

Travaillant dans ce contexte théorique, Lerouge (1993) définit les notions de « *contagion de signifiant* » et de « *contagion de référence* » qui désignent le transport par homomorphisme sur le signifié mathématique d'une structure symbolique ou situationnelle erronée :

– il y a **contagion de signifiant**, lorsque le signifié mathématique n'est pas dissocié de son signifiant et que le sujet développe par homomorphisme des propriétés mathématiques aberrantes. C'est par exemple le cas lorsque le nombre de points de l'intersection de deux droites reste assujéti à l'épaisseur des traits dessinés. De même en physique, le fait que deux résistances en série soient présentées géométriquement en parallèle sur un schéma entraîne une contagion de signifiants chez la plupart des élèves du secondaire (Caillot, 1984) ;

– il y a **contagion de référence** lorsque le signifié mathématique n'est pas dissocié de la situation matérielle qu'il modélise et que, par homomorphisme, la conceptualisation mathématique se trouve perturbée par la prégnance de la réalité. C'est, par exemple, le cas lorsque le nombre de points de l'intersection de deux droites sur un graphique de mouvements est considéré comme dépendant de la vitesse relative des mobiles, de leur longueur, ou de leur sens relatif de déplacement. En physique, on peut aussi interpréter de nombreuses conceptions erronées liées au sens commun (Viennot, 1996) comme dues à des contagions de référence.

4. EXTENSION À LA PHYSIQUE

4.1. Le problème de la nature des objets de la physique

L'analyse des processus de conceptualisation appréhendés au travers des notions décrites précédemment est-elle spécifique de l'abstraction du monde des objets mathématiques ou peut-elle être menée dans d'autres domaines d'apprentissage pour lesquels des objets peuvent posséder une réalité certaine, comme en physique ? Pour tenter de répondre à cette question, il est nécessaire de tenir compte de la multitude des différences entre les éléments de rationalité des cadres des mathématiques et de la physique. Ainsi, ces deux cadres diffèrent par :

- la possibilité ou non d'une nature matérielle de certains de leurs objets ;
- les modes d'obtention des informations à traiter (statut expérimental de certaines données de la physique) ;
- les règles syntaxiques et les méthodes de raisonnement comme, par exemple, l'analyse dimensionnelle qui est exclusive des sciences physiques (Malafosse, 1994) ;
- les règles de validation (l'obtention du tracé d'une caractéristique linéaire ne « prouve »-t-elle pas, pour un physicien, que le dipôle étudié est un résistor ?)

Chacun de ces éléments de rationalité est difficilement isolable. Ainsi, en ce qui concerne la nature matérielle ou non des objets, la distinction entre les objets de la réalité et les objets du cadre de la physique est délicate, et le physicien qui manipule physiquement un objet tel qu'un conducteur ohmique n'en est pas moins confronté, très rapidement, à raisonner sur des objets abstraits tels que sa résistance, sa caractéristique, etc. (Ne va-t-on pas jusqu'à confondre sous le mot « résistance » l'objet physique, sa quantité physique caractéristique, et la grandeur dimensionnelle associée ?)

Une réflexion s'impose donc sur la différenciation entre les objets de la réalité, les concepts et quantités abstraits de la physique et les représentations sémiotiques qui en sont faites dans l'enseignement, et c'est essentiellement sur ce point précis que porte la première partie de l'expérimentation que nous analysons ici. Mais cette réflexion de nature didactique est à distinguer de celle menée depuis bien longtemps par les philosophes qui s'intéressent à la nature épistémologique du monde, aux mécanismes de sa perception et à la structure des théories scientifiques : par exemple la thèse de l'impossible distinction entre le monde réel et le monde imaginaire défendue par Berkeley (1710), l'approche dialectique en

termes de « *phénomènes* » et de « *noumènes* » de Kant (1781) ou encore « *le monde des sens, [...] le monde réel [et] le monde de la science* » de Planck (1933, p. 7).

Notre projet concernant l'analyse du fonctionnement des apprentissages en physique, nous souhaitons 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, en nous inspirant des notions de la didactique des mathématiques précédemment décrites. Nous prenons en compte à la fois les objets et les événements car, pour Vergnaud, « *une théorie pragmatique de la référence [...] fait nécessairement appel à deux visions complémentaires du réel ; comme ensemble de situations et comme ensemble d'objets* » (Vergnaud, 1995, p. 181). Ceci nous conduit 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 l'appelons **espace de réalité**.

Prenons un exemple en physique : le fil de cuivre. Le signifié « résistance » n'est couplé à l'objet « fil de cuivre » que dans des situations pour lesquelles l'effet Joule est perceptible et dans le cadre théorique de l'électrocinétique. Les physiciens le savent (implicitement) puisqu'ils ne s'intéressent à la résistance d'un objet que lorsqu'il est parcouru par un courant. La notion d'espace de réalité doit permettre de rendre compte des écarts observés entre les modes de fonctionnement des professeurs de sciences physiques et de mathématiques. En effet, le didacticien de la physique se trouve confronté à un problème délicat ; dans l'hypothèse épistémologique de la réalité du monde physique qui semble consensuellement partagée (tout au moins implicitement) par les communautés des physiciens et par des élèves du secondaire, comment modéliser les difficultés de conceptualisation en se limitant à des changements de registre ou de cadre. Chercher à inclure les objets de la réalité et les situations de référence dans le cadre familier du sujet, au sens de Lerouge, n'est pas possible car nous postulons que la réalité existe hors de la pensée humaine.

4.2. Définition de l'espace de réalité

L'espace de réalité est donc l'ensemble des objets réels et des événements hors de la pensée du sujet et sur lequel porte l'activité mentale de conceptualisation. Le sujet applique à l'espace de réalité les schémas de compréhension issus de son cadre familier de pensée, ou de cadres

culturels scientifiques particuliers. Ainsi on peut considérer que l'acquisition des concepts en physique se fait par prélèvement d'informations dans l'espace de réalité (objets et situations expérimentales créées ou non) et nécessite leur traitement dans divers cadres de rationalité. La notion d'espace de réalité se différencie donc fondamentalement de la notion de cadre en ce sens que l'espace de réalité est externe au sujet alors que le cadre est un espace de pensée interne.

Ainsi, tout élément du monde réel peut être défini comme un invariant trans-cadres, et une situation de référence est le résultat d'une projection d'un événement de l'espace de réalité dans un cadre de rationalité donné. Nous entendons par projection une opération orientée correspondant à l'ouverture d'une fenêtre de lisibilité du réel au cours de laquelle cet élément de l'espace de réalité perd une partie de ses attributs pour devenir un élément de l'espace psychique du sujet. (Le terme projection fait davantage référence au sens mathématique associant à un objet une dimension projetée plutôt qu'au sens psychologique qui traduit une opération allant du mental vers l'objet).

La modélisation est alors la création d'une relation entre les objets projetés de l'espace de réalité et les situations de référence. Par exemple, un objet tel qu'un tuyau de cuivre peut être appréhendé au travers de divers cadres de rationalité : une canalisation dans le cadre familial du plombier, une résistance électrique dans le cadre de l'électricité, une arme dans le cadre familial d'un hooligan, etc. Chaque cadre permet d'atteindre une vision parcellaire de l'objet qui, en tant que tel, dépasse l'ensemble de ses projections, et il est possible que de nouveaux cadres en permettent une vision jusque là ignorée.

La difficulté spécifique du physicien se situe alors dans l'opération de projection de l'espace de réalité sur le cadre culturel de la physique, les conceptions erronées des élèves apparaissant comme une projection de cet espace de réalité dans un cadre de rationalité inadéquat.

5. EXPÉRIMENTATION

C'est au cours d'entretiens semi-directifs auprès d'une douzaine de professeurs stagiaires de sciences physiques au sujet de la loi d'Ohm, entretiens qui avaient pour but de recueillir leurs représentations concernant les phénomènes de conceptualisation de la notion de résistance électrique, que nous sont apparues la pertinence des notions de « cadre » et « registre », mais aussi la nécessité de leur adjoindre l'élément « espace de réalité » tenant compte de la nécessaire référence expérimentale. Ces entretiens ont révélé :

– la conception des stagiaires d'une existence des lois de la physique dans l'espace de réalité et non dans le cadre théorique dans lequel elles ont été élaborées, représentation qui renvoie à une conception métaphysique des lois (Needham, 1973). Ceci relève d'une confusion entre la réalité phénoménologique et le modèle qui la représente dans le cadre de la physique, comme déjà signalé par Martinand (1987) ;

– une surdétermination du cadre mathématique conduisant à négliger l'étude phénoménologique aussi bien dans le choix du dispositif expérimental que dans celui de l'exploitation de la loi et entraînant, de fait, un traitement mathématique complètement décontextualisé ;

– l'ignorance de la spécificité des cadres de la physique et des mathématiques. Ceci se traduit par le fait que les professeurs stagiaires constatent mais ne peuvent interpréter les difficultés des élèves ;

– l'illusion de la transparence du passage du registre graphique au registre algébrique nécessaire lors de l'établissement de l'expression analytique de la loi d'Ohm à partir de la droite précédemment tracée.

Pour aller au-delà de ce constat et tester la pertinence de notre modèle associant la notion d'espace de réalité à celles de cadre et de registre, nous avons monté une séquence d'électricité en classe de troisième d'un collège classé en ZEP¹. La méthodologie retenue a été celle de l'ingénierie didactique que Artigue définit comme « *un schéma expérimental basé sur des réalisations didactiques en classe, c'est-à-dire sur la conception, la réalisation et l'analyse de séquences d'enseignement.* » (Artigue, 1988, pp. 285-286).

5.1. Présentation générale du dispositif expérimental

5.1.1. La méthodologie de l'ingénierie didactique

La classe de vingt-quatre élèves a été scindée en deux demi-classes, elles-mêmes partagées en trois groupes de quatre individus. Trois séances de deux heures ont ainsi été menées avec chacune des deux demi-classes, chaque séance étant structurée en unités de deux étapes. La première, correspondant à une recherche individuelle sur fiche, visait à repérer l'émergence de conceptions ou de procédures, la seconde se déroulant sous forme d'un débat (enregistré) animé par un chercheur à l'intérieur de chaque groupe visait à repérer cette émergence au niveau langagier. L'ensemble de ces deux étapes constitue ce que Lerouge (1992) appelle un « *prélèvement d'émergence* ».

1. ZEP : Zone d'Éducation Prioritaire : zone géographique dont la population socialement défavorisée nécessite et bénéficie de moyens pédagogiques supplémentaires.

5.1.2. Les trois étapes

C'est par analyse *a priori* que nous avons identifié les diverses étapes conduisant à l'obtention de la formulation de la loi d'Ohm et nécessitant la mise en place d'observations didactiques, chacune de ces étapes permettant la mise en œuvre de notre modèle sur un point particulier (tableau 2).

Étape dans la progression de classe conduisant à la formulation de la loi d'Ohm	Étape correspondante dans notre modèle d'analyse des phénomènes de conceptualisation
Influence de la perception de la nature des objets sur les activités de conception d'un circuit électrique et de production du schéma correspondant.	Passage de l'espace de réalité aux cadres de rationalité familier et / ou scientifique.
Recherche de régularités numériques et passage à une « formule physique » traduisant la loi d'Ohm, à partir d'un ensemble de nombres correspondant aux mesures des diverses tensions et intensités d'un circuit série simple.	Passage du cadre physique au cadre mathématique.
Représentation graphique de la loi d'Ohm sous forme d'une droite passant par l'origine du plan (U, I) et détermination graphique de la résistance.	Changement de registres (numérique, analytique et graphique).

Tableau 2 : Les 3 étapes conduisant à la formulation de la loi d'Ohm

5.1.3. Les choix didactiques concernant l'introduction du concept de résistance

L'analyse des programmes scolaires d'électrocinétique depuis près d'un siècle a été réalisée par Johsua qui distingue quatre introductions différentes :

- « *l'introduction électrostatique* » (Johsua, 1994, p. 13) ;
- « *l'introduction énergétique* » (Johsua, 1994, p. 14) ;
- « *l'introduction par le travail des forces électriques* » (Johsua, 1994, p. 15) ;
- « *l'introduction sui generis ou $V/I/R$* » (Johsua, 1994, p. 16).

En ce qui concerne les programmes actuels, Fréchengues & Dusseau (1996) montrent que l'introduction des concepts de

l'électrocinétique en classe de collège (13-15 ans) est une variante de l'introduction électrostatique qui, à la fois, tient compte des résultats actuels de la recherche en didactique de la physique et qui, de plus, est la seule à coupler le concept de résistance à la loi d'Ohm. Deux stratégies expérimentales peuvent alors être mises en œuvre :

- soit on étudie l'influence du matériau et des caractéristiques géométriques (diamètre et longueur pour un objet cylindrique) d'un objet soumis à une tension constante (Khantine-Langlois & Viard, 1997) ;
- soit on étudie l'influence de l'intensité du courant traversant un objet conducteur sur la tension à ses bornes.

L'objectif de recherche de notre première séance étant d'étudier les stratégies mises en œuvre au cours du passage de l'objet de l'espace de réalité aux conceptions d'isolant / conducteur dans le cadre personnel de l'élève, c'est cette dernière option que nous avons retenue. En effet, la première option nécessite le passage par la propriété de résistivité, étape d'abstraction supplémentaire imposant dès le départ le positionnement de l'élève dans le cadre culturel des sciences physiques.

5.2. De l'espace de réalité aux cadres de rationalité familial et/ou scientifique

Pour tester la pertinence de notre modèle, nous avons construit la première séance autour de deux prélèvements d'émergence centrés uniquement sur les rapports qu'entretiennent les élèves avec l'espace de réalité, à propos de la nature plus ou moins conductrice (ou isolante) de tout objet. Cette phase complètement qualitative ne nécessite ni l'appropriation du concept de tension ni quelque appareil de mesure que ce soit. Seules les notions de continuité du circuit et de lien entre l'éclairement d'une lampe et l'intensité circulant dans un circuit série sont nécessaires.

5.2.1. Objets des deux premiers prélèvements d'émergence

Cette première séance s'est déroulée selon des dispositifs un peu différents d'une demi-classe à l'autre.

Pour la demi-classe n° 1, l'enseignant présente un circuit électrique constitué d'une pile électrique, d'un interrupteur, d'une lampe à incandescence adaptée à la tension de la pile, d'une mandarine, d'une pomme de terre, et d'une fourchette, tous ces dipôles étant reliés entre eux par des fils de connexion dans un montage de type série. La lampe ne s'allumant pas à la fermeture de l'interrupteur, les élèves sont invités à interpréter l'expérience et à classer les objets en familles de leur choix.

Ensuite, on leur demande de concevoir des circuits électriques à partir d'un choix mixte de composants électriques et d'objets habituellement identifiés au travers du cadre familier et à faire l'analyse critique de l'emploi ou non par eux de divers objets dans des circuits électriques dont ils proposent le schéma.

Pour la demi-classe n° 2, on demande à chaque élève d'imaginer et de dessiner sur une fiche un (ou des) circuit(s) électrique(s) qu'il pourrait réaliser avec une pile de 4,5 V et avec le matériel contenu dans une valisette. (Ce matériel hétéroclite se compose des mêmes objets que ceux présentés aux élèves du groupe n° 1 mais auxquels on a adjoint une règle métallique, une gomme et un crayon à mine de graphite taillé à ses deux extrémités). Ensuite, on demande à chaque élève de faire un inventaire attentif de tous les objets contenus dans la valisette et de les classer en familles de leur choix.

5.2.2. Productions d'élèves

Aucun élève ne justifie que la lampe ne s'éclaire pas par le fait qu'au moins un des éléments constituant le circuit n'est pas (un bon) conducteur. Ceci nous permet de tirer une première conclusion : un objet non perçu comme appartenant au cadre culturel de la physique (une pomme de terre) ne paraît pas intégrable à une situation de référence de ce cadre (expérience du testeur de conductivité). Cela n'empêche pas la quasi totalité des élèves d'employer des termes « conducteur », « isolant », « laisse » ou « empêche le passage du courant », etc. Tous les élèves regroupent explicitement les objets du cadre familier par opposition aux objets de l'électricité, pour justifier le fait que la lampe ne soit pas allumée. Les commentaires des élèves confirment cela en révélant leur surprise, voire leur incompréhension devant les composants du circuit.

« Cette expérience est bizarre parce qu'elle est faite avec des objets quotidiens alors qu'en général, elles sont assez compliquées. »

« Normalement, le courant ne peut pas passer dans la pomme de terre ou la mandarine. »

« C'est farfelu de faire un circuit avec des objets que l'on utilise couramment. »

Pourtant, il faut insister sur le fait que les composants électriques extrêmement courants mis à la disposition des élèves peuvent aussi être considérés comme faisant partie de leur cadre familier. On voit donc que, pour interpréter cette expérience d'électricité, tous les élèves interrogés isolent *a priori* les objets non habituellement projetés dans le cadre culturel de la physique en leur associant un attribut de non conduction.

5.2.3. Mise à l'épreuve du modèle dans l'analyse des résultats du premier prélèvement d'émergence

Les résultats obtenus après analyse des fiches individuelles de recherche et des six enregistrements vidéo nous invitent à formuler les conjectures suivantes :

– tout objet de l'espace de réalité non projeté habituellement dans le cadre de la physique est considéré comme un intrus dans une expérience de physique. Les cadres de rationalité sont donc les lieux d'identification des objets de l'espace de réalité. Par exemple la distinction des objets en « objets électriques » et « objets non électriques » s'effectue non pas en référence à une situation expérimentale du cadre de la physique, mais sur la base d'une projection de ces objets de l'espace de réalité dans des cadres de rationalité différents. « *La pomme de terre, la fourchette, et la mandarine ne contiennent pas de pôles + et -* ». De plus, les classifications proposées par les élèves indiquent qu'à l'intérieur d'un cadre de rationalité donné, ce sont les situations de référence qui servent de critère de sélection. Ainsi, dans le cadre familier, trois familles d'objets sont clairement identifiées : les objets de l'alimentation, les instruments d'écriture, les métaux ;

– il peut exister un chevauchement partiel du cadre familier et du cadre de la physique. C'est le cas de la fourchette (et dans une moindre mesure de la règle métallique) qui, bien que n'étant pas classée comme objet électrique, est considérée par les élèves à la fois comme un objet familier, mais aussi comme un objet conducteur. « *Ce qui m'interpelle, c'est la fourchette ... c'est que les fils de connexion ne sont pas pareils : d'habitude, ils sont rouges ou noirs* ». « *La fourchette, je comprends un peu parce que c'est du fer et que le fer conduit* ».

Nous pouvons en déduire que, pour un objet donné de l'espace de réalité connu de l'apprenant au travers de son cadre familier, sa mise en situation dans le cadre de la physique ne s'effectue pas spontanément par un simple changement de cadre, mais que le rapprochement des cadres semble néanmoins pouvoir être favorisé par des activités mettant en œuvre quelques objets au statut privilégié qui sont connus des élèves comme ayant une projection dans les deux cadres de rationalité.

5.2.4. Résultats du deuxième prélèvement d'émergence

Les élèves des deux demi-classes révèlent une uniformité remarquable de conceptions du circuit électrique et de ses composants, ce qui permet de dresser une liste des caractéristiques des représentations qu'un élève de classe de troisième se fait de notions électriques :

- le circuit électrique : c'est une chaîne linéaire (de type série) de conducteurs, incluant une pile et parcourue par un courant ;

- le composant électrique : il a deux bornes, il est polarisé et il est toujours conducteur ;

- l'objet du cadre familier : à quelques exceptions près, il n'a pas les attributs de composant électrique ; c'est donc un intrus dans un montage auquel il retire le statut de circuit ;

- le courant électrique : s'il circule dans le circuit, la lampe incluse s'éclairera.

Confrontés à la nécessité de produire un circuit électrique à l'aide de matériel choisi parmi un ensemble d'objets, les élèves s'engagent ou approuvent presque unanimement la stratégie suivante :

- si, parmi les objets dont je dispose pour réaliser un circuit électrique, je trouve une pile et une lampe, alors mon projet implicite sera d'éclairer la lampe ;

- je dois éliminer les objets qui n'ont pas les caractéristiques dipolaires car ils ne sont pas « faits » pour être intégrés dans des circuits électriques (seulement pour ceux qui n'ont pas été témoins de l'expérience magistrale) ;

- je dois sélectionner parmi les objets dotés des caractéristiques dipolaires ceux qui sont connus pour être des composants électriques ou des objets de matériau connu pour sa propriété de conductivité, par exemple les métaux) ;

- le type de montage retenu est le montage série.

En résumé, l'élève de troisième propose comme circuit une chaîne continue, le plus souvent fermée, de conducteurs intégrant les composés électriques et les objets familiers réputés pour être conducteurs. La stratégie type mise en œuvre dans l'activité de proposition d'un circuit électrique nous permet ainsi de mener une comparaison entre les résultats des opérations de projection des objets de l'espace de réalité dans le cadre familier de l'élève de troisième et dans le cadre culturel de la physique. Il semble indéniable que tous les élèves ont une représentation familière des composants électriques présents dans la valisette, tels que la pile électrique et la lampe à incandescence que l'on peut répertorier dans la famille des objets familiers de l'électricité. Ainsi, l'élève de troisième projette certains objets de l'espace de réalité à la fois dans son cadre familier et dans le cadre de la physique. C'est le cas pour la fourchette et pour la règle qui sont reconnues comme métalliques et donc conductrices, mais c'est aussi le cas pour les objets tels que la pile électrique et la lampe à incandescence qui sont considérés comme des objets familiers de l'électricité.

Néanmoins, on ne peut pas parler de superposition de cadres, car le sujet affecte au signifié construit, par projection d'un objet de l'espace de réalité dans un cadre de rationalité donné, des attributs liés à la rationalité spécifique du cadre. Par exemple, la règle métallique est avant tout une règle dans le cadre familial car elle est associée à la mesure de longueur, fonction que peut aussi bien assurer une règle en matière plastique. Par contre, dans le cadre de l'électrocinétique, cette règle métallique est avant tout métallique car elle est identifiée non plus au travers de sa fonction mais au travers du matériau constitutif (conducteur ou isolant). Sa fonction n'est plus un attribut dans le cadre de la physique, alors que son matériau n'est pas un attribut dans le cadre familial.

Nous devons donc admettre que les cadres familial et scientifique sont disjoints tant du point de vue des signifiés (même s'ils sont les projections de mêmes objets) que du point de vue des situations de référence mises en œuvre et que du point de vue des rationalités. Il s'ensuit que l'élève de troisième, en situation de devoir analyser, concevoir ou réaliser un circuit électrique, se trouve confronté aux problèmes suivants :

– soit les objets placés (ou à placer) dans le circuit sont projetés dans le cadre de l'électrocinétique auquel cas l'élève doit pouvoir mettre en œuvre les rudiments conceptuels relatifs au circuit électrique. (« *Je voulais à tout prix que le courant passe, c'est pourquoi j'ai utilisé un objet métallique ... Je n'avais pas envie d'utiliser les autres objets car sinon, ce ne serait pas un montage.* ») ;

– soit l'élève rencontre dans le circuit certains objets qu'il projette uniquement dans le cadre familial. Dans ce cas la juxtaposition de signifiés appartenant à deux cadres de rationalité différentes produit un conflit pouvant conduire à un blocage. (« *C'est farfelu de faire un circuit électrique avec des objets que l'on utilise souvent* » car « *on ne peut pas faire allumer une mandarine, une gomme, un crayon ou une pomme de terre.* ») ;

– soit enfin l'élève rencontre dans le circuit des objets de l'espace de réalité qu'il projette à la fois dans le cadre familial et dans le cadre de rationalité scientifique comme la fourchette ou la règle métallique. Cette double signification permet alors à l'élève de prendre conscience de la possibilité d'extension du champ d'application du concept scientifique. (« *Je voulais que la lampe s'éclaire* » ou « *je voulais utiliser les fruits et légumes pour voir si le courant les traverse beaucoup* »).

6. CONCLUSIONS

Ces résultats montrent que l'espace de réalité, tel que nous l'avons défini, est bien le support sur lequel l'observateur ou l'expérimentateur

s'appuie pour construire sa représentation mentale de la réalité en faisant appel à divers systèmes sémiotiques du cadre choisi. Cette étape fondamentale constitue la mise en forme du problème en physique, étape à laquelle il faut attacher plus un caractère modélisant que chronologique puisque des allers/retours sont effectués entre l'espace de réalité et le cadre d'interprétation à tous les moments de la démarche expérimentale. De plus, il apparaît à travers l'expérimentation réalisée que, lorsqu'un objet donné de l'espace de réalité est repéré par une conception du cadre familier, sa mise en situation dans le cadre de la physique ne s'effectue pas par simple changement de cadre. Elle nécessite un retour vers l'espace de réalité, puis une projection de l'espace de réalité dans le cadre culturel de la physique. C'est le cas des élèves qui, ayant observé que la mine de crayon insérée dans le circuit diminue fortement la luminosité de l'ampoule, se demandent si, finalement, tous les objets ne sont pas plus ou moins conducteurs et testent la mandarine, la gomme, etc.

L'espace de réalité, qui n'a pas de rationalité propre et ne peut être en aucune manière associé à un cadre ou à un registre, peut paraître superflu pour les didacticiens des mathématiques, mais s'avère être un élément indispensable pour modéliser la démarche de construction de concepts en physique.

BIBLIOGRAPHIE

ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 281-308.

ARSAC G. (1995). La didactique des mathématiques est-elle spécifique de la discipline ? *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 15, n° 2, pp. 7-8.

BELHOSTE B., GISPERT H. & HULIN N. (1996). *Les sciences au lycée*. Paris, INRP.

BERKELEY G. (1710). *Les principes de la connaissance humaine*. Paris, Flammarion.

BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-112.

BULLETIN ADMINISTRATIF DU MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE (1902). Programme de 1902, décret relatif au plan d'études secondaires, arrêté du 31 mai 1902. *Bulletin administratif du Ministère de l'Instruction publique*, tome LXXI, n° 1522. Paris, Ministère de l'Instruction publique, pp. 739-856.

BULLETIN ADMINISTRATIF DU MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE (1905). Arrêté portant rectification aux arrêtés du 17 juillet 1905 : Instructions relatives à l'enseignement des mathématiques dans les lycées et collèges de garçons. *Bulletin administratif du Ministère de l'Instruction publique*, tome LXXVIII, n° 1689. Paris, Ministère de l'Instruction publique, pp. 703-710.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1991). Programme de mathématiques de Première L et de Première S. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, n° spécial 2 du 2 mai 1991. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). Programme de mathématiques

- des classes de Terminales. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale, n° spécial 7 du 7 juillet 1994*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie.
- CAILLOT M. (1984). La résolution de problème de physique : représentations et stratégies. *Psychologie française*, vol. 3/4, n° 29, pp. 257-262.
- CAILLOT M. & RAISKY C. (1996). *Au-delà des didactiques : le didactique*. Bruxelles, De Boek.
- CLOSSET J.-L. (1989). Les obstacles à l'apprentissage de l'électrocinétique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 931-950.
- CLOSSET J.-L. (1995). Raisonnements électriques à propos de circuits hydrauliques. In G. Mary & W. Kaminski, (Éds), *Actes du cinquième séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Reims, Université de Reims – Champagne – Ardennes & IUFM de Reims, pp. 39-55.
- DOUADY R. (1984). *Jeux de cadres et dialectique outil-objet*. Thèse d'État, Paris VII.
- DOUADY R. (1992). Des apports de la didactique des mathématiques à l'enseignement. *Repères IREM*, n° 6, pp. 132-158.
- DUVAL R. (1988). Écarts sémantiques et cohérence mathématique ; introduction aux problèmes de congruences. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, n° 1, pp. 7-25.
- 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.
- EURIN M. & GUIMIOT H. (1952). *Physique 1^{re} A et B*. Paris, Hachette.
- FAIVRE-DUPAIGRE J. & CARIMEY E. (1913). *Nouveau cours de physique élémentaire 1^{ère} C et D*. Paris, Masson.
- FAIVRE-DUPAIGRE J., LAMIRAND J. & BARRÉE M. (1931). *Nouveau cours de physique. 1^{re} A, A' et B*. Paris, Masson.
- FERNET E. (1903). *Précis de physique*. Paris, Masson.
- FRAUDET H. (1931). *Physique, Aide mémoire Baccalauréat 1^{ère} partie*. Paris, Hachette.
- FRÉCHENGUES P. & DUSSEAU J.-M. (1996). Les programmes actuels d'électricité en classe de quatrième, troisième et seconde analysés dans une perspective historique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 788, pp. 1615-26.
- HUME D. (1739). *Traité de la nature humaine*. Paris, Aubier.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique (essai de didactique expérimentale)*. Thèse d'État, Aix-Marseille 2.
- JOHSUA S. (1994). Quelques conditions d'évolution d'un objet d'enseignement en physique : l'exemple des circuits électriques (1902 – 1980). In G. Arsac, Y. Chevillard, J.-L. Martinand & A. Tiberghien. *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble, La Pensée sauvage, pp. 9-33.
- KANT E. (1781). *Critique de la raison pure*. Paris, PUF.
- KHANTINE-LANGLOIS F. & VIARD J. (1997). La présentation actuelle de la résistance électrique dans l'enseignement secondaire peut-elle expliquer les difficultés de certains étudiants face à ce concept ? In J. Gréa (Éd.), *Actes du sixième séminaire national de recherche en didactique de la physique*. Lyon, LIRDHiST.
- LEMOINE J. & VINCENT G. (1905). *Cours élémentaire de physique, 1^{re}*. Paris, Belin.
- LEROUGE A. (1992). *Représentation cartésienne, rationalité mathématique et rationalité du quotidien chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- LEROUGE A. (1993). Contagion de signifiant et contagion de référence sur la conceptualisation mathématique de l'intersection de deux droites. *Revue des sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, n° 1-3, pp. 119-135.

MALAFOSSE D. (1994). *Intérêt et limites de l'analyse dimensionnelle dans l'enseignement de la physique en premier cycle universitaire*. Mémoire de DEA, Université Montpellier II.

MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (à paraître). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changements de cadre de rationalité. *Didaskalia*.

MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (à paraître). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de registres sémiotiques. *Didaskalia*.

MARTINAND J.-L. (1987). Modèle et simulation ; en guise d'introduction. In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éd.), *Modèles et simulation : Actes des neuvièmes journées internationales sur l'éducation scientifique*. Paris, Université Paris VII, pp. 34-43.

MINISTÈRE DE L'INSTRUCTION PUBLIQUE ET DES BEAUX-ARTS (1906). Circulaire du 23 mars 1906. *Plan d'études et programmes de l'enseignement secondaire de garçons, douzième édition*. Paris, Vuibert, pp. 215-216.

NEEDHAM J. (1973). *La science chinoise et l'Occident*. Paris, Seuil.

PLANCK M. (1933). *L'image du monde dans la physique contemporaine*. Paris, Gonthier.

SAISON A., ALLAIN G., BLUMEAU M., HERCHEN C., MÉRAT R. & NIARD J. (1978). *Physique 2^e C et T*. Paris, Nathan.

TSOUMPELIS L. & GRÉA J. (1995). Essai d'application de la théorie des situations en sciences physiques. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 15, n° 2, pp. 63-108.

VERGNAUD G. (1981). *L'enfant, la mathématique et la réalité*. Berne, Peter Lang.

VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 10, n° 2-3, pp. 133-170.

VERGNAUD G. (1994). Homomorphisme réel-représentation et signifié-signifiant. *Didaskalia*, n° 5, pp. 25-34.

VERGNAUD G. (1995). Au fond de l'apprentissage, la conceptualisation. In R. Noirfalise & M.-J. Perrin -Glorian (Éds), *Actes de la VI^{ème} École d'été de didactique des mathématiques*. Clermont-Ferrand, ARDM, pp. 174-185.

VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique*. Bruxelles, De Boeck.

VYGOTSKI L. S. (1934). *Thought and Language*. Cambridge, MIT Press.

Cet article a été reçu le 23/09/97 et accepté le 26/02/98.

Représentations et conceptions des élèves grecs par rapport au concept d'équilibre chimique

Greek pupils' representations and conceptions about the chemical equilibrium concept

Hélène STAVRIDOU, Christine SOLOMONIDOU

Université de Thessalie
Faculté des Sciences Humaines
Département d'Éducation
Argonafton et Filellinon
38221 Volos, Grèce.

Résumé

Le but de cette recherche était la détection et l'étude des représentations, des conceptions et des difficultés d'apprentissage des élèves grecs à propos du concept d'équilibre chimique. Cent soixante quinze élèves de 17-18 ans des filières scientifiques ont répondu par écrit aux six questions d'un questionnaire. Les résultats ont mis au jour que les élèves ont des difficultés à représenter des systèmes de substances en équilibre chimique au niveau moléculaire et au niveau empirique. Plusieurs élèves ont aussi des difficultés pour concevoir « l'histoire » d'un système, c'est-à-dire l'évolution dans le temps des substances initiales jusqu'à l'état d'équilibre, ainsi que le

déplacement de l'équilibre chimique quand le système est perturbé. Souvent, ils font des prévisions basées sur des règles personnelles qu'ils ont développées, au lieu d'utiliser la loi de Le Chatelier et/ou la loi d'action de masse relative aux équilibres chimiques. La recherche d'éventuelles corrélations entre leurs représentations et leur performance en résolution de problème a mis au jour quelques sources possibles d'erreurs. Les conceptions des élèves ont été prises en compte pour la production d'un logiciel multimédia ayant comme but d'aider les élèves à surmonter leurs difficultés.

Mots clés : *équilibre chimique, représentations, conceptions, constante d'équilibre chimique, loi de Le Chatelier.*

Abstract

The aim of this research was to investigate and study Greek pupils' representations, conceptions and learning difficulties about the chemical equilibrium concept. A hundred and seventy five pupils aged 17-18, studying in scientific orientations, answered a six item written questionnaire. The analysis of the pupils' answers showed that they had sound difficulties in representing systems at chemical equilibrium in the molecular and the empirical level. Also they could not follow the « history » of a system, i.e. the evolution in time of initial substances towards chemical equilibrium, as well as the establishment of a new equilibrium when the system was disturbed. Many pupils made predictions about the equilibrium shift on the basis of personal rules they had developed and they did not use the Le Chatelier law and the equilibrium constant law. The quest for correlation between students' representations of the system and their achievement on problem solving showed some possible sources of errors. Data issued from this research guided the development of a multimedia learning environment aiming at the improvement of students' conceptions.

Key words : *chemical equilibrium, representations, conceptions, equilibrium constant, Le Chatelier law.*

Resumen

El objetivo de esta investigación fue determinar y estudiar las representaciones, concepciones y dificultades de aprendizaje de los alumnos griegos en relación al concepto de equilibrio químico. Cien y setenter y cinco (175) alumnos entre 17 y 18 años del bachillerato en ciencias, respondieron a un cuestionario de seis preguntas. Los resultados determinaron que los alumnos tienen serias dificultades para representar sistemas de sustancias en equilibrio químico a nivel molecular y a nivel

empírico. Muchos alumnos tienen también dificultad para concebir «la historia» de un sistema, es decir la evolución en el tiempo de las sustancias iniciales hasta el estado de equilibrio, así como el desplazamiento del equilibrio químico cuando el sistema es perturbado. A menudo, ellos hacen previsiones basadas en reglas personales que han desarrollado, en lugar de utilizar la ley de Le Chatelier y/o de acción de masa relativa a los equilibrios químicos. La investigación de eventuales correlaciones entre sus representaciones y sus capacidad en resolución de problemas ha puesto en evidencia algunas fuentes posibles de errores. Las concepciones de los alumnos han sido tomadas en cuenta para la producción de un programa multimedia, el cual tiene como propósito ayudar a los alumnos a superar sus dificultades.

Palabras claves : *equilibrio químico, representaciones, concepciones, constante de equilibrio químico, ley de Le Chatelier.*

1. INTRODUCTION

Le concept d'équilibre chimique est un des concepts les plus complexes enseignés au lycée. À cause des difficultés que son enseignement et son apprentissage présentent pour les élèves, ce concept a été l'objet de plusieurs recherches en didactique des sciences physiques. Ces recherches ont permis la détection d'un nombre important de conceptions dites alternatives et de difficultés d'apprentissage qu'on rencontre chez des élèves de niveaux scolaires et de cultures différents (Cros et al., 1984 ; Banerjee, 1991 ; Hameed et al., 1993 ; Niaz, 1995 ; Garnett et al., 1995) et ont révélé l'importance du discours scientifique du professeur par rapport à l'enseignement de ce concept (Évrard et al., 1995). Malgré le nombre important des recherches sur le sujet, il est largement reconnu que les résultats de ces recherches n'ont pas influencé de façon significative la pratique quotidienne des enseignants (Quilez-Pardo & Solaz-Portolés, 1995).

En Grèce, comme dans d'autres pays, l'enseignement de la chimie maintient son caractère traditionnel, c'est-à-dire qu'il est en grande partie basé sur la présentation du savoir par l'enseignant, sur l'apprentissage par coeur des concepts de la part des élèves et sur des activités de résolution de problèmes suivant des stratégies algorithmiques et des méthodologies proposées par l'enseignant. L'enseignement est également conditionné par les manuels scolaires qui insistent sur l'aspect quantitatif des concepts de chimie plutôt que sur le développement du raisonnement qualitatif des élèves (Camacho & Good, 1989 ; Nurrenbern & Pickering, 1987). Pour preuve, plusieurs enseignants sont convaincus que les activités de résolution de

problèmes sont quasi-équivalentes à l'enseignement des concepts scientifiques (Sawrey, 1990) et que l'habileté à résoudre des problèmes et à faire des calculs conduit à l'apprentissage des concepts scientifiques (Niaz, 1995).

Dans le cadre d'enseignements traditionnels des concepts chimiques, les multiples problèmes qui sont liés à la représentation et à la construction du savoir de la part des élèves sont négligés. Ce sont justement ces problèmes de représentation de la situation et de construction personnelle du savoir qui sont à l'origine des difficultés des élèves concernant les concepts scientifiques, y compris celui d'équilibre chimique. Pour le bon fonctionnement du concept d'équilibre chimique, comme pour d'autres concepts, il est indispensable que les élèves développent des représentations adéquates pour les entités des trois niveaux de représentation et de raisonnement en chimie, notamment celles du niveau symbolique (équations chimiques, diagrammes), du niveau empirique (substances et leurs interactions, appareils, manipulations) et du niveau moléculaire (modèles de la structure de la matière). Il est également nécessaire que les élèves établissent des corrélations satisfaisantes entre les entités de ces trois niveaux. Larcher souligne cette nécessité en écrivant que « *faute de distinguer le registre des phénomènes, le registre des représentations symboliques et le registre des modèles avec suffisamment de rigueur, nous entraînons souvent les élèves dans de mauvaises représentations des phénomènes et nous les entretenons dans des confusions. Le domaine des réactions chimiques, de leur symbolisation, de leur interprétation est un bel exemple de dérives de vocabulaire et de confusion des registres* » (Larcher, 1994, p. 57). Nous pensons qu'en l'absence des représentations et des corrélations nécessaires entre les entités de ces trois niveaux, on doit s'attendre à des problèmes de compréhension qui affectent le fonctionnement du concept d'équilibre chimique et qui sont à l'origine de plusieurs conceptions alternatives des élèves.

Ces dernières années, l'accumulation importante des données de recherche en didactique des sciences physiques et l'essor considérable des nouvelles technologies ont nourri la réflexion sur la façon dont ces données pourraient guider le développement d'environnements d'apprentissage plus adaptés aux besoins et aux difficultés des élèves. La recherche que nous présentons s'inscrit dans cette ligne de réflexion et fait partie d'un projet plus large visant la production d'un logiciel multimédia pour aider les élèves à surmonter leurs difficultés d'apprentissage par rapport au concept d'équilibre chimique. Le détail concernant le développement et le contenu du logiciel sera présenté dans un autre article.

2. LA RECHERCHE

2.1. Hypothèses de recherche

Avec cette recherche nous avons voulu détecter et étudier les difficultés de représentation et de compréhension du concept d'équilibre chimique chez des élèves grecs (17-18 ans). Pour aboutir à une image assez complète des difficultés des élèves, nous avons tenté de vérifier certaines données issues d'autres recherches, mais surtout nous avons essayé de découvrir des sources possibles d'erreurs et de difficultés des élèves.

Plusieurs données de recherche ont montré que des élèves de niveaux d'enseignement et de cultures différents ont des difficultés à développer des représentations satisfaisantes au niveau atomique/moléculaire par rapport à des situations et des phénomènes observés au niveau empirique (Ben-Zvi et al., 1987 ; Nurrenbern & Pickering, 1987 ; Garnett et al., 1995 ; Martinand, 1986). Pourtant, comme il n'y pas de données de recherche concernant les problèmes de représentation au niveau moléculaire et au niveau empirique d'un système de substances en équilibre chimique, le premier but de notre recherche était d'apporter des éléments de réponse dans ce domaine. Vu le caractère théorique et traditionnel de l'enseignement de la chimie en Grèce et étant donné que les élèves travaillent surtout au niveau symbolique, nous avons fait une **première hypothèse**, suivant laquelle il est fort probable que les élèves grecs aient des difficultés de compréhension et de représentation des systèmes de substances (surtout gazeuses) en équilibre chimique, tant au niveau empirique qu'au niveau moléculaire.

L'étude des conceptions des élèves par rapport au concept de vitesse de réaction a révélé la difficulté des élèves à saisir l'aspect dynamique sous-jacent à l'équilibre chimique (Cros et al., 1984 ; Garnett et al., 1995). À notre avis le problème est beaucoup plus général, étant donné que d'habitude les élèves grecs travaillent au niveau symbolique et apprennent à appliquer la loi de Le Chatelier à des systèmes qui se trouvent déjà en équilibre chimique. Le deuxième but de cette recherche était d'étudier si, et dans quelle mesure, les élèves grecs conçoivent « l'histoire » d'un phénomène chimique, c'est-à-dire non seulement son état actuel mais aussi son passé, son avenir et son éventuelle évolution. Il s'agit d'une question importante qui, à notre connaissance, n'a jamais été abordée. Suivant notre **deuxième hypothèse**, les élèves éprouvent des difficultés à se représenter l'état initial d'un système de substances gazeuses en équilibre chimique, ainsi que l'évolution de ce système vers un état d'équilibre chimique et, de

là, vers un nouvel équilibre chimique, lorsqu'un des facteurs qui affectent l'équilibre est modifié (température, volume-pression, concentration).

Bien que le déplacement de l'équilibre puisse être décrit par la loi d'action de masse, certains élèves, pour faire des prévisions concernant le déplacement de l'équilibre, utilisent plutôt la loi de Le Chatelier. Mais l'application de cette loi par des enseignants n'est pas non plus sans problèmes (Quilez-Pardo & Solaz-Portolés, 1995 ; Garnett et al., 1995). Le troisième but de notre recherche était d'étudier la manière dont les élèves utilisent la loi d'action de masse et la loi de Le Chatelier dans des situations de prévision différentes. D'après notre **troisième hypothèse** il est très probable que les élèves utilisent correctement cette loi quand il s'agit de l'appliquer d'une façon automatique et qu'ils aient des difficultés considérables quand la tâche demande une bonne représentation de la situation.

Le dernier, mais pas le moindre but de notre recherche, était d'essayer d'établir des corrélations entre les représentations des élèves et leur performance en résolution de problèmes. Suivant notre **quatrième hypothèse**, des bonnes représentations de systèmes en équilibre chimique entraînent des bonnes performances en résolution de problèmes.

2.2. Méthode et échantillon

Nous avons préparé six questions (voir annexe), auxquelles ont répondu par écrit **175 élèves** d'orientations scientifiques ou médicales, garçons et filles, de la troisième classe du lycée (17-18 ans), un ou deux mois après l'enseignement ordinaire du sujet en classe. Les élèves avaient choisi par eux-mêmes ces orientations, ils étaient de tous les niveaux (bons, moyens et faibles) et appartenaient à six lycées publics différents. Ils ont répondu, dans leur classe, en une heure, temps qui s'est avéré suffisant même pour les élèves les plus lents.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Nous présentons les données issues des réponses des élèves à chaque question.

3.1. Question 1

Le but de la première question était de détecter les représentations que les élèves développent par rapport à des systèmes gazeux en équilibre

chimique, tant au niveau empirique-macroscopique qu'au niveau moléculaire-microscopique.

Quatre vingt quatre élèves (48%) ont dessiné un récipient fermé et ont ainsi donné des réponses satisfaisantes (figure 1).

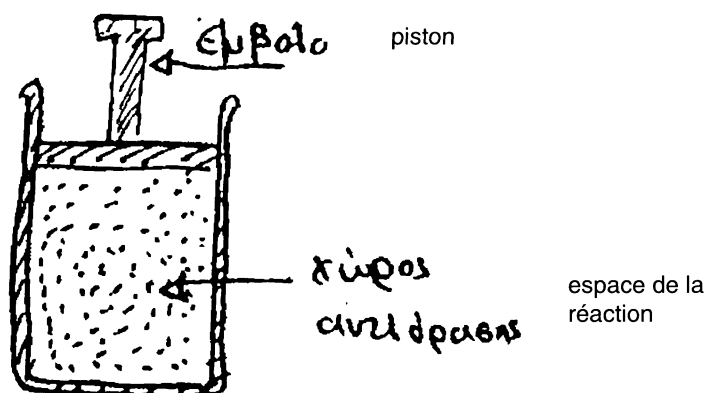


Figure 1 : Récipient fermé contenant les substances gazeuses en équilibre chimique

Vingt sept (16%) ont dessiné un récipient ouvert, dont 15 (9%) un récipient ayant une surface libre comme s'il contenait du liquide (figure 2).

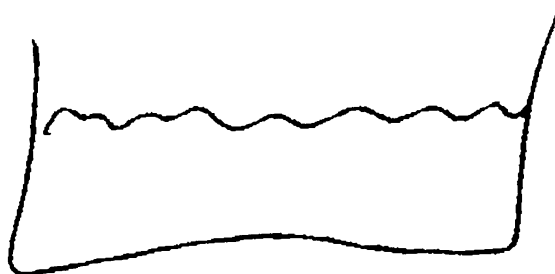


Figure 2 : Récipient ouvert contenant les substances gazeuses en équilibre chimique

Trente neuf élèves (22%) ont divisé l'espace de la réaction en deux ou trois compartiments (figures 3 et 4) ou bien ont dessiné deux récipients qui s'ajoutent pour en donner un troisième (figure 8) ; 25 élèves (14%) n'ont pas donné de réponse.

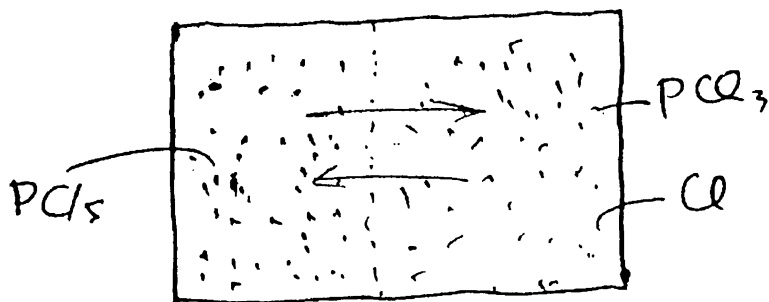


Figure 3 : Espace de la réaction divisé en deux compartiments

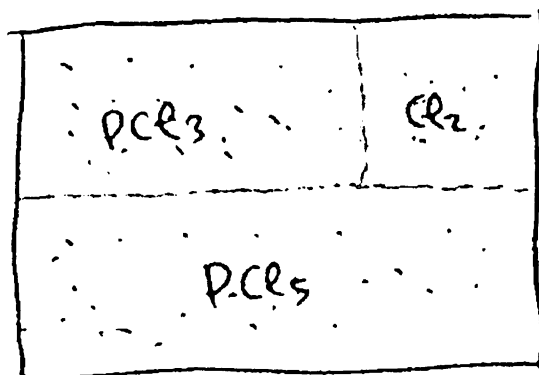


Figure 4 : Espace de la réaction divisé en trois compartiments

Dans 29 dessins (17%) le récipient était vide. À l'intérieur de 23 dessins (13%) il y avait des points (voir figure 1) et 17 autres dessins (10%) étaient crayonnés. L'équation chimique donnée était écrite à l'intérieur du récipient dans 17 dessins (10%), tandis que dans 37 autres (21%) il y avait des formules chimiques. Le reste des dessins (28 soit 17%) contenait des symboles divers.

En ce qui concerne les représentations au niveau moléculaire, 73 élèves (42%) ont vraiment dessiné une petite partie de l'espace de la réaction, tandis que 72 (41%) ont plus ou moins repris les dessins qu'ils avaient faits pour le récipient. Trente élèves (17%) n'ont pas donné de réponse. L'étude des dessins a montré que seulement 87 élèves (50%) ont représenté les molécules à l'aide de cercles, de triangles, de points, de carrés, etc. (figure 5). Vingt six élèves (15%) ont pratiquement écrit l'équation chimique (figures 6 et 7), 12 (7%) ont écrit des formules moléculaires et 50 (29%) n'ont pas donné de réponse ou leur réponse était inclassable.

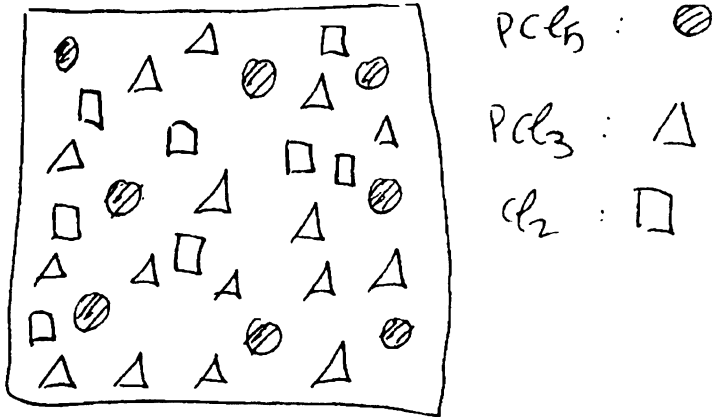


Figure 5 : Dessin représentant la proportion 1:2:1 des molécules des substances en équilibre chimique

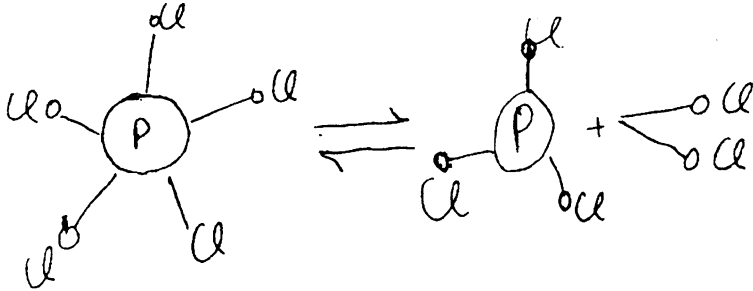


Figure 6 : Représentation de l'équilibre chimique au niveau moléculaire

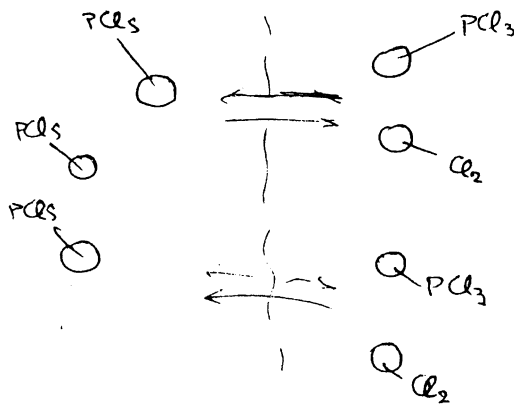


Figure 7 : Représentation de l'équilibre chimique au niveau moléculaire (idées compartimentales)

Parmi les élèves qui ont utilisé des symboles, seulement 27 (15%) ont respecté la proportion 1:2:1 des concentrations données à l'équilibre chimique (voir figure 5). Dans 29 autres dessins (17%) la proportion était de 1:1:1, proportion stoechiométrique de la réaction donnée, tandis que 31 dessins (18%) présentaient d'autres proportions.

En résumé, les réponses des élèves à la première question montrent que seulement une minorité -27 (15%)- d'entre eux ont donné une réponse satisfaisante, en dessinant un récipient fermé et un petit espace de ce récipient, en utilisant des symboles convenables pour la représentation des molécules et en respectant la proportion 1:2:1. Les autres dessins permettent de conclure à des représentations inadéquates, incomplètes ou erronées concernant des systèmes gazeux en équilibre chimique.

Les dessins des élèves montrent qu'ils ont des idées erronées par rapport à l'état gazeux, puisqu'ils ont dessiné des récipients ouverts, et dans certains cas avec une surface libre, comme s'il s'agissait de liquides. Apparemment les élèves qui ont dessiné un récipient fermé, mais qui ont divisé l'espace de la réaction en trois compartiments, chacun contenant une des substances du mélange, n'ont pas compris ce qu'est un mélange de gaz ni que chaque gaz occupe l'ensemble du volume du récipient. D'ailleurs, ces représentations compartimentales, aussi bien que certaines autres montrant deux récipients qui s'ajoutent pour en donner un troisième (figure 8), reflètent la difficulté des élèves à concevoir le système comme un ensemble, comme une unité (Gorodesky & Gussarsky, 1986).

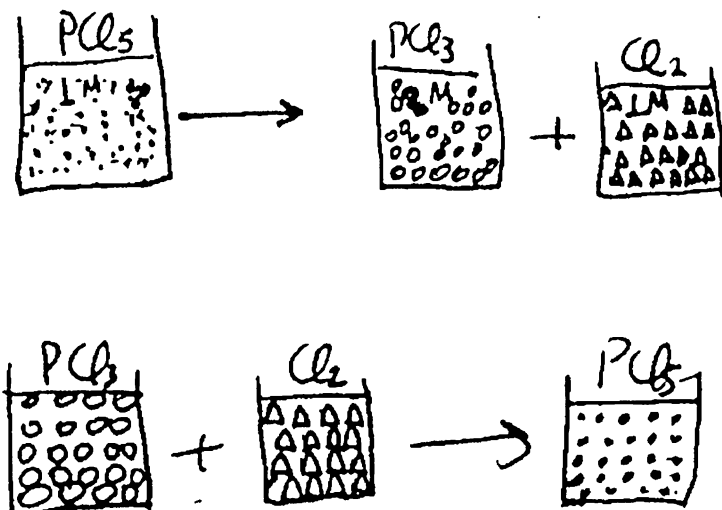


Figure 8 : Représentation des molécules des substances en équilibre chimique (deux récipients s'ajoutent pour en donner un troisième)

Certains élèves ont du mal à se représenter l'espace de la réaction comme un lieu où toutes les substances coexistent dans certaines proportions qui ici sont de 1:2:1. Il est remarquable que, suivant une recherche menée en France par Cros et al. avec des élèves entrant à l'Université, « *seulement 4% des étudiants imaginent des collisions entre molécules situées de part et d'autre du symbole \rightleftharpoons (exemples : collisions de types AC, BC, etc.* » (Cros et al., 1984, p. 52) dans le cas de la réaction $A+B \rightleftharpoons C+D$. Les auteurs concluent que « *la notion d'équilibre chimique apparaît donc essentiellement statique avec séparation très nette des entités situées de part et d'autre du symbole \rightleftharpoons* » (Cros et al., 1984, p. 52). Apparemment, la représentation de l'espace de la réaction, tant au niveau empirique qu'au niveau moléculaire, est un problème beaucoup plus général qui concerne les élèves de différents pays, qui suivent des systèmes d'enseignement différents.

Le fait que la plupart des élèves (85%), ont soit confondu la proportion stoechiométrique avec la proportion à l'équilibre, soit fourni des proportions quelconques, ou même n'ont pas répondu à la question, constitue une donnée supplémentaire indiquant leur manque de représentations appropriées des systèmes en équilibre chimique.

Apparemment, afin de se représenter un phénomène chimique au niveau empirique et au niveau moléculaire, les élèves, qui ont fourni des représentations compartimentales, s'appuient sur la symbolisation d'un phénomène chimique par l'équation chimique avec laquelle ils sont familiarisés. Nous pensons que, pour la même raison, certains élèves ont écrit l'équation à l'intérieur du récipient ou ont utilisé des formules pour représenter les molécules des substances.

3.2. Question 2

Avec la deuxième question nous avons voulu savoir comment les élèves se représentaient la situation initiale d'un système en équilibre chimique.

Quarante deux élèves (24%) ont choisi la réponse i (erronée). Ils pensent qu'il y a un seul état initial pour un système en équilibre chimique. Parmi eux, 21 élèves (12%) n'ont pas justifié leur réponse, et les autres ont donné des justifications qui reflètent leurs idées erronées. Par exemple :

« Pour arriver à l'équilibre chimique, une réaction doit partir de proportions données des constituants du système, et non pas d'autres proportions. »

« L'état initial dépend de la température. À chaque changement de température l'état initial change aussi, parce qu'il est unique dans tous les cas. »

« Puisque PCl_5 se décompose en PCl_3 et Cl_2 il y a un seul état de départ. »

« Si la température reste constante, il n'y a qu'un seul état initial, parce que si nous ajoutons une certaine quantité de PCl_5 le système pourra arriver à l'équilibre chimique et avoir les concentrations 1 mol/lit PCl_5 , 2 mol/lit PCl_3 , 1 mol/lit Cl_2 . »

Ainsi les élèves pensent qu'à chaque équilibre chimique correspond un seul état initial, qui dépend soit des proportions des constituants initiaux, soit de la température. Certains pensent que la réaction évolue dans un seul sens, dans notre cas la décomposition du PCl_5 . Ces élèves ne conçoivent pas le caractère dynamique des réactions.

Cent douze autres élèves (64%) ont choisi la réponse correcte ii, mais seulement 19 d'entre eux (11%) ont donné des justifications qualitatives comportant des points positifs, comme la suivante :

« Il est possible d'avoir plusieurs états initiaux, par exemple dans un récipient on peut mettre seulement PCl_5 qui va réagir et donner PCl_3 et Cl_2 jusqu'à l'équilibre chimique. Un autre état initial est de mettre seulement PCl_3 et Cl_2 qui vont réagir pour donner PCl_5 jusqu'à l'équilibre. On peut mettre aussi des quantités de tous les constituants en des concentrations différentes de celles de l'équilibre, et le système arrivera également en équilibre chimique. »

Nous devons signaler que le raisonnement qualitatif a évidemment ses limites et que, dans le cas du système décrit, il n'est pas possible d'obtenir cet état d'équilibre en partant uniquement de PCl_5 . Ces élèves n'ont pas utilisé les données du problème pour vérifier leur réponse.

Parmi les autres élèves qui ont choisi la réponse correcte ii, 4 (2%) ont donné des justifications incomplètes montrant qu'ils conçoivent le phénomène en prenant comme modèle l'équation chimique. Au lieu de concevoir le système comme une unité où toutes les substances coexistent, ces élèves distinguent deux parties et deux directions opposées du déroulement du phénomène. Par exemple :

« La réaction se déroule dans les deux directions, de sorte qu'en partant des substances du 1^{er} ou du 2^e membre on formera les substances de l'autre membre de l'équation. »

Il s'agit d'un exemple de plus, illustrant l'influence du niveau symbolique sur la façon dont les élèves appréhendent la situation.

Trente six élèves (21%) ayant choisi la réponse ii ne l'ont pas justifiée. Vingt six autres élèves (15%) ont confondu l'état initial et l'état d'équilibre chimique et ont ainsi donné des justifications comme la suivante, sans rapport avec la question posée :

« L'équilibre ne dépend pas seulement de la température mais aussi de la pression et de la concentration. Par conséquent, si la température reste constante, un des deux autres facteurs peut se modifier et conduire le système à un nouvel équilibre. »

Les 27 élèves restant (15%) ont donné une justification vague et/ou très générale.

3.3. Question 3

Le but de la troisième question était d'étudier comment les élèves appliquent la loi de Le Chatelier dans deux situations différentes (voir les questions 3.1 et 3.3) et s'ils utilisent la loi d'action de masse pour prévoir l'évolution d'un système quand l'équilibre est perturbé.

3.3.1. *Prévision du déplacement de l'équilibre en cas d'augmentation de la pression*

Quatre vingt dix sept élèves (55%) ont donné une réponse correcte en écrivant que le système sera déplacé vers la gauche, mais seulement 57 d'entre eux ont donné une justification complète et satisfaisante, comme : *« L'équilibre sera déplacé vers la gauche, parce que, suivant le principe de Le Chatelier-Van't Hoff, l'augmentation de la pression a comme résultat le déplacement de l'équilibre vers la direction où il y a diminution du volume du système. »* Dans ce cas, l'élève a utilisé une formulation du manuel scolaire grec qui traduit la diminution du nombre des moles en diminution du volume des gaz du système.

Vingt autres élèves (parmi les 97) prévoient que le système sera déplacé vers la droite. Citons deux exemples.

« Suivant le principe de Le Chatelier-Van't Hoff, le système sera déplacé dans le sens qui tend à annuler le changement effectué. Donc le système sera déplacé dans le sens où le volume sera plus grand, c'est-à-dire vers la droite. » Dans ce cas, il s'agit d'une application erronée de la loi de Le Chatelier.

« Puisque la pression devient le double, le volume devient la moitié du volume initial. Par conséquent, les molécules des gaz s'approchent l'une à l'autre et les chocs effectifs entre elles sont plus nombreux et plus de

produits seront créés. Par conséquent l'équilibre chimique sera déplacé vers la droite. ». La représentation du phénomène au niveau moléculaire de cet élève montre qu'il n'a pas intégré l'idée de la réversibilité de la réaction chimique.

Trois élèves ont répondu que rien ne va se passer, tandis que 55 (31%) n'ont pas répondu à cette question.

3.3.2. Calcul des nouvelles concentrations des substances en mol.L⁻¹ à l'instant t₁

Cette question a été posée à 81 élèves de l'échantillon. Parmi eux, 21 (26%) ont fourni la réponse satisfaisante suivante : « *les nouvelles concentrations seront le double des concentrations initiales* ». Huit élèves (10%) ont répondu que les concentrations sont les mêmes. Un élève a écrit que les nouvelles concentrations sont la moitié des concentrations initiales, tandis que 51 élèves (62%) n'ont pas répondu à cette question.

3.3.3. Prévission pour la constante d'équilibre K en cas d'augmentation de la pression

Cent douze élèves (64%) ont correctement répondu que la constante de l'équilibre est la même, 44 autres (25%) qu'elle va augmenter et 14 (8%) qu'elle va diminuer. Cinq élèves (3%) n'ont pas donné de réponse.

Des justifications complètes et satisfaisantes ont été données par 104 élèves (59%) qui ont écrit que la valeur de la constante dépend uniquement de la température ; 46 (26%) ont donné des explications incorrectes, en écrivant que la constante K dépend de la pression ou des concentrations des substances. Les 25 élèves restant (14%) n'ont pas donné de réponse.

3.3.4. Calcul des nouvelles concentrations des substances en mol.L⁻¹ à l'instant t₂

Cette question a été posée à 81 élèves de l'échantillon pour tester leur raisonnement, et plus spécialement l'application de la loi de Le Chatelier dans un autre contexte, celui de la résolution d'un problème. Les élèves devaient résoudre un problème dont les données numériques étaient choisies afin de trouver la solution sans faire de calculs compliqués, selon les étapes suivantes (voir le schéma 1) :

– calcul des nouvelles concentrations de substance en mol.L⁻¹ à l'instant t₁, juste après le doublement de la pression ;

- prévision du déplacement de la réaction en utilisant soit la loi de Le Chatelier, soit la loi d'action de masse ;
- calcul des nouvelles concentrations dans le nouvel état d'équilibre, à l'instant t_2 .

	PCl_5	\leftrightarrow	$\text{PCl}_3 + \text{Cl}_2$	- Q	
concentrations initiales (mol.L ⁻¹)	1		2	1	équilibre chimique
t_1 : doublement de la pression d'où les nouvelles concentrations (mol.L ⁻¹)	2		4	2	
déplacement de la réaction			\leftarrow		
évolution des concentrations	+0,5		-0,5	-0,5	
t_2 : nouvelles concentrations (mol.L ⁻¹)	2,5		3,5	1,5	nouvel équilibre chimique

Schéma 1 : Étapes nécessaires pour la résolution du problème

Étant donné que les élèves de ce niveau se savent pas qu'on peut augmenter la pression du système en ajoutant un gaz qui ne réagit pas avec les gaz du système (à $T = \text{constante}$), on attendait d'eux qu'ils attribuent l'augmentation de la pression à la diminution du volume ($V_1 = 2V_2$), et qu'ils traitent ensuite le système à volume constant. En utilisant les concentrations des gaz à l'instant t_1 , on a $L = 4 \times 2 / 2 = 4$, c'est-à-dire un résultat différent de $K = 2$. Par conséquent, le système va réduire la concentration de PCl_3 et de Cl_2 et va augmenter celle de PCl_5 , jusqu'au moment où $L = K$.

Parmi les 81 élèves, seulement 4 (5%) ont calculé correctement les nouvelles concentrations finales à l'instant t_2 . Ces élèves avaient calculé de façon correcte les concentrations après le doublement de la pression à l'instant t_1 et avaient correctement prédit le déplacement de la réaction vers la gauche. Il faut signaler que la situation décrite par ce problème n'était pas très familière aux élèves, qui d'habitude s'occupent de problèmes où il y a un changement de concentration par addition d'un ou plusieurs constituants de la réaction.

Huit autres élèves (10%) n'ont pas calculé correctement les concentrations des substances après le doublement de la pression et, par conséquent, les calculs qu'ils avaient effectués par la suite n'ont pas abouti à un résultat correct. Quatre élèves (5%) n'ont pas calculé correctement les concentrations des substances après le doublement de la pression et ont fait des prévisions erronées concernant le déplacement de l'équilibre chimique ; ainsi les nouvelles concentrations calculées n'étaient pas

correctes. Un élève avait calculé de façon correcte les concentrations des substances après le doublement de la pression, mais il s'est trompé sur le déplacement de la réaction, fournissant de ce fait des concentrations finales non correctes. Vingt et un autres élèves (26%) ont fait d'autres erreurs : par exemple, ils ont divisé par deux les concentrations initiales, ou ils ont soustrait 0,5 mol à la concentration initiale en Cl_2 . Quarante trois (53%) n'ont pas donné de réponse.

En essayant d'établir d'éventuelles corrélations entre les représentations du système et les performances des élèves en résolution de problèmes, nous avons demandé aux 81 élèves de faire deux dessins, un pour montrer l'espace où la réaction se déroule et un pour montrer les molécules, à l'instant t_2 , du nouvel équilibre. Il est remarquable qu'aucun élève n'a fourni une bonne représentation de la situation, ni au niveau empirique où il fallait montrer que le volume est divisé par deux, ni au niveau moléculaire où il fallait représenter les molécules avec leur nouvelle proportion de 5:7:3 (issue du résultat de la résolution du problème 2,5:3,5:1,5). Plus spécialement pour l'instant t_2 , 34 élèves (42%) ont fait les mêmes dessins qu'à la question 1 ; 3 autres (4%) ont fait les mêmes dessins mais en ajoutant un piston ; 2 élèves (2%) ont dessiné un récipient fermé vide ; 2 autres (2%) ont dessiné des particules et 2 (2%) ont écrit des formules électroniques. Trente huit autres (47%) n'ont pas fourni de dessins.

Pour éclairer la question nous avons étudié les représentations initiales du système (question 1) et les performances des élèves en résolution du problème posé et nous avons remarqué que la situation semble assez complexe. Plus spécialement, parmi les 4 élèves sur les 81 qui ont fourni une solution correcte du problème, seulement 2 ont fait des représentations satisfaisantes du système tant au niveau empirique qu'au niveau moléculaire. Les dessins des 2 autres élèves font plutôt allusion au mouvement des molécules, sans tenir compte de la proportion moléculaire donnée de 1:2:1.

D'autre part, parmi 8 élèves (sur 81) qui ont représenté de façon satisfaisante le système aux niveaux empirique et moléculaire (question 1), seulement 2 ont résolu correctement le problème donné. Cinq autres ont fait diverses erreurs, tandis qu'un élève n'a pas fourni de solution.

En étudiant la façon dont les élèves procèdent pour résoudre le problème, deux grandes sources d'erreurs apparaissent. Certains élèves ne peuvent pas concevoir de façon satisfaisante l'histoire du système, c'est-à-dire les étapes successives de son évolution dans le temps, d'un état d'équilibre vers l'autre. Cette difficulté peut être attribuée d'une part au fait que l'enseignant n'a pas pris le soin de développer le raisonnement qualitatif des élèves et d'autre part qu'il ne leur a pas fourni suffisamment de données

concernant le côté pratique de l'affaire (par exemple, comment diminuer le volume à l'aide d'un piston, etc.)

D'autres élèves ont recours à un traitement mathématique général et abstrait non pertinent pour la situation décrite par le problème. Ils utilisent l'équation mathématique de la loi d'action de masse pour décrire l'état initial et l'état final du système (en désignant par x , y , z , x' , y' , z' les concentrations initiales et finales des trois substances en équilibre), sans pour autant utiliser les données du problème pour aboutir à une solution. La représentation du phénomène par la loi d'action de masse semble fonctionner dans sa dimension mathématique, en relation avec le niveau symbolique (équation chimique) et quasi-indépendamment de la situation matérielle que cette loi décrit aux niveaux empirique et moléculaire.

Ces données nous permettent de saisir l'ampleur des difficultés des élèves à développer, à coordonner et à utiliser différents types de représentations, symboliques, empiriques, moléculaires et mathématiques de la situation.

3.4. Question 4

3.4.1. *Prévision du déplacement de l'équilibre en cas d'addition de PCl_5*

Cent trente six élèves sur 175 (78%) ont répondu correctement qu'après l'addition de PCl_5 , la réaction sera déplacée vers la droite, 10 (6%) élèves que le système sera déplacé vers la gauche et 31 (18%) n'ont pas donné de réponse.

Cent quinze élèves (66%) ont donné des justifications satisfaisantes en appliquant la loi de Le Chatelier. Soixante autres (34%) soit ont donné des explications incorrectes ou trop générales, soit n'ont pas répondu à cette question.

3.4.2. *Prévision pour la constante d'équilibre chimique K*

Quatre vingt dix sept élèves (56%) ont répondu correctement qu'après l'addition du PCl_5 la constante K sera la même, 24 (14%) qu'elle va augmenter, 46 (26%) qu'elle va diminuer et 8 (5%) n'ont pas donné de réponse.

Quatre vingt onze élèves (52%) ont donné des justifications complètes et satisfaisantes en écrivant que la constante K est influencée uniquement par la température, 66 (38%) ont donné des justifications incorrectes et 18 (10%) n'ont pas justifié leur réponse.

3.5. Question 5

3.5.1. *Prévision du déplacement de l'équilibre en cas d'augmentation de la température*

Cent dix-huit élèves (67%) ont donné la réponse correcte selon laquelle, en cas d'augmentation de la température, l'équilibre serait déplacé vers la droite, 16 (9%) ont répondu qu'il serait déplacé vers la gauche et 41 (23%) n'ont pas donné de réponse. Cent onze (63%) ont donné des justifications satisfaisantes, comme par exemple : « *L'augmentation de la température favorise la réaction endothermique. par conséquent, en cas d'augmentation de la température, l'équilibre sera déplacé vers la droite.* » Quarante six (26%) ont donné des explications incorrectes ou trop générales et le reste (22, 13%) n'a pas répondu.

3.5.2. *Prévision pour la constante d'équilibre chimique K*

Cent dix sept élèves (67%) ont répondu correctement qu'en cas d'augmentation de la température la valeur de la constante K augmentera, 24 (14%) que K va diminuer et 18 (10%) qu'elle restera la même ; 16 (9%) n'ont pas répondu. Cent élèves (57%) ont donné des justifications satisfaisantes, 38 (22%) ont donné des explications incorrectes ou trop générales et les 37 restant (21%) n'ont pas répondu.

L'analyse des réponses aux questions 3, 4 et 5 montre que la majorité des élèves fait des prévisions satisfaisantes concernant le déplacement de l'équilibre, en appliquant la loi de Le Chatelier. Mais la quasi-totalité des élèves a des difficultés insurmontables quand il s'agit d'appliquer correctement cette même loi pour la résolution du problème. Plus spécialement, à l'exception de 12 élèves, ils n'ont pas réussi à combiner l'augmentation de la pression avec la diminution du volume qui s'en suit (loi de Boyle-Mariotte), et celle-là avec la loi de Le Chatelier. Parmi ces 12 élèves 4 seulement ont calculé correctement la concentration des substances après le doublement de la pression, mais aussi les nouvelles concentrations à l'instant t_2 , c'est-à-dire pour le nouvel équilibre chimique. Il est remarquable qu'aucun élève n'a utilisé la loi d'action de masse pour faire des prévisions.

Les performances à la question 3.3 et aux questions 3.1, 4.1, 5.1 sont contradictoires, puisque d'un côté les élèves ont éprouvé de grandes difficultés pour résoudre le problème et de l'autre ils ont donné de bonnes réponses aux autres questions (3.1, 4.1, 5.1). Pourtant, dans les deux cas, il était essentiel d'appliquer la loi de Le Chatelier. La différence était que pour répondre aux questions 3.1, 4.1, 5.1, il suffisait d'appliquer cette loi de

façon automatique, tandis que pour la résolution du problème il était indispensable d'avoir une bonne représentation de la situation. À notre avis, ces élèves ont essentiellement manqué de représentations adéquates pour la situation décrite par le problème. Étant donné que le problème décrivait une succession d'actions et une évolution dans le temps, sa résolution nécessitait la représentation d'étapes successives. La quasi-totalité des élèves a eu du mal à se représenter cette évolution dans le temps et à envisager les conséquences.

3.6. Question 6

Le but de la sixième question était de détecter des conceptions et de comprendre le raisonnement des élèves par rapport à l'évolution de six systèmes, chacun se trouvant dans un récipient différent. Les élèves étaient invités à choisir une réponse parmi six (voir annexe).

Les réponses des élèves à cette question figurent au tableau 1. Le nombre des réponses correctes est marqué par des caractères gras. Le chiffre qui suit entre parenthèses correspond au nombre des élèves ayant donné une justification satisfaisante.

A	B	C	D	Réponse → Récipient ↓	Réponse I	Réponse II	Réponse III	Réponse IV	Réponse V	Réponse VI	Aucune Réponse
5	5			Récipient 1	145 (74)	9	4	3	7	4	3
5		5		Récipient 2	1	5	98 (38)	18	32	8	13
1	1	20		Récipient 3	53 (32)	51	11	2	34	12	12
2		2	0,5	Récipient 4	26	76 (32)	8	5	25	13	22
2	2	20	20	Récipient 5	8	74	7	15	48 (25)	12	11
2	2	2	2	Récipient 6	3	2	30	90	38 (22)	5	7

Tableau 1 : Réponses à la question 6

Pour le système 1 constitué de 5 moles de A et de 5 moles de B, 145 élèves ont choisi la réponse correcte I (la réaction avancera vers la droite jusqu'à l'équilibre), mais seulement 74 d'entre eux ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Du moment où A et B se trouvent seuls dans le récipient, la réaction se déroulera vers la droite, de sorte que C et D sont produits* ». Les autres ont donné une justification non satisfaisante, comme par exemple : « *Le système tend à annuler le changement effectué* ». Dans ce cas, il semble que l'élève applique la loi de Le Chatelier à l'état initial.

Pour le système 2 (5 moles de A et 5 moles de C), 98 élèves ont choisi la réponse correcte III (le système ne va pas réagir), mais seulement 38 ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Il n'y a pas de substance correspondante à aucune partie, et la réaction n'avancera vers aucune direction* ». Les justifications des autres élèves n'étaient pas satisfaisantes, comme par exemple : « *Du moment où les concentrations (des substances) qui s'ajoutent sont égales et si à cause de l'augmentation de A la réaction tend vers la droite, elle tend vers la gauche à cause de C, donc les deux modifications s'annulent mutuellement, car il s'agit de quantités égales* ». Dix huit élèves ont choisi la réponse IV (le système se trouve à l'équilibre) et ont justifié leur réponse en écrivant que : « *Le système se trouve en état d'équilibre parce que les concentrations de A et C sont égales* ». Le raisonnement des deux derniers élèves montre qu'ils confondent l'état initial du système avec l'état d'équilibre et que le premier des deux semble appliquer la loi de Le Chatelier à l'état initial.

Pour le système 3 (1 mole de A, 1 mole de B, 20 moles de C), 53 élèves ont choisi la réponse correcte I (la réaction avancera vers la droite jusqu'à l'équilibre), mais seulement 32 ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Le système avancera vers la droite pour produire de la substance D et arriver ensuite à l'équilibre chimique* ». Cinquante et un élèves ont choisi la réponse II (la réaction avancera vers la gauche jusqu'à l'équilibre) et ont fourni des justifications erronées, comme par exemple : « *Le système ira vers la gauche parce que la concentration du C est beaucoup plus grande que celle de A et B* ». Cet élève, comme plusieurs autres, pense que lorsque la concentration d'une substance dans le récipient est plus importante que celles des autres substances, la réaction évoluera dans le sens qui diminue cette concentration.

Pour le système 4 (2 moles de A, 2 moles de C et 0,5 moles de D), 76 élèves ont choisi la réponse correcte II (la réaction avancera vers la gauche jusqu'à l'équilibre), mais seulement 32 ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Il n'y a pas de produit B pour réagir avec A mais il est formé par l'union de C et D* ». Quarante quatre élèves ont choisi la réponse correcte II, mais ont fourni des justifications erronées, comme par exemple : « *Le système ira vers la gauche, parce que la concentration des produits est plus grande que celle des réactants et, par conséquent, pour que les concentrations deviennent égales dans les deux parties de l'équation, la concentration de la première partie doit augmenter. Ainsi l'équilibre chimique se déplace vers la gauche* ». Suivant ce raisonnement, l'équilibre est un état où les concentrations de toutes les substances deviennent égales, et si elles sont différentes, le système tend à les égaliser.

Pour le système 5 (2 moles de A, 2 moles de B, 20 moles de C, 20 moles de D), 48 élèves ont choisi la réponse correcte V (ces données sont insuffisantes pour arriver à une conclusion sur le déroulement de la réaction), mais seulement 25 ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Nous ne savons pas la valeur de K_c* ». Il y a peu de justifications où les élèves raisonnent à l'aide de la constante d'équilibre K. Soixante quatorze élèves ont choisi la réponse II (la réaction avancera vers la gauche jusqu'à l'équilibre) et ont fourni des justifications erronées, comme par exemple : « *Le système doit avancer vers la gauche parce qu'il doit maintenir les proportions $1+1 \rightarrow 1+1$* ». Cet élève a confondu les proportions stoechiométriques de la réaction avec les proportions des concentrations des substances en équilibre. Un autre élève qui a choisi la réponse II a fourni la justification suivante : « *C et D sont en quantités beaucoup plus grandes, ainsi elles réagissent entre elles et le système va vers la gauche* », suivant laquelle, quand il y a des substances dont les concentrations sont plus importantes, le système ira dans le sens opposé pour diminuer ces concentrations. Comme il a été déjà signalé, plusieurs élèves n'ont pas compris le sens et le rôle de la constante d'équilibre K, et par conséquent, ils ont développé des règles personnelles pour la description du comportement des systèmes.

Pour le système 6 (2 moles de A, 2 moles de B, 2 moles de C, 2 moles de D), seulement 38 élèves ont choisi la réponse correcte V (ces données sont insuffisantes pour arriver à une conclusion sur le déroulement de la réaction), et 22 ont fourni une justification satisfaisante, comme par exemple : « *Nous ne savons pas la valeur de K_c* ». Il s'agit d'une des rares justifications basées sur la constante d'équilibre chimique K. Quatre vingt dix élèves ont choisi la réponse IV (le système se trouve à l'équilibre chimique) et ont fourni des justifications erronées, comme par exemple : « *Le système se trouve en équilibre chimique puisque la proportion des moles dans le récipient est la même avec la proportion qui est décrite par la stoechiométrie de la réaction* ». L'idée que l'équilibre chimique est un état où les concentrations de toutes les substances deviennent égales va de pair avec la confusion des élèves concernant la proportion stoechiométrique de la réaction et la proportion des concentrations des substances en équilibre.

Les réponses des élèves à la question 6 montrent que la majorité d'entre eux ont des conceptions personnelles erronées, puisque :

- ils ont prévu qu'il y aura des réactions en dépit du manque de réactants nécessaires ;
- ils ont prévu qu'il n'y aura pas de réaction si toutes les substances ne se trouvent pas à l'état initial ;

– ils ont appliqué la loi de Le Chatelier à l'état initial du système, avant l'établissement de l'équilibre ;

– ils n'ont pas compris le sens et n'utilisent pas la constante de la loi d'action de masse relative aux équilibres chimiques pour faire des prévisions. Par contre, ils ont développé des règles personnelles, comme par exemple :

- quand il y a des concentrations plus importantes d'un côté de l'équation, la réaction sera déplacée vers le côté opposé pour « égaliser » la différence des concentrations,

- quand il y a des concentrations égales des deux côtés de l'équation chimique, le système a déjà atteint l'équilibre ;

– ils ont confondu les proportions des concentrations à l'équilibre avec les proportions stoechiométriques de l'équation chimique donnée.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette recherche montre que nombreux sont les élèves ayant des difficultés de conceptualisation et de représentation par rapport au concept d'équilibre chimique. Nous signalons brièvement les plus importantes de ces difficultés.

Plusieurs élèves ont du mal à se représenter au niveau moléculaire un système de substances gazeuses en équilibre chimique. Les représentations compartimentales de l'espace de la réaction témoignent de la prégnance du niveau symbolique sur les deux autres niveaux (moléculaire et empirique) et de la difficulté de plusieurs élèves à se représenter l'espace de la réaction comme un ensemble, comme une unité. D'ailleurs, l'idée qu'il y a deux réactions concurrentes, qui est très souvent présentée en classe pendant l'enseignement du concept d'équilibre chimique, ne facilite pas le développement de représentations adéquates pour le récipient dans lequel se déroule la réaction, comme un endroit où toutes les substances peuvent coexister. À noter également que des élèves ont des représentations erronées de l'état gazeux.

En ce qui concerne la représentation de « l'histoire » d'un système de substances, c'est-à-dire son évolution dans le temps, plusieurs élèves pensent qu'à chaque état d'équilibre chimique ne peut correspondre qu'un seul état initial des substances. Un nombre important des élèves traite un système de substances initiales comme si elles étaient déjà en équilibre chimique et ils appliquent la loi de Le Chatelier. Certains élèves envisagent la possibilité de réactions même en l'absence des constituants nécessaires et d'autres confondent les proportions des concentrations des substances

en équilibre chimique avec les proportions stoechiométriques de la réaction. Dans le cas où il y a des concentrations plus grandes « d'un côté de la réaction » que de l'autre, ils pensent que le système va réagir spontanément vers la direction opposée pour « égaliser les concentrations », et ils ne tiennent pas compte de la constante d'équilibre K de la réaction. Dans leur grande majorité, ils n'ont pas saisi le sens et le rôle de la constante K et, par conséquent, ils ne l'utilisent pas dans leur raisonnement. À première vue, la loi de Le Chatelier semble bien acquise par les élèves, qui ont fait de bonnes prévisions en l'appliquant à des situations simples. Par contre, quand il était question d'appliquer cette loi pour la résolution d'un problème où il était indispensable d'avoir une bonne représentation de la situation, leurs performances furent très faibles. Ces données, et surtout le fait que les élèves développent des règles personnelles qualitatives pour la compréhension du comportement des systèmes en équilibre chimique, suggèrent que l'enseignement de la chimie doit aider les élèves à développer leur raisonnement qualitatif pour qu'ils puissent saisir de façon satisfaisante l'évolution du système dans le temps. À notre avis, l'enseignement doit combiner de façon cohérente le raisonnement qualitatif et le traitement mathématique de la situation, fait qui permettra également, dans un deuxième temps, de montrer les limites du raisonnement qualitatif.

Les conceptions des élèves, les règles et les stratégies qu'ils développent pour faire face à des situations impliquant le concept d'équilibre chimique, ainsi que leurs difficultés de représentation, semblent vérifier les trois premières hypothèses de ce travail. En ce qui concerne la quatrième hypothèse, la recherche de corrélation entre les représentations du système et les performances des élèves en résolution de problèmes a mis au jour une situation assez complexe. Il semble que plusieurs facteurs conditionnent la performance des élèves en résolution de problèmes, tels que la représentation du système au niveau empirique et moléculaire et la perception de « l'histoire » du système. Un autre paramètre serait la façon dont la loi d'action de masse fonctionne dans la situation réelle, c'est-à-dire si elle a un sens chimique ou si elle a un sens plutôt mathématique. Cette question mériterait d'être étudiée de façon plus systématique.

Comme il a déjà été écrit, cette recherche fait partie d'un projet plus large visant à la production d'un logiciel multimédia pour aider les élèves à surmonter leurs difficultés réelles, détectées par la recherche. À la suite de cette recherche nous avons développé le logiciel ChemEquilibria (Sigalas et al., 1997) et nous allons l'évaluer en situation d'apprentissage avec des élèves. Étant donné que le détail du développement du logiciel fera l'objet d'un autre article, nous allons nous limiter à présenter les grandes lignes qui ont guidé le développement du scénario pédagogique du logiciel.

ChemEquilibria comporte 5 parties et s'assigne comme but d'aider les élèves à :

- développer des représentations adéquates des systèmes gazeux en équilibre au niveau empirique (première partie) et au niveau moléculaire (deuxième partie) et à établir des corrélations satisfaisantes entre les représentations des trois niveaux de la chimie, notamment celles des niveaux empirique, moléculaire et symbolique ;

- comprendre le sens chimique de la loi d'action de masse et à renforcer ses relations avec la situation matérielle qu'elle décrit, pour faciliter le traitement mathématique des situations en équilibre (troisième partie) ;

- se représenter « l'histoire » des systèmes de substances, et plus spécialement les étapes successives à partir d'un état initial vers un état d'équilibre (quatrième partie), et d'un état d'équilibre vers un autre équilibre (cinquième partie) ;

- améliorer leurs conceptions en favorisant, entre autres, des situations d'interaction multiples, telles l'observation, la prévision et le conflit cognitif ;

- développer leur raisonnement qualitatif et en saisir les limites.

BIBLIOGRAPHIE

BANERJEE A.C. (1991). Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, vol. 13, pp. 487-494.

BEN-ZVI R., EYLON B. & SILBERSTEIN J. (1987). Students' visualisation of a chemical reaction. *Education in Chemistry*, vol. 24, pp. 117-120.

CAMACHO M. & GOOD R. (1989). Problem-solving and chemical equilibrium: successful versus unsuccessful performance. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 26, pp. 251-272.

CROS D., FAYOL M., MAURIN M., CHASTRETTE M., AMOUROUX R. & LEBER J. (1984). Atome, acides-bases, équilibre. Quelles idées s'en font les étudiants arrivant à l'université. *Revue Française de Pédagogie*, n° 68, pp. 49-60.

ÉVRARD N., HUYNEN A.-M. & BUEGER-VANDER BORGHT C. (1995). Communication d'un savoir scientifique en classe. De la verbalisation au concept d'équilibre chimique. *Didaskalia*, n° 6, pp. 9-37.

HAMEED M., HACKLING M.W. & GARNETT P.J. (1993). Facilitating conceptual change in chemical equilibrium using a CAI strategy. *International Journal of Science Education*, vol. 15, pp. 221-230.

GARNETT P.J., GARNETT P.J. & HACKLING M.W. (1995). Students' alternative conceptions in chemistry : a review of research and implications for teaching and learning. *Studies in Science Education*, vol. 25, pp. 69-95.

GORODESKY M. & GUSSARSKY E. (1986). Misconceptualisation of the chemical equilibrium concept as revealed via different evaluation methods. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n° 4, pp. 427-441.

- LARCHER C. (1994). Point de vue à propos des équilibres chimiques. *Aster*, n° 18, pp. 57-62.
- MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang.
- NIAZ M. (1995). Relationship between student performance on conceptual and computational problems of chemical equilibrium. *International Journal of Science Education*, vol. 17, pp. 343-355.
- NURRENBERN S.C. & PICKERING M. (1987). Concept learning versus problem solving : is there a difference ? *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 508-510.
- QUÍLEZ-PARDO J. & SOLAZ-PORTOLÉS J.-J. (1995). Students' and teachers' misapplication of the Le Chatelier's principle : implications for the teaching of chemical equilibrium. *Research in Science Education*, vol. 32, n° 9, pp. 939-957.
- SAWREY B.A. (1990). Concept learning versus problem solving : revisited. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, pp. 253-34.
- SIGALAS M., SOLOMONIDOU C., STAVRIDOU E. & YANNAKOUDAKIS A. (1997). ChemEquilibria : a multimedia learning environment for the improvement of students' conceptions about chemical equilibrium. Paper presented at the 4th European Conference on Research in Chemical Education, University of York, York, 9-12 September 1997.

Cette recherche a été financée par le Secrétariat Général de la Recherche et de la Technologie de la Grèce. Le responsable du projet était le professeur M. Sigalas qui a participé au développement du logiciel (deuxième partie du projet).

ANNEXE

Le questionnaire

Question 1.

L'équation chimique : $\text{PCl}_5 \rightleftharpoons \text{PCl}_3 + \text{Cl}_2 - Q$ décrit un système gazeux en équilibre chimique à une température donnée. Dans les conditions où se trouve le système, les concentrations² des substances sont :

$$[\text{PCl}_5] = 1 \text{ mol.L}^{-1} \quad [\text{PCl}_3] = 2 \text{ mol.L}^{-1} \quad [\text{Cl}_2] = 1 \text{ mol.L}^{-1}$$

- a. Faites un dessin pour représenter, comme vous le désirez, l'espace dans lequel cette réaction se déroule.
- b. Faites un autre dessin pour représenter, comme vous le désirez, une petite partie de cet espace contenant des molécules des substances du système en équilibre

(Vous pouvez représenter les substances chimiques comme vous le désirez. Vous êtes priés d'expliquer clairement les symboles que vous utilisez.)

Question 2.

En se référant au système décrit à la première question, et étant donné que la température reste constante, avec laquelle des deux propositions suivantes êtes-vous d'accord ?

i. Il y a un seul état initial possible. On peut avoir à l'état initial un système constitué d'une ou de plusieurs des substances décrites ci-dessus pour aboutir à l'équilibre chimique précédent.

ii. Il y a plusieurs états initiaux possibles. Pour chaque état initial on peut avoir un système constitué d'une ou de plusieurs des substances décrites ci-dessus pour aboutir à l'équilibre chimique précédent.

Marquez avec un x votre réponse. i ii

Justifiez votre réponse.

Le système en équilibre chimique qui est décrit dans la première question est perturbé de trois façons différentes. Étant donné que chaque changement concerne le système initial, qu'est-ce qu'il va se passer à votre avis si : la pression augmente (voir Question 3), du PCl_5 est ajouté (voir Question 4), la température augmente (voir Question 5)³.

Question 3.

La pression augmente (à température constante)

3.1. Si à l'instant t_1 la pression devient le double de la pression initiale, que va-t-il arriver au système ? Justifiez votre réponse.

3.1.1. Les concentrations des substances en mol.L^{-1} seront modifiées à l'instant t_1 ?

OUI

NON

Si vous avez répondu OUI, vous êtes priés de calculer les nouvelles concentrations en mol.L^{-1} .

3.2. Après le doublement de la pression, la constante d'équilibre chimique K :

- sera la même ?
- va augmenter ?
- va diminuer ?

Justifiez votre réponse.

3.3. À l'instant $t_2 > t_1$, le système se trouve à un nouvel équilibre chimique. Si la concentration en Cl_2 à l'instant t_2 se trouve modifiée de $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ par

rapport à la concentration en Cl_2 au moment t_1 , vous êtes priés de calculer les nouvelles concentrations de toutes les substances à l'instant t_2 .

Question 4.

On ajoute PCl_5 à température constante

4.1. Si à l'instant t_1 , PCl_5 est ajouté au mélange des substances initiales en équilibre chimique, que va-t-il arriver au système ? (la température reste constante).

Justifiez votre réponse.

4.2. À l'instant t_2 , longtemps après l'addition de PCl_5 au mélange des substances initiales en équilibre chimique, la constante d'équilibre K :

- sera la même ?
- va augmenter ?
- va diminuer ?

Justifiez votre réponse.

Question 5.

La température augmente

5.1. Si à l'instant t_1 la température du système de substances initiales en équilibre chimique augmente considérablement, qu'est-ce qu'il va arriver au système ?

Justifiez votre réponse.

5.2. À l'instant t_2 , longtemps après l'augmentation de la température du mélange de substances initiales en équilibre chimique, la constante d'équilibre K :

- sera la même ?
- va augmenter ?
- va diminuer ?

Justifiez votre réponse.

Question 6.

À une température donnée, les substances gazeuses A, B, C, D peuvent

se trouver en équilibre chimique décrit par l'équation suivante :
 $A + B \rightleftharpoons C + D$.

Dans six récipients identiques vides à la même température on introduit les quantités suivantes de ces substances :

Récipient 1. 5 moles de A, 5 moles de B

Récipient 2. 5 moles de A, 5 moles de C

Récipient 3. 1 moles de A, 1 moles de B, 20 moles de C

Récipient 4. 2 moles de A, 2 moles de C, 0,5 moles de D

Récipient 5. 2 moles de A, 2 moles de B, 20 moles de C, 20 moles de D

Récipient 6. 2 moles de A, 2 moles de B, 2 moles de C, 2 moles de D

Pour chacun des systèmes ci-dessus, choisissez comme réponse une des cinq propositions suivantes : si vous n'êtes d'accord avec aucune de ces propositions, vous pouvez choisir VI.

I. La réaction avancera vers la droite jusqu'à l'équilibre chimique.

II. La réaction avancera vers la gauche jusqu'à l'équilibre chimique.

III. Le système ne va pas réagir.

IV. Le système se trouve à l'équilibre chimique.

V. Ces données sont insuffisantes pour arriver à une conclusion sur le déroulement de la réaction.

VI. Il se passera autre chose.

Dans tous les cas justifiez votre réponse.

NOTES

1. En Grèce, le programme officiel oblige à la notation citée et, afin de ne pas perturber les élèves, nous l'avons adoptée. Le terme « Q » doit être compris comme le fait que le $\Delta_r H^\circ$ de la réaction est positif.

2. De même, nous avons utilisé le terme « concentration d'un gaz » comme c'est très souvent le cas dans les manuels scolaires grecs.

3. Dans le programme et le manuel scolaire, on a affaire à des systèmes en équilibre chimique qui, après une perturbation, évoluent vers un nouvel équilibre chimique à volume constant.

Cet article a été reçu le 20/12/97 et accepté le 17/03/98.

Point de vue sur le nouveau programme en « Sciences de la nature » dans l'enseignement collégial au Québec

The new science's program in Québec colleges : a point of view

Richard HAINCE

Cégep de Sainte-Foy
2410, chemin Sainte-Foy
Sainte-Foy (Québec)
G1V 1T3, Canada.

Résumé

Les enseignants de sciences des collèges québécois appliquent depuis la rentrée 1999 le nouveau programme « Sciences de la nature ». Nous présentons ci-dessous le contexte dans lequel ils doivent travailler depuis la mise en place de « l'approche programme » et de « l'approche par compétences ». Ces approches résultent de l'application à l'enseignement collégial, des mesures prises lors du renouvellement de l'ensemble des programmes. Nous décrivons par la suite les principales caractéristiques du nouveau programme et soulevons quelques questions au regard des changements que les enseignants de sciences devront apporter à leurs

pratiques pédagogiques. Finalement, nous indiquons quelques pistes à privilégier afin que les étudiants développent les compétences qui les rendront aptes à relever les défis d'un monde où les technosciences sont omniprésentes.

Mots clés : *programme, sciences, compétences, approche, enseignement.*

Abstract

The science teachers of the Quebec colleges apply the new science program since fall 1999. We present here the context they are working with since we implement the program approach and the competency-based approach. These approaches came from the renewal of all the programs at the college level. We describe some important characteristics of the new program and we indicate which changes the teachers will have to do if they want to adopt new teaching methods and material. Finally, we suggest objectives to be pursued to ensure that students acquire the necessary scientific abilities to be fully functional in a world dominated by science and technology.

Key words : *program, science, approach, competency, teaching.*

Resumen

Los docentes de programa en los colegios de Quebec aplican desde el inicio del año escolar 1999 el nuevo programa « Ciencias de la naturaleza ». Presentamos aquí el contexto en el cual ellos deben trabajar desde la elaboración de « la aproximación del programa » y de « la aproximación de las competencias ». Estas aproximaciones resultan de la aplicación en la enseñanza colegial, de las medidas tomadas a partir de la renovación del conjunto de programas. Describimos a continuación las principales características del nuevo programa y formularemos algunas preguntas tomando en consideración los cambios que los docentes de ciencias deberán aportar a sus prácticas pedagógicas. Finalmente, damos algunas pistas a tomar en cuenta afin que los estudiantes desarrollen las competencias que los harán aptos para integrar y transferir sus conocimientos y extraer los defectos de un mundo donde las tecnociencias están omnipresentes.

Palabras claves : *programa, ciencias, aproximacione, competencia, enseñanza.*

1. INTRODUCTION

Le présent point de vue fait état de la capacité des enseignants de sciences du réseau collégial québécois (l'organisation de l'enseignement québécois est donnée en annexe) à répondre adéquatement à la réforme de l'enseignement proposée par le Ministère de l'Éducation du Québec (MÉQ) et à appliquer avec succès le nouveau programme « Sciences de la nature » avec tous les changements d'habitudes et d'attitudes que cela suppose.

Après avoir donné un bref aperçu des principaux changements imposés par la réforme concernant les nouvelles approches pédagogiques et administratives, nous décrivons les principales caractéristiques du programme « Sciences de la nature ». Nous indiquerons par la suite à quels problèmes les enseignants doivent faire face dans l'élaboration de la version locale du programme. Souvent livrés à eux-mêmes sans orientations ministérielles relatives à l'enseignement des sciences et sollicités de tous côtés par de nouveaux courants pédagogiques, les enseignants vivent en quelque sorte une rupture épistémologique profonde. Comment vont-ils réagir ? De quelles ressources disposent-ils ? Nous allons tenter de répondre à ces questions.

2. LE NOUVEAU PROGRAMME

2.1. Historique

Au Québec, le nouveau programme « Sciences de la nature 200-B0 », approuvé par le Ministère de l'Éducation, est en application dans les collèges d'enseignement général et professionnel (CÉGEP) depuis la rentrée de l'automne 1999. Ce programme préuniversitaire d'une durée de deux ans prépare les étudiants (d'âge moyen 17-18 ans) à de futures études universitaires dans les différentes facultés des sciences de la santé, de la vie, des sciences pures ainsi que des sciences appliquées des universités du Québec et d'ailleurs.

Bien que le nouveau programme fasse suite à celui qui était en vigueur depuis 1992, les véritables changements sont venus après l'importante réforme de l'enseignement collégial entreprise par le MÉQ (1993a), réforme qui a introduit, entre autres choses, les concepts « d'approche programme » et « d'approche par compétences ». Des modifications ont ainsi été apportées au Règlement sur le Régime des Études Collégiales (RRÉC) (Gouvernement du Québec, 1993), qui, notamment, impose maintenant une épreuve finale « synthèse de

programme ». Finalement, le Ministère complète la réforme en formant différents comités-conseils chargés de superviser les travaux de consultation, d'élaboration, de suivi et de révision menés au sein de chacun des programmes préuniversitaires. Selon les exigences de la réforme, l'élaboration des programmes d'études préuniversitaires se fait maintenant avec la collaboration de représentants des universités, ainsi que de représentants de la direction et du corps enseignant de collèges, siégeant aux comités-conseils.

En même temps que se réalisait cette grande réforme, le Ministère lançait un appel d'offre dans les collèges les invitant à initier l'expérimentation de programmes alternatifs en sciences de la nature de même qu'à développer de nouvelles approches pédagogiques dans ce domaine. Ces expérimentations visaient à consolider le programme de 1992 pour en faire un nouveau programme mieux adapté aux besoins des étudiants et des différents partenaires. Le nouveau programme est donc issu, en grande partie, des bilans réalisés et du consensus obtenu par les équipes qui ont conduit, de 1993 à 1996, les six expérimentations retenues par le Ministère de l'Éducation. Par la suite, les membres des différents comités ont disposé de peu de temps pour terminer, à l'automne 1998, l'élaboration du nouveau programme « Sciences de la nature ». Néanmoins, à en juger par les commentaires entendus lors du comité des enseignants et au dernier congrès de l'Association des Professeurs de Sciences du Québec (APSQ), la grande majorité des enseignants semble, jusqu'à présent, satisfaite du résultat.

Finalement le Ministère confiera à un comité-conseil la responsabilité de suivre l'évolution du programme et d'apporter, s'il y a lieu les ajustements nécessaires. Les collèges devront le mettre en application en respectant le cadre ministériel et procéder régulièrement à l'évaluation de sa mise en œuvre locale.

2.2. « Approche programme et « approche par compétences »

Il est important de souligner que la réforme a introduit plusieurs changements dans la structure des programmes du réseau collégial en commençant tout d'abord par préciser la notion de programme qui, de l'avis de plusieurs, ne correspondait auparavant qu'à une série de cours sans nécessairement de liens entre eux, sans fils conducteurs. Dans le RRÉC, un programme d'études est défini comme un ensemble intégré d'activités d'apprentissages visant l'atteinte d'objectifs de formation en fonction de standards déterminés.

Un deuxième changement vient de la volonté de donner aux étudiants une formation équilibrée, tous les programmes d'études comprennent maintenant deux grandes composantes de formation : une formation générale et une formation spécifique (voir tableau 1).

La composante de formation générale possède une triple finalité :

- l'acquisition d'un fonds culturel commun,
- l'acquisition et le développement d'habiletés génériques,
- l'appropriation d'attitudes souhaitables au développement intégral de toute personne.

Ces trois aspects visent à former la personne en elle-même, à la préparer à vivre en société de façon responsable et à lui faire partager les acquis de la culture. Cette formation comprend principalement des objectifs en langue d'enseignement et littérature, en philosophie, en langue seconde, en éducation physique et dans divers domaines culturels. Le cadre général, les intentions pédagogiques et les objectifs de cette formation sont communs à tous les programmes de formation.

La composante de formation spécifique de chaque programme d'études préuniversitaires vise la préparation aux études universitaires dans des domaines précis grâce à une formation axée sur l'intégration et le transfert des apprentissages. Dans le programme « Sciences de la nature », cette formation s'appuie sur des buts généraux et sur des objectifs reliés aux disciplines scientifiques que nous présenterons en détail plus loin.

Nombre total d'unités : 58 2/3		(une unité : 45 heures)	
Composante de formation générale		Composante de formation spécifique	
Nombre d'unités : 26 2/3		Nombre d'unités : 32	
Champ d'études : Langue d'enseignement et littérature Philosophie Langue seconde Éducation physique Deux autres domaines de formation générale complémentaire		Champ d'études : Biologie Chimie Mathématiques Physique Géologie Informatique	

Tableau 1 : Vue d'ensemble du programme ministériel « Sciences de la nature 200.B0 »

Un troisième changement se traduit dans la mise en œuvre d'un programme qui exige maintenant une approche nouvelle sur le plan de sa

gestion pédagogique, ce que l'on appelle « l'approche programme ». On peut résumer les discussions visant à cerner le concept de « l'approche programme » en disant que cette formation veut rassembler les personnes agissant au sein d'un même programme et les orienter vers des actions concertées afin que le programme soit perçu, non pas comme une simple juxtaposition de cours, mais comme un ensemble intégré où des liens sont établis entre les cours de même qu'entre chaque cours et les objectifs du programme. Les enseignants devront alors établir une communication plus étroite entre eux et favoriser le travail interdisciplinaire. De plus, comme nous le verrons plus loin, les enseignants devront faire en sorte que les cours de chaque composante du programme contribuent, d'une manière ou d'une autre, à l'atteinte des buts généraux du programme. Ainsi par exemple, certains cours de français et de philosophie de la composante de formation générale contribueront eux aussi à la culture scientifique des étudiants. Comme le mentionne Dorais : « *l'approche programme est un état d'esprit, une disposition de remettre le programme avec ses étudiants au centre des préoccupations et des actions, dorénavant collectives et concertées, de tous les agents éducatifs d'un collège* » (Dorais, 1995, p. 149). Cela signifie encore d'assurer la cohérence de l'activité éducative, de façon à favoriser l'intégration des apprentissages. Le programme constitue donc la base de l'enseignement collégial et un cours n'appartient pas à un enseignant ni à un département, mais il n'existe que dans la mesure où il contribue à l'atteinte des objectifs du programme. L'établissement d'une vision commune et partagée d'un même programme représente un beau défi à relever par les enseignants, à l'heure actuelle, dans le réseau collégial.

« L'approche par compétences », constitue un quatrième changement important et fait référence à la nouvelle façon utilisée par les fonctionnaires du MÉQ pour développer les programmes. Signalons qu'au Québec « l'approche par compétences » fut d'abord utilisée dans le cadre de la formation professionnelle dans les écoles secondaires, puis pour définir les objectifs de la composante de formation spécifique des programmes du secteur technique au niveau collégial. Par la suite, elle a été modifiée et adaptée pour réviser les objectifs de la composante de formation générale des programmes d'étude de l'ordre collégial. Finalement, le Ministère de l'Éducation a transféré l'approche à la composante de formation spécifique des programmes préuniversitaires. Or, le fait d'envisager la formation au collégial par le biais du développement de compétences chez l'étudiant a suscité plusieurs interrogations et a nourri les réflexions sur la pédagogie collégiale et sur l'enseignement. En ayant à implanter ces programmes, le réseau collégial a cherché à donner un sens aux changements introduits, ce qui l'a conduit à développer une vision de l'enseignement autour de « l'approche par compétences » comme approche pédagogique particulière. Les discussions visant à préciser le concept de compétence furent assez

longues, puisque le MÉQ, par l'intermédiaire du RRÉC, en donna d'abord une définition relativement vague, voire surprenante qui se lit comme suit : « *habileté ou connaissance à acquérir ou à maîtriser* » (RRÉC, p. 6). Finalement deux définitions finirent par faire consensus. Celle de Perrenoud qui les décrit comme « *des savoir-faire de haut niveau, qui exigent l'intégration de multiples ressources cognitives dans le traitement de situations complexes* » (Perrenoud, 1995, p. 20) a inspiré les discussions concernant le nouveau programme « Sciences de la nature » avec celle du Pôle de l'Est au Québec qui définit le concept de compétence en le précisant de la manière suivante : « *cible de formation centrée sur le développement de la capacité de l'élève, de façon autonome, d'identifier et de résoudre efficacement des problèmes propres à une famille de situations sur la base de connaissances conceptuelles et procédurales, intégrées et pertinentes* » (Pôle de l'Est, 1996, p. 15).

Dans cette perspective, pour les programmes préuniversitaires, « l'approche par compétences » consiste essentiellement à définir les compétences nécessaires à l'étudiant en vue de poursuivre des études universitaires dans des domaines précis et à les formuler dans le programme, en objectifs et en standards. Les enseignants sont dorénavant invités à mettre l'accent davantage sur l'intégration des apprentissages par l'étudiant que sur la transmission de connaissances sans liens avec un contexte significatif.

À partir de maintenant, chaque programme élaboré par le MEQ est constitué de compétences qui définissent les cibles de la formation, ce que les étudiants devront maîtriser au terme de leur programme de formation. Le programme n'établit pas des cours, il détermine plutôt les compétences à développer par les étudiants. Comme nous le verrons plus loin chaque compétence fait partie d'un objectif et d'un standard associé à l'objectif. Autrement dit, l'objectif est constitué de l'énoncé de la compétence à atteindre et des éléments qui permettent de le préciser et d'un standard. Le standard fixe le niveau de performance considéré comme le seuil à partir duquel on reconnaît que l'objectif est atteint. En précisant les critères de performance à partir desquels sera évaluée l'atteinte de la compétence, il fournit des indications utiles à la détermination du contexte d'évaluation des apprentissages.

Enfin, dans les programmes préuniversitaires, le MÉQ peut déterminer, en tout ou en partie, certaines caractéristiques des activités d'apprentissages qui conduiront au développement de la compétence visée. De l'avis de plusieurs, le terme « activité d'apprentissage » demande encore des précisions. En effet, comme le fait remarquer le Conseil supérieur de l'Éducation (CSÉ), « *Globalement, le terme activité d'apprentissage désigne les moyens pour réaliser les objectifs de formation. Plus concrètement,*

dans les documents du Ministère, on peut retrouver sous ce vocable des indications relatives à la pondération, au nombre d'unités de formation requis, aux disciplines concernées, aux préalables exigés ainsi que des précisions administratives et pédagogiques jugées essentielles pour atteindre les objectifs. C'est là une conception plutôt large et peu commune de la réalité activité d'apprentissage. En outre, bien qu'il s'agisse d'un concept central dans le partage des responsabilités ministérielles et institutionnelles en matière d'élaboration de programmes et qu'il soit utilisé ici de façon assez particulière, le terme activité d'apprentissage n'apparaît pas dans la liste de définitions prévues au règlement » (Conseil Supérieur de l'Éducation, 1998, p. 10). Comme on peut le constater, la signification véritable du terme « activité d'apprentissage » reste à venir.

Comme on peut le remarquer, avec cette « approche par compétences », on invite les enseignants à favoriser de nouvelles stratégies qui placeront le développement de l'étudiant au centre de leurs préoccupations. Ils devront, entre autres, s'approprier les compétences de l'ensemble du programme et en saisir les liens fonctionnels, mettre en place des stratégies d'enseignement qui permettent l'intégration des apprentissages et le transfert des compétences développées, situer la contribution des contenus disciplinaires à l'atteinte des compétences et revoir les modes et les instruments d'évaluation en misant sur l'intégration des apprentissages et la continuité de la formation.

Finalement, comme dernier changement, une nouvelle forme d'évaluation, « l'épreuve synthèse » de programme, viendra sanctionner au terme de la formation, la qualité et le degré d'intégration des connaissances et des habiletés intellectuelles, psychomotrices et affectives développées dans le cadre de la formation. « L'épreuve synthèse » devrait proposer à l'étudiant une ou des situations et des tâches qui nécessitent qu'il aborde plusieurs éléments de sa formation, qu'il établisse des liens entre ceux-ci et qu'il utilise des habiletés de haut niveau. Ainsi, les situations proposées de même que les tâches à réaliser devraient permettre à l'étudiant de démontrer les compétences qu'il a acquises et d'illustrer ses capacités d'intégration et de transfert. « L'épreuve synthèse » viendra attester le degré de maîtrise des apprentissages et sanctionner le diplôme des études collégiales (DÉC). Au secteur préuniversitaire, par exemple, on s'assurera entre autres que les étudiants sont en mesure de faire des liens entre les cours d'une même discipline ainsi qu'entre les différentes disciplines du programme avant leur entrée à l'université.

En conclusion, il est encore trop tôt pour évaluer la façon dont les différents collèges se sont appropriés les changements majeurs qui accompagnent le renouveau de l'enseignement collégial. « L'approche programme » va sûrement apporter plus de cohérence aux programmes

d'études et accentuer la concertation entre les enseignants des différentes disciplines. L'accent mis sur l'intégration et le transfert des apprentissages, dont l'évaluation est rendue incontournable par « l'épreuve synthèse » de programme, est déjà très bien accepté dans le réseau collégial. La transposition de « l'approche par compétences » au secteur préuniversitaire laisse encore plusieurs enseignants songeurs, étant donné le peu d'expertise qu'ils possèdent actuellement pour juger sa pertinence et son efficacité.

Avec les nouveaux programmes, le Ministère transfère donc beaucoup de responsabilité aux collèges. Ils les invitent à préparer leurs mises en œuvre de façon différente, en leur laissant le choix des moyens qu'ils entendent mettre en place pour assurer la réussite des étudiants. En somme, chaque collège doit maintenant établir les activités (cours, laboratoires, stages), la séquence de ces activités, leurs contenus et les ressources qui lui permettront de faire de chaque programme une offre de formation enrichissante et structurée. Ceci constitue ce que l'on pourrait nommer « l'élaboration de la version locale du programme ». Le plus souvent, pour ce faire, on formera une équipe de travail de laquelle feront partie des enseignants des différentes disciplines concernées.

2.3. Le programme « Sciences de la nature »

Comme tous les programmes d'études préuniversitaires, le programme « Sciences de la nature » comprend essentiellement une finalité qui est explicitée par des buts généraux, de même que des objectifs et leurs standards, qui déterminent les compétences dont le développement est attendu chez les étudiants. De plus, des exigences reliées aux « activités d'apprentissage » sont précisées pour la composante de la formation spécifique du programme. Bien que le Ministère de l'Éducation fixe une grande partie des balises de ce programme d'études, chaque collège bénéficie d'une certaine autonomie de sorte que le contenu (connaissances et habiletés intellectuelles, psychomotrices et affectives essentielles d'une compétence) et la séquence des cours permettant de développer l'ensemble des compétences pourront varier selon les établissements.

Le programme s'inscrit dans une véritable continuité avec les programmes d'études universitaires ; il prône « l'approche programme » ; il vise une éducation centrée sur la maîtrise des apprentissages, selon une approche dite « par compétences » ; il vise une éducation qui contribue au développement intégral de la personne.

Le document ministériel précise également la finalité du programme en soulignant qu'il vise essentiellement à préparer l'étudiant aux études universitaires dans les domaines reliés aux sciences de la santé et de la

vie, aux sciences pures ainsi qu'aux sciences appliquées. Cette finalité peut paraître assez limitée. Par contre, comme les buts généraux l'indiqueront plus loin, les visées de la formation proposée rejoignent toutefois ce que l'on nomme, dans le réseau des collèges, les objectifs de formation fondamentale.

Les caractéristiques essentielles de cette formation ont fait l'objet de nombreux débats dans le réseau des collèges avant la réforme de l'enseignement collégial pour finalement faire consensus autour de la conception décrite par le Conseil supérieur de l'Éducation : « *La formation fondamentale vise le développement intégral de la personne, c'est-à-dire qu'elle recoupe ce qu'on nomme généralement le cognitif, le socio-affectif et le psychosocial. Elle nécessite un point d'ancrage dans un champ de savoir ou de savoir-faire. Elle poursuit la maîtrise des concepts de base, des repères historiques, des démarches méthodiques permettant d'accéder aux fondements philosophiques, épistémologiques, historiques et méthodologiques d'un champ de savoir, elle ouvre sur la transdisciplinarité. La formation fondamentale implique la cohérence. Elle se réalise à partir de savoirs organisés et intégrés. Elle s'appuie sur une cohérence disciplinaire et poursuit des apprentissages systématiques et unifiés. Elle permet la transférabilité des apprentissages* » (Conseil supérieur de l'Éducation, 1989, p. 9).

C'est ce type de formation qui a inspiré la formulation des buts généraux du programme lesquels représentent l'esprit du programme et constituent des macro-compétences ou compétences transdisciplinaires essentielles à tout étudiant ayant atteint le niveau des études supérieures. Elles transcendent l'ensemble des disciplines, « *...et orientent l'élaboration de chaque programme, en faisant ressortir des cibles qui pourront favoriser sa cohérence de même que l'intégration et le transfert des apprentissages. En facilitant l'harmonisation des visées éducatives de la formation générale avec celles de la formation spécifique, les buts généraux concrétisent la finalité du programme, c'est-à-dire l'acquisition par l'étudiant ou l'étudiante de capacités essentielles à la réussite d'études universitaires* » (Programme 200.B0, p. iii).

Les douze buts généraux du programme « Sciences de la nature » suivants viennent préciser la finalité du programme :

- appliquer une démarche scientifique ;
- résoudre des problèmes de façon rigoureuse ;
- utiliser des technologies appropriées de traitement de l'information ;
- raisonner avec rigueur ;
- communiquer de façon claire et précise ;

- apprendre de façon autonome ;
- travailler en équipe ;
- établir des liens entre la science, la technologie et l'évolution de la société ;
- définir son système de valeurs ;
- situer le contexte d'émergence et d'élaboration des concepts scientifiques ;
- adopter des attitudes utiles au travail scientifique ;
- traiter de situations nouvelles à partir de ses acquis.

On y retrouve la plupart des objectifs reliés à la conception implicite que les enseignants se faisaient d'une formation fondamentale en sciences avant la réforme. Pour les enseignants, la prise en charge des buts généraux dans les cours du programme constitue un beau défi. Mais sont-ils prêts à s'engager dans de nouvelles approches pédagogiques ? Nous y reviendrons plus loin. D'autres questions préoccupent encore un certain nombre d'enseignants de sciences. L'autonomie des collèges dans la mise en œuvre locale des programmes ne conduira-t-elle pas à établir une certaine compétition entre les collèges ? Ne serait-il pas nécessaire de maintenir des programmes identiques d'un établissement à l'autre afin de maintenir la crédibilité du programme face aux universités comme l'estime la grande majorité des enseignants de sciences ? Compte tenu du fait que les contenus et la séquence des cours peuvent être différents, comment seront pris en compte les acquis des étudiants lorsque certains iront poursuivre dans un autre collège leurs études déjà entreprises ailleurs en sciences de la nature ?

En plus de buts généraux, le Ministère prescrit aussi, comme nous l'avons mentionné précédemment, les compétences à atteindre sous la forme d'objectifs et de standards ainsi que certaines exigences en ce qui a trait aux « activités d'apprentissages ». Rappelons que pour le Ministère, une activité d'apprentissage peut correspondre à un cours, à des TP en laboratoire ou à un stage. À titre d'exemple, l'encadré 1 suivant illustre la fiche ministérielle (devis) explicitant la compétence à atteindre en physique, une des disciplines de la composante de formation spécifique du programme « Sciences de la nature ».

CODE 00UR	
Physique Mécanique	
OBJECTIF	STANDARD
Énoncé de la compétence	
Analyser différentes situations et phénomène physique à partir des principes fondamentaux reliés à la mécanique classique.	
Éléments	Critères de performance
Décrire le mouvement de translation et de rotation des corps.	Utilisation appropriée des concepts, des lois et des principes.
Appliquer les concepts et les lois de la dynamique à l'analyse du mouvement des corps.	Schématisation adéquate des situations physiques.
Effectuer des calculs de travail et d'énergie dans des situations simples.	Utilisation d'une terminologie appropriée.
Appliquer les principes de conservation de la mécanique.	Représentation graphique et mathématique adaptée à la nature du mouvement.
Vérifier expérimentalement quelques lois et principes reliés à la mécanique.	Justification des étapes retenues pour l'analyse des situations.
	Application rigoureuse des lois de Newton et des principes de conservation.
	Jugement critique des résultats.
	Expérimentation minutieuse.
	Présence des éléments constitutifs d'un rapport de laboratoire selon les normes établies.
« ACTIVITÉS D'APPRENTISSAGE »	
Champ d'études : Sciences de la nature	
Discipline : Physique	
Pondération : 3 heures de cours reliées davantage à la théorie, 2 heures de travaux pratiques ou d'exercices, 3 heures d'étude par semaine	
Nombre d'unités : 2 et 2/3 unités pour le trimestre ; 1 unité = 45 h d'activités	
Précisions :	
Quantités physiques scalaires et vectorielles : unités et dimensions.	
Cinématique des différents mouvements de rotation et de translation : position, déplacement, vitesse linéaire et angulaire, accélération.	
Force dynamique de translation et de rotation.	
Énergie et travail mécanique.	
Principes de conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.	

Encadré 1 : Exemple du « devis » ministériel d'une compétence du programme « Sciences de la nature »

Sans entrer dans les détails, mentionnons simplement qu'en « Sciences de la nature », la composante de formation spécifique comprend treize compétences dont dix sont construites selon ce modèle. En outre, et contrairement à d'autres programmes pour lesquels la compétence n'est atteinte qu'après avoir suivi plusieurs cours du programme, il n'y a qu'une seule compétence à atteindre par cours dans le programme « Sciences de la nature ». Les dix compétences obligatoires sont réparties de la façon suivante : une en biologie, deux en chimie, trois en mathématiques, trois en physique et une compétence multidisciplinaire concernant l'intégration des apprentissages. Cette dernière compétence vise le développement des capacités identifiées par les buts généraux du programme. Enfin, trois compétences peuvent être offertes de façon obligatoire ou au choix des étudiants selon leur profil de sortie : sciences pures, sciences appliquées et sciences de la santé.

Ainsi, pour chacune des compétences de la formation spécifique, les enseignants doivent, à partir du devis ministériel, préciser le contenu, les habiletés intellectuelles et socio-affectives à développer, la manière de prendre en charge les buts généraux du programme, les méthodes pédagogiques à privilégier et, enfin, les modes d'évaluation qui permettront d'attester l'atteinte de la compétence. Selon les collèges, une partie ou la totalité de ces éléments peuvent être développés en équipe, faire consensus et constituer un « plan cadre institutionnel » du cours.

Si, dans l'ensemble, le programme est assez explicite, on doit cependant reprocher au Ministère d'être resté muet quant aux intentions éducatives sous-jacentes à l'enseignement des sciences. Quelle vision des sciences souhaite-t-il voir véhiculer par les enseignants dans le réseau collégial ? Quel rôle les différentes disciplines jouent-elles dans le programme ? Voilà autant de questions auxquelles les enseignants auraient aimé avoir des réponses. Il en va de même pour les buts généraux. Dans quelle perspective les enseignants doivent-ils les aborder ? De façon traditionnelle ou selon une approche constructiviste ? En ne donnant pas d'orientations le Ministère laisse la place à une multitude de possibilités, diluant ainsi les débats qui auraient pu être fort animés et très intéressants concernant le rôle des sciences dans les sociétés modernes. Les enseignants auraient eu des points d'ancrage pour renouveler et pour préciser leur conception des sciences et, par voie de conséquence, leur pratique. Espérons que le comité-conseil chargé de suivre la mise en œuvre du programme à l'échelle du réseau pourra remédier à cette situation.

Finalement, les enseignants sont appelés à jouer un très grand rôle dans l'élaboration locale des programmes. Comme cela est souvent le cas en éducation, une grande partie du succès d'une réforme repose sur eux. On peut se demander s'ils en resteront à leur approche traditionnelle axée

sur la transmission des connaissances ou s'ils se tourneront vers des approches contemporaines dans lesquelles l'étudiant est davantage actif ? S'engageront-ils dans les voies tracées par les récents travaux de la psychologie cognitive, du constructivisme et des nouvelles technologies de l'information et des communications ? Est-ce trop leur demander en même temps compte tenu du peu de préparation qu'ils ont reçue ? Les prochains colloques et congrès des différentes associations d'enseignants et de conseillers pédagogiques œuvrant dans le réseau collégial nous permettront de faire le point l'an prochain sur les changements que les enseignants auront vraiment effectués dans leurs pratiques pédagogiques.

3. APPROCHES PÉDAGOGIQUES

3.1. Responsabilité locale dans l'élaboration des programmes d'études

Puisque les collèges jouissent d'une grande autonomie dans l'élaboration de la version locale des programmes d'études, il faudra faire attention car selon le degré d'expertise des personnes en place, les chemins par lesquels les étudiants passeront pour atteindre les compétences pourront s'avérer fort différents.

En effet, en 1994 lors de l'implantation de « l'approche par compétences » en formation générale, on retrouvait une tendance à mettre l'accent sur les habiletés génériques supérieures comme celles définies dans la taxonomie de Bloom. Les connaissances, pour leur part, venaient appuyer le développement des habiletés et des compétences. Il semblait y avoir une certaine dichotomie entre habiletés et savoirs, comme le mentionnait récemment Perrenoud « *l'opposition entre savoirs et compétences est à la fois fondée et injustifiée : elle est injustifiée parce que la plupart des compétences mobilisent certains savoirs, elle est fondée, parce qu'on ne peut développer des compétences à l'école sans limiter le temps dévolu à la pure assimilation de savoirs, ni sans mettre en question leurs organisations en disciplines cloisonnées. Le véritable débat devrait porter sur les finalités prioritaires de l'école et sur les équilibres à respecter dans la rédaction et la mise en œuvre des programmes.* » (Perrenoud, 1999, p. 14).

Or, pour ce qui est du programme « Sciences de la nature », ce débat n'a pas encore eu lieu dans tous les collèges. Cependant, ceux qui ont participé aux expérimentations et dont le programme était déjà formulé par compétences ont sûrement eu l'occasion de réfléchir à la place que les savoirs doivent occuper au sein des compétences. On peut donc supposer

que ces collèges et d'autres plus avancés dans la réflexion se sont appuyés sur l'idée, soutenue par de plus en plus de personnes, qu'une compétence se manifeste dans l'action et, par conséquent, on peut supposer qu'ils ont choisi les savoirs à développer en fonction de leur transfert et de leur mobilisation dans des situations complexes. Le réseau collégial attend impatiemment leurs résultats.

D'autres collèges qui estiment que l'approche par compétences n'apporte pas vraiment de nouveauté auront probablement le réflexe de conserver en grande partie leurs approches et leurs contenus traditionnels ; du moins tant qu'ils n'auront pas la « preuve » que cela met en péril la réussite des étudiants à l'université. Or, jusqu'à maintenant, les universités sont, dans l'ensemble, assez satisfaites de la formation scientifique des étudiants du collégial ; il faudra donc du temps avant de vaincre les résistances aux changements. Par ailleurs, dans la plupart des facultés vers lesquelles nos étudiants se dirigent, l'acquisition de connaissances conserve toujours le haut du pavé et, bien que certaines aient commencé à introduire une approche par compétences, il faudra encore bien des années avant de rallier l'ensemble des universités.

Cette autonomie locale peut être stimulante pour certains, mais elle peut introduire également de grande disparité entre les collèges des différentes régions.

3.2. Approche traditionnelle ou contemporaine

Le nouveau programme en sciences de la nature se veut en partie une réponse aux lacunes observées dans l'ancien programme. Parmi celles-ci on trouve, comme le rappelle Garnier : « *l'absence d'objectifs de programme, absence d'intégration entre les cours, aucun lien explicite entre les différents cours de la formation spécifique, pas de concertation entre les disciplines sur plusieurs aspects importants de la pédagogie, l'enseignement des sciences est souvent abstrait et théorique et il vise seulement à soutenir la logique interne du contenu de la discipline* » (Garnier, 1998, p. 9B44) ; bref, l'enseignement magistral règne en maître dans l'ensemble du programme et les enseignants sont isolés dans leur salle de cours.

En plus des changements prescrits dans les documents ministériels, « l'approche programme » et « l'approche par compétences » doivent amener des changements dans les approches pédagogiques utilisées par les enseignants. Sont-ils disposés à changer ? Disposent-ils de modèles pour le faire ?

Théoriquement oui. En effet, depuis quelques années, la psychologie cognitive, le constructivisme, les activités centrées sur l'apprentissage et l'intégration des nouvelles technologies d'information et de communication fournissent aux enseignants de nombreuses approches pédagogiques dans lesquelles les étudiants jouent un rôle plus actif.

3.3. Activités centrées sur l'apprentissage

Si l'apport de la psychologie cognitive et l'importance de l'intégration et du transfert des apprentissages (Tardif, 1999) ont trouvé une bonne oreille chez les enseignants de sciences, il en va autrement pour l'application d'une approche constructiviste et le défi de l'évaluation des compétences. Ces deux éléments constitueront les véritables tests permettant de vérifier si les changements souhaités par la réforme sont réellement apparus dans les approches pédagogiques des enseignants.

Mis à part quelques ouvrages, tels celui de Larochelle & Désautels (1992) ainsi que celui de Guilbert & Ouellet (1997), les enseignants de sciences du collégial ne disposent pas de beaucoup d'informations concernant l'approche constructiviste. En ce qui a trait à l'enseignement des sciences au Québec, les modèles proposés et les discussions qui se sont engagées par la suite ont surtout eu lieu au secondaire. En effet, on retrouve dans la revue « *Spectre* », de l'Association des professeurs de sciences, plusieurs articles consacrés à ce sujet dont entre autres celui de Bégin. Elle souligne que « *le constructivisme radical va très loin sur la question du relativisme du savoir. Faute de pouvoir accéder à la connaissance de la vérité absolue, pour le constructiviste radical, le savoir est subjectif et incertain* ». (Bégin, 1996, p. 11). Plus loin, elle poursuit : « *l'approche constructiviste a contribué à l'évolution de l'éducation scientifique à plus d'un égard. Les apports les plus significatifs de ce courant de pensée résident dans la préoccupation de tenir compte davantage de l'apprenant, en mettant en évidence la difficulté qu'ont certains enfants à s'approprier les concepts scientifiques. L'enseignement devient un processus où la compréhension et la connaissance ne sont pas transmises mais négociées à travers le processus d'apprentissage* ». (Bégin, 1996, p. 13). Depuis quelques années, les enseignants de sciences au secondaire ont été invités à mettre en œuvre cette approche dans leurs cours. Aux dernières nouvelles, celle-ci s'implanterait difficilement dans les pratiques des enseignants de sciences du secondaire.

Au niveau de l'ordre collégial, les discussions sur le constructivisme sont peu fréquentes. On trouve rarement des articles explicitement consacrés à cette approche dans la revue « *Pédagogie collégiale* » qui suscite chez les enseignants d'importantes réflexions sur leurs pratiques

pédagogiques. Il est vrai cependant que, parfois, la psychologie cognitive et le constructivisme sont confondus, bien qu'il semble que la première soit surtout en rapport avec l'enseignement et le traitement de l'information, tandis que le constructivisme soit surtout en lien avec l'apprentissage.

Par conséquent, au collégial, les enseignants de sciences ne disposent pas encore de modèles suffisamment structurés pour susciter chez eux l'idée d'une éventuelle application de l'approche constructiviste dans leur cours. Bien que l'on retrouve ici et là des éléments du constructivisme dans la planification de leur enseignement, la plupart des enseignants ne sont pas encore vraiment preneurs. Avec quarante deux étudiants par groupe, ils ont besoin d'exemples concrets. En fait, ils ont toujours principalement la même préoccupation : d'abord couvrir le programme.

C'est donc ici que les professeurs d'université responsables des certificats d'enseignement au collégial, des groupes comme PERFORMA (Organisation offrant des programmes et des activités de perfectionnement) et des associations comme l'AQPC (Association québécoise de pédagogie collégiale, et l'APSQ (Association des professeurs de sciences du Québec) peuvent contribuer à l'émergence des modèles qui plairont aux enseignants et les inciteront à les appliquer dans leurs cours. Il ne faut pas oublier que les enseignants ont reçu une formation essentiellement magistrale et que les cours de pédagogie ne sont pas obligatoires pour enseigner au collégial. Par conséquent, il est naturel qu'ils reconduisent ce modèle tant que les étudiants qui poursuivent des études universitaires seront satisfaits et tant que les professeurs des différentes facultés de sciences seront satisfaits eux aussi de la formation que les étudiants reçoivent au collégial.

En plus des nouvelles stratégies d'enseignement et d'apprentissage, celles reliées à l'évaluation des apprentissages se sont également développées avec les réflexions qu'ont engendrées « l'approche programme » et « l'approche par compétences ». En effet, comme le soulignait déjà Goulet en conclusion d'un article sur le sujet : « *Ainsi donc, l'approche par compétences s'accorde mal avec les pratiques actuelles d'évaluation continue, la comptabilité des notes, qui conduit à mesurer les apprentissages un à un, paraît inadéquate lorsqu'on cherche à mesurer la maîtrise d'une compétence, d'un tout intégré. De plus, l'approche par compétences nous oblige à considérer les mesures à mettre en œuvre à la suite de l'évaluation sommative, mesures auxquelles, présentement, nous portons très peu attention et dont la mise en application, dans le contexte actuel, constituerait un véritable casse-tête. Bref, il ne fait aucun doute qu'envisager les apprentissages sous l'angle des compétences nous conduira inmanquablement à revoir nos façons de concevoir et de pratiquer l'évaluation.* » (Goulet, 1993, p. 36).

Or, il s'avère que la grande majorité des enseignants de sciences n'ont pas encore reçu de formation sur la façon d'apporter des changements dans leurs pratiques en matière d'évaluation tant formative que sommative. De plus, avec les exigences de la tâche et le nombre de groupes d'étudiants sous leur responsabilité qui ne cessent d'augmenter, on peut se demander comment ils pourront passer à travers cette nouvelle obligation véhiculée par l'approche par compétences. Comme Tremblay, lors du colloque de l'AQPC en juin dernier, on peut se demander comment les enseignants vont réussir à passer d'une évaluation morcelée et punitive à une évaluation de synthèse, collaborative et au service de l'apprentissage. (Tremblay, 1999, 10B41). Pour l'instant, les évaluations formative et sommative des compétences demeurent un beau problème !

CONCLUSION

Les changements qui sont survenus dans le réseau collégial québécois au cours des dernières années sont à la fois rapides et profonds. Les enseignants n'ont pas disposé de beaucoup de temps pour s'ajuster. Ils se sentent vraiment bousculés.

« L'approche programme » demande la collaboration de tous et chacun et comme le soulignait monsieur Réal Cantin, représentant des enseignants au comité conseil du programme Sciences de la nature, « *Pour bien implanter les buts généraux dans les cours, il faut une concertation soutenue entre tous les enseignants du programme, tant ceux de la formation générale que ceux de la formation spécifique ; c'est ce qu'implique l'approche programme. Cependant la structure disciplinaire dans les collèges et l'absence de ressources pour les programmes, rendent la concertation difficile* (Cantin, communication privée) ». J'ajouterais également que, jusqu'à maintenant, les enseignants ont surtout travaillé de façon assez individuelle. On peut donc s'attendre à ce que l'habitude de travailler en équipe demande une période de rodage avant que les points de vue différents véhiculés par les enseignants des diverses disciplines puissent trouver des points de convergence dans les orientations pédagogiques du programme. La mise en place d'une véritable approche programme est encore à venir.

En ce qui concerne « l'approche par compétences » dans le secteur des sciences, les enseignants commencent à se faire la main et à se faire une certaine idée de sa mise en œuvre. L'assimilation de la démarche d'évaluation qui découle de cette approche et qui consiste à faire une plus grande place à l'évaluation formative et à garder pour la fin du cycle d'apprentissage l'évaluation sommative ne fait pas encore partie de la pratique de beaucoup d'enseignants. Encore là, les modèles manquent.

L'épreuve « synthèse de programme » exprime l'aboutissement du programme. Il est donc nécessaire que celui-ci soit cohérent et que tous les intervenants s'associent pleinement aux orientations du programme. Elle constitue une nouvelle tâche qui nécessitera chez ceux qui y travailleront rigueur, mais aussi créativité. L'obligation pour les élèves de réussir cette épreuve afin d'obtenir leur diplôme d'études collégiales devrait conduire de plus en plus les enseignants à viser l'intégration et le transfert des apprentissages pour éviter les effets néfastes d'un enseignement qui conduit les étudiants à apprendre par tiroir sans faire de liens. Mais comme me le soulignait récemment madame Denise Provencal, Présidente de l'APSQ, « *Nous exigeons des enseignants qu'ils mettent en pratique quelque chose qu'ils n'ont probablement jamais expérimenté à savoir : la synthèse et l'intégration dans un contexte d'approche programme. Nous devons faire preuve d'un peu de patience.* » (Provencal, communication privée)

Sur le papier, la structure du nouveau programme est beaucoup plus visible et cohérente avec la finalité et l'explicitation des buts généraux. Ces derniers permettent, au-delà des contenus disciplinaires, de bien cerner ce que l'on entend par l'acquisition d'une bonne formation scientifique chez les étudiants. Il manque cependant des précisions concernant les intentions éducatives visées par l'enseignement des sciences. Rappeler aux enseignants que les savoirs sont construits, que les modèles, les notions, les lois et les théories scientifiques sont des représentations mises au point par les humains et pour les humains en vue de comprendre le monde qui les entoure aurait certainement donné aux enseignants une direction à privilégier dans leur enseignement.

Ainsi, le passage du paradigme de la transmission des connaissances à celui des activités d'apprentissage centrées sur l'étudiant demandera de la part des enseignants d'importants changements de mentalité. Or dans le domaine de l'éducation et particulièrement dans le contexte actuel, tout changement rencontre son lot de résistances. Non pas par mauvaise volonté, mais surtout parce que les enseignants doivent s'adapter rapidement aux différentes situations qui surviennent dans une salle de cours de plus en plus surpeuplée. Ceux-ci ont besoin de formation et de disposer d'exemples concrets avant d'être à l'aise avec les nouvelles approches proposées par la réforme. En effet, dans le paradigme de l'enseignement c'est l'enseignant qui contrôle la classe et les discussions alors que dans celui de l'apprentissage se sont les étudiants par leurs activités et leurs questionnements qui assureront la dynamique de la classe. Or, en attendant les ressources nécessaires à leur formation, les enseignants manquent actuellement de pratique pour instaurer cette nouvelle approche pédagogique de l'apprentissage.

BIBLIOGRAPHIE

- BÉGIN R. (1996). Conception de la science et intervention pédagogique. *Spectre*, vol. 26, n° 2, pp. 10-16.
- CONSEIL SUPÉRIEUR DE L'ÉDUCATION (1989). *La pédagogie, un défi majeur de l'enseignement supérieur*. Québec, Gouvernement du Québec, pp. 9-10.
- CONSEIL SUPÉRIEUR DE L'ÉDUCATION (1998). *Modifications au règlement sur le régime des études collégiales. Avis à la ministre de l'Éducation*. Québec, Gouvernement du Québec.
- DORAIS S. (1995). *Enseigner au collégial*. Montréal, Association québécoise de pédagogie collégiale.
- GARNIER F. (1998). L'intégration des apprentissages en sciences de la nature. In *AQPC, Actes du 18e colloque de l'Association québécoise de pédagogie collégiale, section 9B44*. Montréal, AQPC, p. 9B44.
- GOULET J.-P. (1993). L'évaluation sommative des compétences, un beau problème. *Pédagogie collégiale*, vol. 7, n° 2, pp. 33-36.
- GOVERNEMENT DU QUÉBEC (1993). *Loi modifiant la loi sur les collèges d'enseignement général et professionnel, Règlement sur le régime des études collégiales (L.Q.1993c 25)*. Québec, Gouvernement du Québec.
- GUILBERT L. & OUELLET L. (1997). *Étude de cas, apprentissage par problèmes*. Québec, PUQ.
- LAROCHELLE M. & DÉSAUTELS J. (1992). *Autour de l'idée de la science, Itinéraires cognitifs d'étudiants*. Bruxelles, De Boeck.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION DU QUÉBEC (1993a). *L'enseignement collégial québécois : orientations d'avenir et mesures de renouveau. Des collèges pour le Québec du XXIe siècle*. Québec, Ministère de l'Éducation du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION DU QUÉBEC (1993b). *Loi sur la Commission d'évaluation de l'enseignement collégial, L.Q.1993c 26*. Québec, Ministère de l'Éducation du Québec.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION DU QUÉBEC (1998). *Programme d'études 200.B0, Sciences de la nature*. Québec, Ministère de l'Éducation du Québec.
- PERRENOUD P. (1995). Des savoirs aux compétences ; de quoi parle-t-on en parlant de compétences ? *Pédagogie collégiale*, vol. 9, n° 1, pp. 20-24.
- PERRENOUD P. (1999). Construire des compétences, est-ce tourner le dos aux savoirs ? *Pédagogie collégiale*, vol. 12, n° 3, pp. 14-17.
- PÔLE DE L'EST (1996). *Processus de planification d'un cours centré sur le développement d'une compétence*. Sherbrooke, Regroupement des collèges Performa.
- TARDIF J. (1992). *Pour un enseignement stratégique. L'apport de la psychologie cognitive*. Montréal, Les Éditions Logiques.
- TARDIF J. (1999). *Le transfert des apprentissages*. Montréal, Les Éditions Logiques.
- TREMBLAY D. L'enseignement et l'apprentissage abordés par le biais des compétences : effets dans notre pratique. In *Actes du 19e Colloque AQPC, Montréal*. Montréal, AQPC, p. 10B41.

Sites Internet susceptibles d'intéresser le lecteur :

Enseignement collégial

<http://www.meq.gouv.qc.ca/ens-sup/ens-coll/index.htm>

Commission d'évaluation de l'enseignement supérieur

<http://www.ceec.gouv.qc.ca/>

Conseil supérieur de l'Éducation

<http://www.cse.gouv.qc.ca/Default.htm>

ANNEXE

Organisation simplifiée de l'enseignement québécois

Enseignement primaire

Premier cycle	Première à troisième année	6 à 9 ans
Deuxième cycle	Quatrième à sixième année	10 à 12 ans

Enseignement secondaire

Premier cycle	Première à troisième secondaire	13 à 15 ans
Deuxième cycle	Quatrième à cinquième secondaire	16 à 17 ans
Formation professionnelle et technique	Deux ans	16 à 17 ans

Enseignement collégial

Programme d'études préuniversitaires	Deux ans	18 à 19 ans
Programme d'études techniques	Trois ans	18 à 20 ans

Enseignement universitaire

Premier cycle :	Certificat et baccalauréat	Trois à quatre ans
Deuxième cycle	Diplôme et maîtrise	Deux à trois ans
Troisième cycle	Doctorat	Trois à quatre ans
	Post-doctorat	

RÉPONSE À UN POINT DE VUE

Reply to a point of view

**Les départements de physique se
laisseront-ils convaincre ?**

**Réponse au point de vue de
H. Niedderer paru dans *Didaskalia*
n° 14 : « Recherche et
développement en didactique
de la physique à l'université :
résultats et tendances ».**

**Will the physics departments let
themselves be convinced ?**

**Answering H. Niedderer's point of view
published in *Didaskalia* n° 14 :
« Research and development in Physics
Didactics at University ; issues and
trends ».**

Marie-Geneviève SÉRÉ

DidaScO
Université Paris Sud XI, Bâtiment 333
91405 Orsay cedex, France.

H. Niedderer, dans son point de vue, fait une revue de recherches existantes et présente des « *questions possibles de recherche* » (p. 105) pour améliorer l'enseignement de la physique au début de l'Université. En conclusion, il préconise la coopération des départements de physique avec les chercheurs en didactique.

En tant qu'enseignante rattachée à un département de physique et coordinatrice du projet européen « *Labwork in Science Education* » (p. 108), je pose la question : les départements de physique, en particulier ceux des universités françaises, trouveront-ils convaincant ce que H. Niedderer leur dit de la recherche en didactique de la physique ? À mon sens, si tel est l'état, et tels sont les projets actuels de cette recherche, supposée applicable à l'Université, la réponse risque fort d'être négative.

La réflexion doit impérativement être prolongée. On trouvera ci-dessous ébauchées les quelques directions selon lesquelles, d'après mon expérience personnelle, l'évolution s'impose. Elles n'épuisent pas le sujet, et le travail dans ce domaine commence à peine.

1. COMPRENDRE ET APPRENDRE, OUI, MAIS QUOI ?

C'est par les mots de « *compréhension et apprentissage de la physique* » (pp. 101 et 104) que H. Niedderer décrit l'essentiel de ce qui doit se passer dans l'enseignement. Il est indéniable que la didactique a un réel acquis sur les apprentissages conceptuels et sur la caractérisation des obstacles que rencontrent les étudiants dans l'acquisition des concepts. Plusieurs groupes de didactique non cités dans ce point de vue – particulièrement en France – ont déjà pu rassembler de façon communicable les acquis en ce domaine¹. Cependant, ces résultats, dont certains ont déjà une bonne vingtaine d'années d'existence, doivent ouvrir à de nouvelles perspectives. Ils n'ont probablement plus l'attrait de la nouveauté pour les lecteurs de *Didaskalia*. Il apparaît maintenant indispensable de marier les modèles constructivistes pour les apprentissages conceptuels, avec l'ensemble des apprentissages qui font qu'un bachelier devient un physicien.

Le problème n'est pas mince : de nombreuses autres compétences et savoirs sont requis pour tendre vers ce but. Aussi, le débat, de nos jours, se déplace de la seule acquisition des contenus, vers la définition d'apprentissages plus larges, qui impliquent d'ailleurs souvent une *utilisation* de savoirs conceptuels, sans se limiter à la *compréhension*. On peut citer, entre autres, la capacité à structurer l'information récoltée lors d'une recherche bibliographique, la capacité à organiser une expérimentation, à en formuler les questions au sein de modèles disponibles, la capacité à juger de la pertinence des méthodes de traitement des données, de plus

en plus nombreuses de nos jours, etc. Quel que soit le nom qu'on leur donne, les savoirs, les savoir-faire, les compétences que les départements de physique se doivent d'apporter aux étudiants qui leur sont confiés, sont en train de se diversifier². Là réside un enjeu pour la recherche en didactique, qui dépasse la « *compréhension* » de la physique.

2. L'APPORT, ET LA JUSTE PLACE, DES TRAVAUX PRATIQUES (TP)

Au sein de l'élargissement et de la redéfinition des objectifs de l'enseignement du début d'université, le rôle des travaux pratiques est potentiellement important. On pourrait imaginer que les résultats maintenant connus sur les processus d'apprentissage et les difficultés des étudiants, amènent à revoir profondément la structure cours-TD-TP qui existe en France et dans d'autres pays. Quoi qu'il en soit, le travail expérimental a et gardera une place spécifique dans l'enseignement.

Lors de l'analyse d'une enquête auprès d'enseignants, l'équipe allemande du projet européen « Labwork in Science Education », sous la responsabilité de H. Niedderer, a cru pouvoir rassembler sous les rubriques « *relier la théorie à la pratique* » et « *motiver les étudiants* » beaucoup des objectifs formulés par les enseignants pour les travaux pratiques (p. 108). Cependant beaucoup de chercheurs et d'enseignants reconnaissent que les TP peuvent aller beaucoup plus loin ou même ailleurs. Les équipes européennes, travaillant à ce projet, ne disposaient que de deux années de véritable temps de recherche. Elles n'ont pas travaillé sur la motivation, mais ont amorcé un travail qu'il faut continuer : mettre à jour les nombreux objectifs que l'activité pratique dans l'enseignement est à même de mettre en jeu, et d'atteindre. Les TP sont le lieu privilégié pour :

- comprendre, par l'action, la variété des activités autour de la modélisation (non seulement vérifier un modèle, mais l'utiliser, le soumettre à la simulation, en déterminer les conditions de validité et les domaines d'application, le comparer à d'autres, etc.) ;

- acquérir des capacités de jugement pour traiter des données et prendre au sérieux les relations complexes qui permettent de passer des données quantitatives aux théorisations, et des théories au recueil des données ;

- affronter et surmonter toutes les embûches qui accompagnent le montage d'une expérimentation pour laquelle la connaissance de procédures variées et de certaines technologies, informatiques ou non, se combine aux savoirs conceptuels.

Aussi, on peut tomber d'accord avec H. Niedderer, quand il écrit que de nouvelles formes de travaux pratiques devront être imaginées. L'imagination des enseignants et des chercheurs devra s'inspirer directement de ces objectifs dès que leur définition aura progressé. Par exemple, la réussite des activités de projet, qui sont l'objet de beaucoup d'espoirs, ne va pas de soi, et nécessite une définition soigneuse des objectifs, à partir d'innovations déjà réalisées, par exemple dans plusieurs universités françaises. Entre autres, les questions posées et la participation des enseignants³ sont à étudier et à améliorer grâce à des recherches approfondies. Contrairement à ce qui est suggéré dans le point de vue de H. Niedderer, le projet européen cité n'a pu entamer aucune recherche sur la formation des enseignants⁴ pour animer toute forme de TP plus ouverts que les TP « classiques ». Ce sont ceux que nous connaissons dans beaucoup d'universités françaises. L'apport de ce type de TP classiques, qui ont le mérite d'exister, est d'ailleurs loin d'être négligeable. Si l'on renonce à en espérer trop, c'est-à-dire un apprentissage exhaustif de la physique (ce que l'on fait avec la tête et avec les mains), les TP classiques peuvent assurer des acquisitions modestes mais solides, qu'il est temps de repérer.

3. LA MOTIVATION DES ÉTUDIANTS

Comme le dit H. Niedderer, les inscriptions en filières scientifiques baissent dans de nombreux pays (pp. 99 et 100). Le phénomène n'est pas nouveau, puisqu'il s'est amorcé depuis au moins cinq ans⁵. On dispose donc déjà d'études qui traitent d'autre chose que du « *contentement* » ou de « *l'ennui* » des étudiants à qui l'on demande une appréciation après un cours ou une séance de TP (p. 100). Ainsi, le problème a pu être considéré plus largement, en le resituant dans le paysage général, puisque le nombre total d'étudiants diminue lui aussi (Promosciences⁶, 1999). Manifestement, l'amont et l'aval des études universitaires ont un impact qui explique bien des choses.

En amont, il s'agit de se demander quelle représentation de la pratique des scientifiques, les étudiants apportent avec eux dans la salle de TP ou en cours : curiosité de l'infiniment grand de l'astrophysique et de l'infiniment petit des quarks ? Fascination du pouvoir du généticien ? Méfiance du nucléaire et des aliments transgéniques ? Impression pour l'étudiant que la science est hors de sa portée ? Scepticisme sur ce qu'il peut y faire, ou conviction qu'il peut lui aussi comprendre ? Que fait-il de ces représentations quand, pour lui, le problème est de ne pas rester bloqué dans un problème par une équation différentielle ? L'étude de ces images et de leurs transformations, au fil de l'enseignement, est une des façons de considérer la motivation des étudiants pendant ce temps d'initiation ardu et difficile du début d'université.

En aval, se profile le problème crucial de l'emploi. Le débat est vif chez les enseignants d'université (Promosciences, 1998) au sujet de la formation à apporter aux étudiants : formation à tendance professionnelle, ou plutôt formation à tendance personnelle, au sens de culturelle et scientifique. Les ministres de l'éducation européens recherchent ensemble des solutions qui s'inspirent de la première alternative, avec des sorties vers le monde professionnel à 3, 5 et 8 ans. C'est une raison de plus pour que les savoirs académiques et conceptuels fassent leur place à des savoirs et des compétences différents, et aux enseignements dits d'ouverture.

4. CONCLUSION

Le propos ici esquissé est que, si les didacticiens souhaitent être écoutés par, et collaborer avec les départements de physique des universités, il leur faut prendre en compte les questions que la conjoncture a fait surgir récemment. Certes les possibilités d'applications ne constituent pas un critère de qualité des recherches. Mais si tel est le but que se donne une partie de la communauté des didacticiens, les conséquences sont importantes : bien que les acquis sur l'apprentissage conceptuel soient solides, communicables et applicables, il faut se tourner maintenant vers des innovations et des travaux visant à enseigner des compétences plus pratiques en même temps que les contenus. On tendra alors à ce que l'étudiant « ... *pense en homme d'action et agisse en homme de pensée* ». (Bergson, cité par Renaud-Coulon et Sérieyx, 1999, p. 25).

NOTES

1. Des travaux de didactique réalisés en France ont produit des questionnaires plus diversifiés que les tests FCI cités à trois reprises (pp. 101, 102 et 103). Ainsi, dans le domaine de la mécanique, le LDPEs à l'Université Paris 7 (devenu récemment le LDSP) a élaboré de nombreux outils ayant les mêmes finalités. Dans d'autres domaines de la physique aussi, ce laboratoire, ainsi que d'autres dans la région parisienne (le DidaScO à l'Université Paris XI, le GDSEP7, etc.) et en province (à Toulouse et à Marseille en particulier), ont accumulé des résultats communicables aux départements de physique.

2. On a pu lire dans *Didaskalia* n° 13, sous la plume du Professeur B. Decomps (1998), un exemple de compétence originale à faire acquérir aux étudiants, à un niveau cependant différent du DEUG. La proposition est accompagnée d'une présentation des modalités d'évaluation.

3. C'est volontairement que nous utilisons ici le mot «enseignants» quand il s'agit d'universités françaises. En effet, le mot de tuteurs a en France une signification précise. La tâche des tuteurs, qui sont des étudiants et n'interviennent jamais en TP, est régie par l'arrêté du 18 mars 1998. Il se peut que, dans d'autres pays francophones, les TP soient animés par des étudiants avancés, et qu'ils portent un autre nom.

4. Le projet «Labwork in Science Education» (titre français : «Les travaux pratiques dans l'enseignement des sciences») ayant réalisé trois grandes enquêtes et vingt-trois études de cas, n'a pas formulé d'hypothèses aussi globales que le laisserait supposer le point de vue de H. Niedderer. On trouvera celles qui ont fondé chacun des travaux dans le rapport final cité.

5. La tendance s'est inversée en France en 1998, sans que l'on puisse savoir s'il s'agit d'une fluctuation ou si elle se confirmera dans l'avenir (Note d'information 99.05 de la Direction de la Programmation et du Développement, 1999).

6. Promosciences est l'association pour la promotion et le développement des premiers et seconds cycles universitaires en sciences fondamentales et appliquées.

BIBLIOGRAPHIE

DECOMPS B. (1998). Point de vue : La formation professionnelle et la création d'activités. *Didaskalia*, n° 13, pp. 113-127.

DIRECTION DE LA PROGRAMMATION ET DU DÉVELOPPEMENT (1999). *Note d'information 99.05*. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale de la Recherche et de la Technologie.

MÉRY M.-C. (Éd.) (à paraître). *Actes du colloque Promosciences, 31 mai-2 juin 1999 «Où vont les sciences en France et en Europe ? »* Orsay, Éditions Orsay Plus.

RAVIER J.-M. (Éd.) (1998). *Actes du colloque Promosciences, 18-20 mai 1998, «Promosciences élabore son plan pour l'Université 2000 »*. Valenciennes, Éditions Promosciences.

RENAUD-COULON A. & SÉRIEYX H. (1999) «*Reprenons la Bastille*». Paris, Éditions Village Mondial.

Report of innovation

Fédérer des activités pédagogiques pour constituer un projet intégré en mécatronique : compte rendu d'innovation

To federate pedagogical activities to set up an integrated project in mechatronics : report of innovation

Damien GRENIER, Paul FISETTE, Benoît RAUCENT

CEREM (Centre de Recherche en Mécatronique)
Université catholique de Louvain
Bâtiment Stévin - Place du Levant, 2
B-1348 Louvain-la-Neuve, Belgique.

Résumé

La conception intégrée de systèmes combinant mécanique, génie électrique, informatique et automatique constitue une nouvelle discipline, la mécatronique, que la faculté des Sciences Appliquées de l'Université catholique de Louvain (UCL) a décidé depuis trois ans d'enseigner dans le cadre d'un nouveau diplôme en électromécanique, orientation mécatronique. Un des éléments originaux de cette formation est un projet intégré en mécatronique dont l'objectif est l'intégration au sein d'un même objet des

différentes matières vues en cours. Cet article est un compte rendu d'une première expérience qui a conduit à la réalisation, par les étudiants de cette spécialité, de robots mobiles capables de se déplacer dans un labyrinthe pour y récupérer des balles et les placer dans des cibles déterminées.

Mots clés : *apprentissage par projet, fédération d'activités didactiques, conception intégrée, mécatronique.*

Abstract

The integrated conception of systems combining mechanics, electrical engineering, computer and control science constitutes a new domain, the mechatronics, that the Faculty of Engineering of the Université catholique de Louvain (UCL) has decided three years ago to teach via a new diploma in electromechanics, with an orientation in mechatronics. One of the original part of this formation is an integrated project in mechatronics, whose aim is the integration, in an unique device, of the various topics of that discipline previously taught in lectures. This paper describes this experience which has led to the realization of mobile robots able to move in a labyrinth, to pick up balls and put them in defined targets.

Key words : *project based learning, federation of didactic activities, integrated design, mechatronics.*

Resumen

La concepción integrada de los sistemas combinando mecánica, ingeniería eléctrica, informática y robótica constituye una nueva disciplina, la mecatrónica, que la facultad de ciencias aplicadas de la Universidad Católica de Louvain (UCL) decidió implementar después de tres años de enseñar en el marco de un nuevo diploma en electromecánica. Uno de los elementos originales de esta formación es un proyecto integrado en mecatrónica cuyo objetivo es la integración en el seno de un mismo objeto de las diferentes materias vistas en el curso. Este artículo es un informe de una primera experiencia que condujo a la realización, por los estudiantes de esta especialidad, de robots móviles capaces de desplazarse dentro de un laberinto para recuperar pelotas y colocarlas en puntos determinados.

Palabras claves : *aprendizaje por proyecto, federación de actividades, didácticas, concepción integrada, mecatrónica.*

1. INTRODUCTION

L'intégration au génie mécanique du génie électrique (électronique, électrotechnique), de l'informatique et de l'automatique constitue une étape de plus en plus cruciale dans les fonctions de conception, de fabrication et d'exploitation de produits et de processus. Il en résulte la nécessité pour l'ingénieur d'adopter une approche interdisciplinaire et intégrée qui exploite au mieux les synergies existant entre les disciplines mises en jeu. Cette approche, qui peut être désignée par le terme de mécatronique, constitue une nouvelle discipline qui a montré toute son efficacité en permettant d'allier étroitement les progrès réalisés dans les différents domaines concernés pour concevoir de nouveaux produits et processus, apportant non seulement des progrès quantitatifs en termes de performances mais aussi l'émergence de fonctionnalités nouvelles.

Depuis trois ans, la faculté des Sciences Appliquées de l'Université Catholique de Louvain (UCL, Belgique) a décidé d'enseigner cette discipline à ses étudiants dans le cadre d'un nouveau diplôme d'ingénieur civil électromécanicien, orientation « mécatronique ». Cette formation s'appuie sur un certain nombre de cours de mécanique, de génie électrique, d'informatique et d'automatique qui permettent aux étudiants d'acquérir des connaissances dans les différents domaines concernés. Cependant, pour prétendre à être une véritable formation en mécatronique, elle doit également comporter un « lieu » où les étudiants peuvent aborder les problèmes liés à une conception intégrée (c'est-à-dire une optimisation globale d'un système électromécanique) par opposition à une conception séparée de chacune des parties qui constituent le système.

Cette problématique de l'intégration peut difficilement s'aborder lors de cours magistraux. Il ne s'agit pas en effet d'une matière qui peut être théorisée mais plutôt d'une expérience, d'un savoir-faire qui peut soit se transmettre par des cycles de séminaires, soit s'acquérir en concevant et en réalisant soi-même des systèmes et des dispositifs mécatroniques, dans le cadre d'un projet. C'est cette deuxième approche qui a été privilégiée dès l'origine par les concepteurs du programme d'étude en électromécanique, dans la mesure où elle permet une attitude active de l'étudiant dans son apprentissage.

Initialement, il était prévu que le lieu où se ferait cette conception intégrée de systèmes mécatroniques serait le « *Projet de construction mécanique* » (inscrit au programme de la 2^e année technique). Ce projet fait partie depuis longtemps des enseignements par « situation problème » destinés aux ingénieurs civils mécaniciens (Aguirre & Raucent, 1998), avec comme objectif leur formation, par la pratique, à la conception de dispositifs et d'appareils mécaniques. Une simple adaptation de cet enseignement a

donc été menée, à titre expérimental, durant l'année universitaire 1996-1997, de façon à lui donner, pour les étudiants électromécaniciens, une orientation mécatronique, en intégrant davantage un certain nombre d'aspects liés à la motorisation des processus et à l'utilisation de capteurs pour en contrôler l'évolution.

Il convient cependant de noter que la double formation des étudiants électromécaniciens en électricité et en mécanique ne leur laisse pas la possibilité d'avoir une formation en conception mécanique suffisamment avancée à ce stade de leurs études (par comparaison avec les étudiants mécaniciens). De ce fait, même en considérant des dispositifs mécaniques excessivement simples, il leur est impossible dans le volume horaire défini (80 heures d'exercices), de mener, en plus du travail de conception mécanique, une étude suffisamment poussée des parties motorisation, commande et capteurs pour leur permettre une optimisation globale du dispositif. L'intégration des connaissances des étudiants dans les domaines de l'électricité et de la mécanique ne saurait donc être faite dans ce cadre, à moins d'accepter :

- soit de faire « parrainer » les étudiants électromécaniciens par des étudiants mécaniciens, électriciens (voire informaticiens et automaticiens) pour mener à bien les études des différentes parties du système, ce qui revient à renoncer à faire de ces étudiants des ingénieurs généralistes dans les domaines de l'électricité et de la mécanique pour en faire des ingénieurs spécialistes de l'intégration ;

- soit d'augmenter le volume horaire consacré à ces projets.

La première solution a été rejetée par les étudiants électromécaniciens eux-mêmes, lorsqu'ils ont été invités à tirer le bilan du projet en mécatronique de l'année universitaire 1996/1997. La seconde solution, plus satisfaisante sur le plan intellectuel, est en revanche extrêmement délicate à mettre en œuvre, compte tenu du fait que, pour couvrir l'essentiel des domaines de la mécanique et de l'électricité, le programme de cours des étudiants mécatroniciens est déjà très chargé.

Il était certes envisageable de constituer ce volume horaire en prélevant des heures d'exercices attachées à des cours théoriques abordant par exemple les problèmes de motorisation, de commande, de capteurs, d'implantation d'algorithmes en temps réel, mais ceci aurait rompu le lien cours théorique / exercices d'application avec tous les risques que cela comporte. Plutôt que de constituer un tel « méga-projet », il a été choisi, à titre expérimental pour l'année 1997/1998, de fédérer un ensemble de projets et de travaux de laboratoires, jusque-là indépendants les uns des autres, autour d'un même dispositif électromécanique à concevoir et à réaliser par les étudiants en adoptant une véritable démarche de mécatroniciens. C'est ce que nous avons appelé « le projet intégré en mécatronique ».

Le thème choisi a été la conception d'un robot autonome capable de se mouvoir dans un labyrinthe, d'aller y ramasser des balles et de les déposer dans des endroits précis (cf. section 2). Cette initiative a concerné, pour cette première expérience, les heures d'exercices des quatre enseignements (figure 1) intitulés :

- « *Projet de construction mécanique* » (aspects de conception et de construction mécanique des robots) ;
- « *Commande électronique des moteurs électriques* » (aspects de motorisation et de pilotage des moteurs électriques employés pour actionner les différents dispositifs mécaniques) ;
- « *Instrumentation et capteurs* » (aspects capteurs et traitement électronique des signaux issus de ces capteurs utilisés par le robot tant pour se localiser lui-même dans le labyrinthe que pour repérer les balles) ;
- « *Électronique III* » (réalisation d'une communication sans fil entre le robot et l'ordinateur assurant son pilotage).

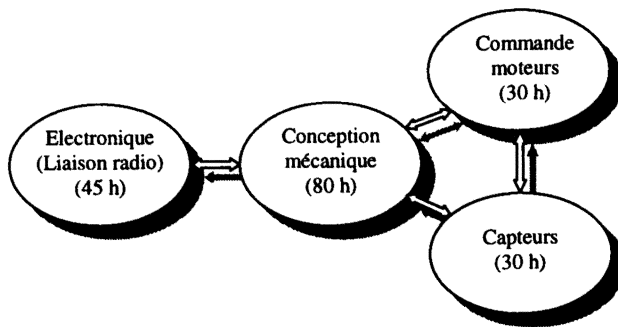


Figure 1 : Partenaires du projet intégré et nombre d'heures d'exercices correspondant à chaque cours

Pour ce projet intégré, il était difficile d'en rester à une phase de conception « sur plans » sans passer à la phase de réalisation, contrairement à ce qui se fait pour les étudiants mécaniciens. Cette phase de réalisation est en effet le seul moyen pour les étudiants d'évaluer par eux-mêmes la pertinence des choix réalisés et leur cohérence dans le cadre d'une conception intégrée. La mise à disposition aux étudiants d'un mécano (de marque Fischertechnik®) a permis à ceux-ci, par groupe de quatre, de mener à bien leur projet de conception, jusqu'à la phase de réalisation et même de compétition, étape ultime et source de grande motivation.

Ainsi, tout en gardant la philosophie de conception sous-jacente au projet des mécaniciens, en y intégrant les aspects électriques et

électroniques dispensés au travers des cours d'électricité, les étudiants ont mené à bien (et avec succès !) le projet intégré, avec le plaisir de réaliser eux-mêmes un robot mobile (et d'en montrer publiquement les performances) en y appliquant et en y intégrant un grand nombre de notions acquises dans le cadre des cours théoriques.

Cet article est un compte rendu de cette première expérience. Il est organisé comme suit. L'objectif, donné aux étudiants sous la forme du règlement d'une compétition, est décrit dans la section 2 tandis que la démarche qui leur a été imposée est détaillée dans la section 3. On trouvera enfin en section 4 une description sommaire des réalisations effectuées par les étudiants.

2. OBJECTIF DU PROJET INTÉGRÉ

Le but final du projet intégré a été défini par l'ensemble de l'équipe enseignante avec pour principaux objectifs de faire réaliser un système

- nécessitant la mise en œuvre des concepts essentiels faisant partie du contenu des cours impliqués ;
- gardant un niveau de complexité compatible avec la charge horaire prévue pour ces projets et réalisable avec des moyens (financiers et humains) raisonnables ;
- ayant un attrait ludique de façon à motiver les étudiants impliqués.

Il aurait été, certes, très formateur, pour des étudiants ingénieurs, de réaliser un système pouvant avoir une finalité industrielle, mais compte tenu des moyens humains et financiers mobilisables pour cette première expérience, il est vite apparu que seul un contexte ludique pouvait satisfaire au critère de motivation des étudiants. Il leur a donc été demandé de concevoir un engin destiné à se mouvoir dans un labyrinthe (cf. figure 2) et qui soit capable, à partir d'une station de départ A :

- de prendre 3 balles de golf placées dans une zone de stockage définie ;
- de les faire parvenir dans 3 cibles : une boîte C1, un trou de golf C2 et un panier C3.

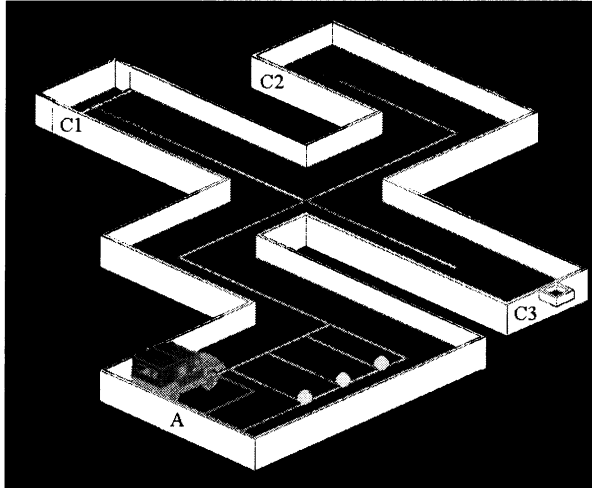


Figure 2 : Vue d'ensemble du labyrinthe

Toutes les caractéristiques du labyrinthe étaient connues des étudiants. Celui-ci, réalisé en début d'année, était accessible aux étudiants qui ont ainsi pu l'utiliser pour faire tous les essais utiles. La dimension hors-tout du labyrinthe était de 2m sur 2m. Les couloirs avaient une largeur de 300mm, les murs une hauteur de 70mm. Le sol était noir avec des lignes blanches au milieu des couloirs sauf à proximité de la cible C3. Une fois l'engin placé manuellement à la station de départ, aucune intervention humaine, ni sur l'engin, ni sur le programme de commande n'était permise.

Une compétition publique était prévue à l'issue de ce projet au cours de laquelle les robots concurrents seraient départagés sur la base du nombre de cibles atteintes (en tenant compte de la difficulté croissante) et du temps mis par le robot pour accomplir cette tâche.

3. DÉMARCHE SUIVIE

En plus de fixer un objectif, l'équipe enseignante a voulu imposer une démarche de travail structurée pour la réalisation de ce projet intégré. Le but était d'éviter que les étudiants ne réalisent l'objectif fixé par le biais d'un habile bricolage qui serait trop éloigné de la démarche de conception que doit suivre un ingénieur dans un contexte plus industriel. Nous avons donc divisé le travail en trois étapes suivant le calendrier de la figure 3.

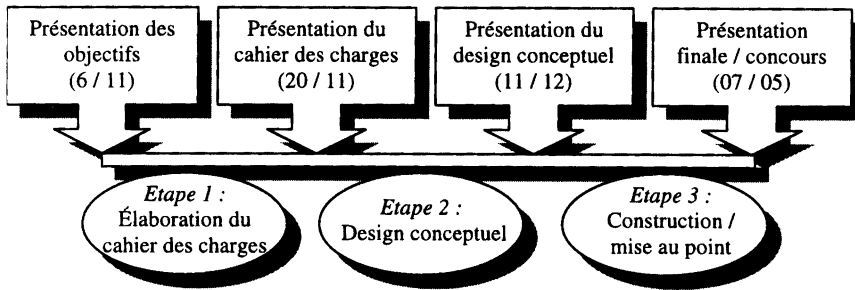


Figure 3 : Calendrier du projet intégré

3.1. Établissement d'un cahier des charges

À partir des éléments connus (concrètement : le règlement), les étudiants devaient établir le cahier des charges du dispositif à concevoir en définissant clairement les objectifs, les performances et les contraintes. Nous avons imposé aux étudiants la présentation proposée par Pahl et Beitz (Pahl & Beitz, 1988). À titre d'exemple nous donnons ci-après (tableau 1) les éléments clés d'un des cahiers des charges rédigé par les étudiants :

Objectifs :	<ul style="list-style-type: none"> - Déplacement d'un engin dans un labyrinthe. - Chargement de 1 à 3 balles de golf. - Placement des balles dans différentes cibles.
Performances :	<ul style="list-style-type: none"> - Exécution des tâches par programmation. - Évolution dans le labyrinthe à partir de la position de départ sans intervention humaine (sauf éventuellement retour au départ après dépôt d'une balle). - Temps d'exécution maximum : 10 mn pour les 3 balles. - Élévation d'une des balles à 70 mm au-dessus du sol.
Contraintes :	<ul style="list-style-type: none"> - Dimensions et caractéristiques du labyrinthe (voir plan). - Moteurs Fischertechnics imposés (maximum 6). - Alimentation par batteries (8x1,2V). - Masse d'une balle = 44g. - Diamètre de la balle = 42,5 mm. - Couleur des balles : blanche. - Transmission sans fil du PC au robot. - Installations électroniques de commande et de transmission vers le PC embarquées. - Température de service : 10 à 30°C. - Fonctionnement à l'intérieur (pas de pluie, pas de vent, etc.)

Tableau 1 : Éléments clés d'un des cahiers des charges rédigés par les étudiants

3.2. Design conceptuel

Une fois le cahier des charges clairement défini, les étudiants devaient imaginer / concevoir un engin capable de remplir les fonctions demandées. Ils ne devaient pas, à ce stade, se préoccuper du mécano imposé pour la réalisation du prototype final (ce mécano ne leur était d'ailleurs pas encore distribué).

Il a paru important à l'équipe d'enseignants de laisser à ce stade la plus grande liberté possible aux étudiants dans le choix de leur solution. Ils ont été encouragés à utiliser des techniques de « brain-storming » pour dégager un maximum de solutions possibles pour chacune des fonctions à réaliser (tableau 2) et à faire ensuite un choix justifié parmi l'ensemble de ces solutions, en tenant compte des combinaisons possibles. L'équipe encadrant les étudiants (professeurs et assistants) n'a pas souhaité, à ce stade, imposer « la » solution qui lui paraissait la plus raisonnable mais, au contraire, privilégier la diversité des concepts.

	Solution 1	Solution 2	Solution 3	Solution 4	Solution 5
Mouvement					
Direction					
Transmission					
Suivi trajectoire					

Tableau 2 : Exemple de tableau morphologique proposé par les étudiants pour la fonction « déplacement »

Des séances de consultation en conception mécanique ont été organisées avec les enseignants concernés tout au long de la période de design conceptuel tandis que des séances de laboratoire étaient proposées en électricité pour caractériser les moteurs électriques employés et faire appréhender plus justement aux étudiants les difficultés de la commande des moteurs électriques et de la mise en œuvre des capteurs d'environnement. L'ensemble de ces séances avait pour but d'aider les étudiants à définir un concept réaliste et pas trop coûteux en temps de réalisation et de mise au point. L'objectif d'une grande diversité des concepts mis en œuvre a été largement atteint dans la mesure où les trois groupes d'étudiants ont proposé des solutions fort différentes pour chacune des fonctions du robot (tableau 3).

Fonction	Groupe 1 : la « Tour Infernale »	Groupe 2 : « Baby Rollmobs »	Groupe 3 : la « Moissonneuse »
Déplacement	Chenilles différentielles.	Une roue motrice + une roue à galets pour l'orientation + deux billes porteuses de soutien.	Deux roues différentielles + quatre billes porteuses de soutien.
Prise de balle	Portique latéral + grue.	Grue	Tapis roulant + plan incliné.
Placement des balles	Par ouverture de clapets. Tir latéral pour cible 1.	Tir par ouverture de clapets ou ouverture de la grue.	Par mouvement du tapis roulant.

Tableau 3 : **Principales caractéristiques des robots conçus par les étudiants (étape de l'avant-projet)**

Le concept imaginé par les étudiants devait également être matérialisé sous la forme de plans d'ensemble (dessin manuel ou à l'aide du logiciel Autocad®) et/ou via une maquette (figures 4 et 5). Les principaux choix (système de déplacement, mécanismes de prise et de placement des balles mais aussi nombre de moteurs, type de transmission, emplacement des batteries, type et nombre de capteurs, etc.) et les cotes fonctionnelles de l'engin devaient ainsi être fixés à l'issue de cette phase.

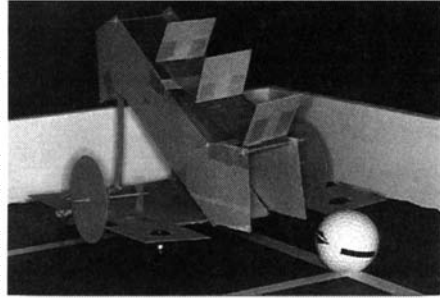
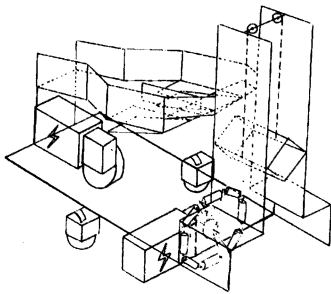


Figure 4 : **Avant-projet du groupe 2**

Figure 5 : **Avant-projet du groupe 3**
(photo T. Vast)

3.3. Phase de construction

Ce n'est qu'une fois le concept parfaitement défini que la phase de construction des robots a pu commencer. Elle comprenait :

- la construction de la structure mécanique des robots en utilisant de préférence (mais non exclusivement) des pièces du mécano mis à leur disposition ;
- le dessin de tous les plans du système réalisé au moyen du logiciel Autocad® (figure 6) ;
- la conception et la mise au point des circuits électroniques de commande des moteurs et de traitement des informations fournies par les capteurs. Pour cette tâche, les étudiants disposaient de circuits imprimés développés par l'équipe enseignante en fonction de leurs besoins prévisibles (tels qu'ils pouvaient apparaître au stade de l'avant-projet). Pour des raisons de coût, un seul modèle de circuit a été réalisé, à charge pour les étudiants de le configurer et de l'adapter à leurs besoins particuliers ;
- l'écriture et la mise au point de l'algorithme de pilotage de l'engin à travers le labyrinthe (on rappelle que, d'après le règlement, celui-ci devait évoluer de façon autonome), en utilisant le logiciel Labview® ;
- enfin, la conception et la réalisation d'une communication sans fil entre l'ordinateur de commande (type PC) et le robot.

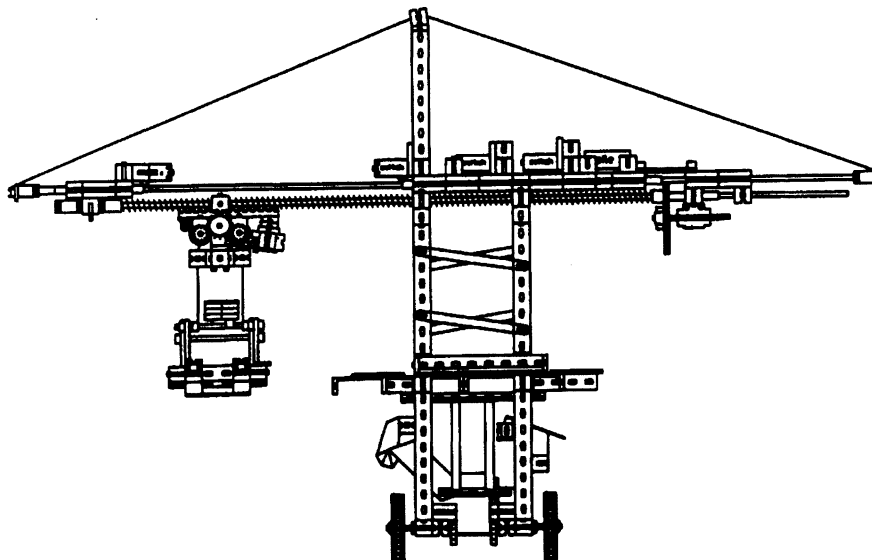


Figure 6 : Plan d'ensemble du robot réalisé par le groupe 1 (la « Tour Infernale »)

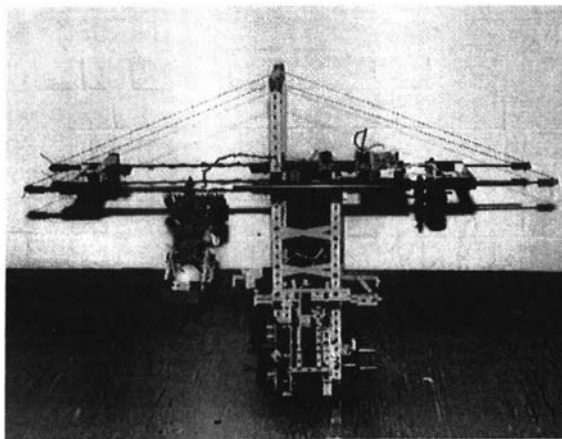


Figure 7 : La « Tour Infernale » (photo T. Vast)

4. LES RÉALISATIONS

Trois robots ont finalement été réalisés par les douze étudiants (répartis en trois groupes de quatre) concernés par le projet. Chacune des versions finales de ces robots était très proche de l'avant-projet du premier quadrimestre, même si des modifications ont dû être apportées (principalement pour pouvoir adapter le concept aux éléments du mécano disponibles).

Le premier groupe a réalisé une grue se déplaçant sur des chenilles qui a été baptisée la « Tour Infernale » (figure 7). Celle-ci ramasse les balles dans le labyrinthe au moyen d'une pince qui s'ouvre et se referme automatiquement sur la balle par une simple action mécanique (aucun moteur n'est présent au niveau de la pince elle-même). Les balles sont stockées dans la structure et libérées par un système d'électroaimants.

Le second groupe a mis en œuvre un concept original pour le déplacement du robot : une roue classique motorisée assure le déplacement tandis qu'une roue à galets, également motorisée, permet les changements de direction. Enfin deux billes porteuses stabilisent le véhicule (figure 8). Ce concept lui a valu le surnom de « Baby Rollmobs » par analogie avec le robot mobile « Rollmobs » développé à l'UCL (Ferrière, 1998). Les balles sont collectées dans le labyrinthe par un élévateur à palettes et non plus par une grue comme prévu dans l'avant-projet (voir tableau 3).

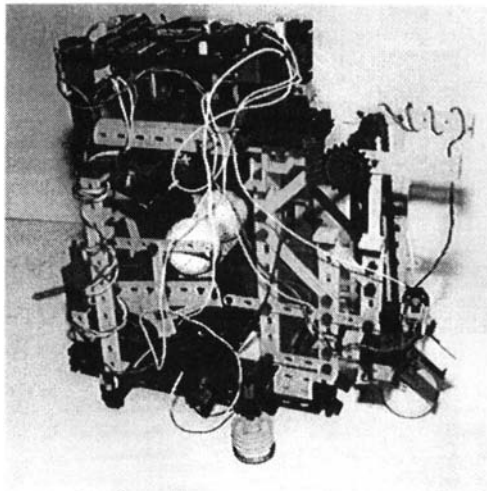


Figure 8 : « **Baby Rollmobs** » (photo T. Vast)

Enfin le troisième groupe a réalisé le robot le plus compact et sans doute le plus fidèle à l'avant-projet (figure 9). Il s'agit d'un robot mû par deux roues différentielles et supporté par deux billes porteuses (au lieu de quatre dans l'avant-projet). La préhension des balles, leur stockage et leur lâcher sont réalisés au moyen d'un tapis roulant muni de palettes en plan incliné qui lui a valu le nom de « Moissonneuse ».

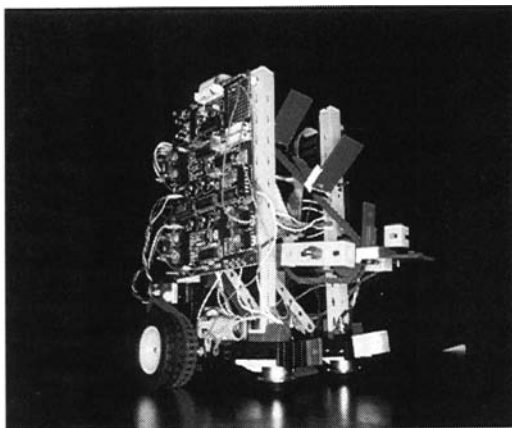


Figure 9 : La « Moissonneuse » (photo T. Vast)

Les essais préliminaires de la dernière semaine ont montré que tous ces robots étaient capables de réaliser la tâche qui leur était demandée et répondaient donc pleinement au cahier des charges. Le « stress » de la compétition finale et la chance ont départagé les candidats : la « Tour Infernale » a remporté l'épreuve avec un parcours sans faute et le meilleur temps.

5. CONCLUSION

L'expérience du projet intégré s'est révélée très positive. Elle a permis en effet aux étudiants d'appréhender de façon concrète les problèmes liés à la conception d'un dispositif combinant des aspects mécaniques, électriques, informatiques et automatiques.

Le volume horaire nécessaire à la réalisation d'un tel projet a pu être mobilisé en fédérant un certain nombre d'activités de type exercices / travaux pratiques liés à des cours théoriques où sont abordés les différents aspects (conception mécanique, motorisation, capteurs, électronique) ce qui a permis de ne pas rompre le lien existant entre ces activités et les

cours et donc de maintenir une interaction continue entre ces deux types d'activité pédagogique.

Lors d'une réunion de bilan de ce projet, les étudiants ont exprimé leur pleine satisfaction vis-à-vis du projet qu'ils considèrent dorénavant comme au cœur de leur formation en mécatronique et ont vivement encouragé les promoteurs à renouveler l'expérience pour les années à venir. Ils ont particulièrement apprécié la liberté qui leur a été donnée de concevoir un robot mobile dans son intégralité et selon leurs propres idées, de le fabriquer et de le faire fonctionner en public.

Il faut être conscient que l'organisation d'un tel projet demande un investissement considérable en temps de la part des étudiants eux-mêmes et de l'équipe enseignante qui doit se montrer extrêmement soudée et flexible. Il est en effet très difficile d'assurer à la fois une bonne cohésion du projet dans son ensemble tout en gardant l'œil sur les objectifs particuliers des différents cours impliqués.

Les leçons tirées de cette première expérience permettront dans les années à venir de réduire le temps consacré à ces projets tout en conservant, nous l'espérons, les principales qualités qui en font tout l'intérêt et qui lui ont valu le Prix de Pédagogie 1998 de la faculté des Sciences Appliquées de l'Université catholique de Louvain.

BIBLIOGRAPHIE

AGUIRRE E. & RAUCENT B. (1998). L'apprentissage de la conception en génie mécanique : le rôle du projet. *Didaskalia*, n° 13, pp. 129-144.

PAHL G. & BEITZ W. (1988). *Engineering Design, a systematic approach*. London, Springer-Verlag.

FERRIÈRE L. (1998). *Conception d'une plateforme omnidirectionnelle*. Thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, Université catholique de Louvain.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à associer à cette publication, l'ensemble des titulaires des cours ayant participé au projet : Hervé Buyse, Christian Eugène, David Johnson, Jean-Didier Legat et Charles Trullemans.

Ils remercient les assistants et chercheurs qui ont assuré l'encadrement de ce projet : Jean-Pierre David, Laurent Ferrière, Tony Postiau et Thierry Vast, ainsi que le personnel technique qui en a rendu la mise en œuvre possible : René Bertrand, Michel De Ruyver, Francis Heylen, Christian Lebègue, André Lengelé, Paul Sente et Paul Thibaut

Enfin, ils souhaitent tout particulièrement remercier l'ensemble des étudiants qui se sont investis dans la réussite de cette expérience : Nathalie Aerens, Carole Depelchin, Guillaume André, Dominique De Meyere, Olivier Depuits, Olivier Englebert, Michaël Lannoo, Serge Ledoux, Laurent Sass, Luc Vercruyssen, Etienne Vermaut et Vincent Verschueren.

Cet article a été reçu le 21/10/98 et accepté le 15/12/98.

BOOK REVIEWS

TIBERGHIE A., JOSSEM L., BAROJAS J. (Éds) (1998). *Connecting research in physics education with teacher education.*

<http://www.physics/ohio-state.edu/~josssem/ICPE/BOOKS.html>.

Cet ouvrage¹ est le fruit d'une collaboration internationale (Allemagne : 2 auteurs, Australie : 2, Brésil : 3, Canada : 2, Espagne : 1, États Unis : 4, France : 2, Grande-Bretagne : 5, Grèce : 1, Pays-Bas : 1). Il vise explicitement à favoriser le transfert des résultats des travaux de recherche en éducation scientifique² vers les formateurs travaillant avec les enseignants de physique en exercice ou en formation initiale. Comme l'on ne peut actuellement présenter un corps de connaissances faisant consensus international, les auteurs présentent différentes approches de recherche qui peuvent ainsi s'enrichir mutuellement, donc se confronter. Les articles sont accompagnés de commentaires rédigés par d'autres auteurs.

La première partie est intitulée « Perspectives en physique ». L'ambition en est d'interroger le savoir scientifique pour pouvoir éclairer les choix transpositifs³ de l'enseignement.

Le premier article (A.P. French) n'éclaire pas beaucoup sur cette question. Intitulé « La nature de la physique », il se présente plutôt comme une fresque décrivant, en une quinzaine de pages, l'évolution de la physique depuis Aristote jusqu'au chaos déterministe. Il est regrettable que ce qui est annoncé dans

le titre n'ait pas été traité car éclairer les positions sur la nature de la physique est bien une question fondamentale dont heureusement d'autres auteurs parleront dans la suite.

Un second article (Martin H. Krieger) sur la « boîte à outils du physicien » est, lui, très riche de questions pour le formateur. L'auteur tente d'y dresser un tableau des outils théoriques et formels dont a besoin un physicien. Le premier intérêt est de mettre ainsi en évidence l'étendue des savoirs en jeu, source indéniable de difficultés spécifiques pour l'enseignement de la physique. Surtout que l'auteur dit bien qu'il ne suffit pas d'avoir une boîte à outils ; encore faut-il savoir s'en servir ! Or l'acquisition des compétences nécessaires demande beaucoup de temps et d'entraînement. Il rappelle aussi heureusement que la physique et les mathématiques ont des rapports consubstantiels et que le débat physique qualitative / physique par équations ne peut se résoudre aussi facilement.

Un troisième article (Roger H. Stuewer) traite d'« histoire et physique ». Si tout le monde s'accorde à dire que la connaissance d'éléments d'histoire des sciences serait utile pour les élèves et les professeurs, il est notoire que bien peu d'enseignements des sciences le mettent en pratique. Et quand cela est fait, on assiste bien souvent à une réécriture complète de cette histoire, une reconstruction logique *a posteriori* se substituant à l'histoire telle que les historiens la connaissent. Dans cet article stimulant, l'auteur montre bien en quoi une histoire plus

1. Saluons l'heureuse initiative des éditeurs qui ont rendu l'ouvrage accessible sur Internet.

2. Le terme « didactique de la physique » que j'emploierai dans le texte ne figure jamais dans l'ouvrage. Le mot « didactic » est largement péjoratif chez les auteurs anglo-saxons ; aussi est-il banni de cet ouvrage.

3. Notons que la référence au modèle de la transposition didactique n'apparaît que dans la préface (Andrée Tiberghien, E. Leonard Jossem et Jorge Barojas). Elle est totalement absente de tout le reste de l'ouvrage, comme bon nombre d'autres orientations théoriques.

conforme à ce que l'on en sait pourrait aider les élèves à mieux comprendre la nature des savoirs et démarches scientifiques. Si l'on rapproche cela de la troisième partie (« Attitude des professeurs à l'égard de la science »), on est aisément convaincu que ceci serait utile pour les enseignants eux-mêmes qui véhiculent majoritairement une vision de la science qui sera décrite et démontée dans des articles ultérieurs. Seul petit bémol de ma part : l'auteur, à mon sens, ne fait pas une séparation assez nette entre une physique de haut niveau en cours d'élaboration, une physique enseignée et l'histoire des sciences. Dans la perspective de construction programmée d'un enseignement, on peut être amené, par choix didactique, à présenter tel résultat ou telle expérience à un moment ou dans un contexte complètement différent de celui où il a vécu. Cela, qui relève des choix transpositifs, ne me paraît pas *a priori* condamnable. Ceci n'est pas contradictoire avec un éclairage permettant aux élèves de mieux situer historiquement et épistémologiquement le statut des savoirs étudiés.

La seconde partie, plus conséquente, est intitulée « Connaissances des élèves et apprentissage ». Un premier groupe d'articles traite des conceptions des élèves. Il s'agit là d'un domaine bien exploré par les recherches en didactique, qui ont produit des connaissances solides et consensuelles. C'est enfin une entrée assez facilement accessible au non spécialiste. Il est donc bienvenu que cet ouvrage y consacre une partie assez importante. Bien sûr, on pourra toujours regretter que le panorama des travaux ne soit pas plus complet, certains domaines de la physique ayant été ignorés (l'optique, les ondes, par exemple). Mais il est vrai que l'on ne peut pas tout faire.

Le premier article traite « des conceptions des élèves et de la résolution de problèmes en mécanique » (Lillian C. McDermott). C'est une revue rapide des travaux sur cinématique et dynamique, chez des étudiants de niveau universitaire. Elle débouche sur des propositions générales pour l'enseignement, promouvant les approches constructivistes. Si la revue semble assez complète, on peut quand même se demander ce qu'une personne ne connaissant pas le sujet peut

tirer de ce papier, tant les descriptifs sont rapides. Un formateur y trouvera plutôt une bonne bibliographie anglo-saxonne.

Les auteurs (Reinders Duit et Christoph von Rhöneck) du second article « Étudier et comprendre les concepts-clés de l'électricité » ont fait, à mon sens, un meilleur choix. Sans prétendre à un descriptif exhaustif, ils ont choisi quelques questions présentées de façon plus complète. Le non-initié doit pouvoir y trouver son compte. Les propositions pour l'enseignement tournent autour du conflit cognitif comme moteur du « changement conceptuel », tout en mettant en garde contre certaines visions un peu trop naïves : le changement ne va pas de soi, le conflit n'est pas forcément visible par tous les élèves, son apparente résolution ne produit pas forcément le changement et, de fait, il faut bien se résoudre à vivre avec la coexistence de conceptions et d'idées scientifiques. Le chemin du dépassement de ces contradictions est long !

Dans le troisième article, « Faits expérimentaux et modes de raisonnement en thermodynamique : approche commune des apprenants » (Laurence Viennot) le même choix de rendre les exemples compréhensibles est heureusement fait. Les conceptions sur chaleur et température y sont présentées. Les modes de raisonnement sont décrits : analyse quasi statique des systèmes, réduction du nombre de variables, raisonnement causal linéaire, etc. Tout cela se termine par des propositions rapides pour l'enseignement. Dans cet article, comme dans l'un de ses commentaires, l'auteur insiste sur les modes de raisonnement généraux, non spécifiques à tel ou tel domaine particulier de la physique. Cet apport permet de traiter des conceptions en donnant un peu d'ordre à leur lecture, autrement que comme une juxtaposition de domaines séparés.

L'article suivant, « Compréhension par les élèves des procédures de l'investigation scientifique » (Robin Millar) traite d'une autre question fondamentale. Si les curriculums scientifiques se donnent comme objectif de rendre les élèves capables de comprendre et d'utiliser les explications scientifiques reconnues du comportement du monde naturel, ils veulent aussi développer chez les

élèves la compréhension de ce qu'est l'approche scientifique. Ceci implique la compréhension des méthodes utilisées par les scientifiques pour construire leur description des phénomènes. L'auteur montre bien la difficulté d'une telle ambition : le terme « compréhension » doit déjà lui-même être questionné, car qu'est-ce que « vraiment comprendre » ? Ensuite, il n'est pas clair qu'il y ait réellement accord sur la nature de la démarche scientifique. L'auteur passe en revue diverses définitions trouvées dans la littérature : l'approche scientifique

- comme intégration de compétences méthodologiques (observer, classifier, émettre des hypothèses, faire des inférences, des prédictions, etc.),
- comme une stratégie logique (influence forte de la pensée piagétienne),
- comme résolution de problèmes,
- comme recueil de données empiriques (compréhension des mesures, des recueils de données, interprétation et usage des données, etc.)

Chacune de ces approches est discutée, les intérêts et les limites étant mis en évidence. Si certaines démarches naïves sont faciles à démonter, sur l'ensemble, il ressort bien qu'il s'agit d'une question d'enseignement d'une extrême difficulté. Les résultats obtenus semblent très dépendants des contextes dans lesquels se déroulent les recherches ; les résultats sont difficiles à évaluer. En insistant sur le fait que la solidité de la base des connaissances ne peut être négligée lorsque l'on s'interroge sur la question de la maîtrise des processus, l'auteur termine en proposant quelques objectifs « réalistes ».

Le dernier article de cette partie, « L'enseignement pour le changement conceptuel : une revue des stratégies » (P.H. Scott, H.M. Asoko et R.H. Driver), présente un très intéressant tour d'horizon sur cette question. Il s'agit là d'un pendant bien venu des trois premiers articles, montrant ce que l'on peut faire, en situation d'enseignement, de la connaissance des conceptions et modes de raisonnement des élèves. Diverses stratégies sont répertoriées et commentées. Après les avoir classées en deux grandes catégories (stratégies basées sur le conflit cognitif et sa résolution, stratégies basées sur

le développement des idées des élèves), l'auteur fait ressortir les questions théoriques qui émergent de ces divers travaux (prise en compte des idées des élèves, nature et rôle du conflit, construction des conceptions scientifiques, évaluation, etc.) Une courte référence à Vigotsky permet de remarquer que cet auteur, qui est en train d'apparaître massivement dans les travaux de didactique en France, est absent de cet ouvrage. Assiste-t-on à une différenciation des références théoriques dans la communauté ?

La troisième partie se centre sur le maître. Intitulée « Attitudes et pratiques des enseignants », elle traite des relations entre la vision du professeur à propos de la physique (ce qu'on pourrait appeler son épistémologie privée), sa vision de la façon dont il convient d'enseigner et dont les élèves apprennent, et ses pratiques réelles d'enseignement.

Le premier article (Richard F. Gunstone et Richard T. White) essaie d'analyser en quoi la façon de travailler de l'élève est dépendante de la pratique enseignante dans la classe. S'appuyant sur diverses études, les auteurs montrent que, tout au moins en Australie, existent des approches très différentes, plutôt « constructivistes » dans l'enseignement secondaire, plutôt « transmissives » dans l'enseignement supérieur. Il est difficile de connaître la vision de la physique du professeur car elle est le plus souvent implicite ; cependant les recherches tendraient à prouver que le modèle dominant serait :

- le savoir de la science n'est pas problématique,
- la science produit les réponses correctes,
- les vérités dans la science sont découvertes par l'observation et l'expérimentation,
- les choix entre interprétations correctes et incorrectes du monde sont basés sur des réponses de bon sens à des données objectives.

La connaissance de cette vision partagée de la science permet d'interpréter des pratiques fréquemment observées en classe. Pour faire changer ces pratiques, il faut donc faire changer à la fois les visions de la science et celles sur l'enseignement. Cela pose de sérieux problèmes de formation car il serait

pour le moins paradoxal d'induire ce changement à travers un enseignement de type « dogmatique » ! Il faut donc arriver à construire des situations telles que les élèves-professeurs comme les professeurs en exercice mettent en cause leurs propres représentations de la science et du métier. Pour cela, il faut que le sujet soit insatisfait de sa propre conception, que la nouvelle conception proposée soit intelligible, plausible et féconde, que le sujet ait le sentiment que la nouvelle façon proposée est faisable. J'ajouterai qu'il faudrait aussi le convaincre qu'une autre pratique provoque des effets bénéfiques quant à l'apprentissage des élèves. Un autre regret est qu'il me semble qu'il conviendrait ici de ne pas parler de façon uniforme de l'enseignement comme s'il était pareil de parler des sciences (et de former des enseignants) à l'école primaire, dans l'enseignement secondaire généraliste, dans le secondaire spécialisé, dans le supérieur, etc. De même, culture scientifique et apprentissages pointus ne relèvent pas forcément des mêmes traitements. À vouloir mettre « la barre trop haut », on peut trébucher sur des échecs avec des enseignants polyvalents ou pluridisciplinaires : il peut paraître utopique d'exiger d'eux une claire vision des épistémologies des divers savoirs qu'ils ont à manipuler.

Dans l'article « Attitudes des professeurs de physique : comment affectent-elles la réalité de la classe et modèles pour changer ? », les auteurs (Susana de Sousa Barros et Marcos F. Elia) rompent heureusement avec une vision un peu trop naïve consistant à répéter que, pour être bon professeur, il faut être constructiviste et bien penser que la science ne donne pas des vérités indiscutables. Ils montrent que de nombreux facteurs sont en jeu, dont des facteurs psychologiques, sociaux et politiques. Une liste des attitudes répertoriées est dressée ainsi qu'une liste des compétences, nécessaires mais non suffisantes, pour l'enseignement. Même si cette liste (non exhaustive selon les auteurs) peut donner un peu le vertige devant l'immensité de la tâche à accomplir, elle permet de clarifier ce que l'on peut espérer

d'un professeur confirmé. Des actions sont ensuite proposées pour modifier les attitudes des enseignants à partir de quelques-uns des profils types définis dans la classification.

Un autre texte, « À propos de la posture épistémologique des enseignants de sciences » (Jacques Désautels et Marie Laroche) montre les effets pervers que peuvent avoir certaines positions épistémologiques dans l'enseignement : savoir non présenté comme socialement construit et négocié, savoir « chosifié », souvent montré et raconté dans l'enseignement, plutôt que construit. Les étudiants, les enseignants ainsi formés reproduiront cette vision des sciences et, ainsi, se ferme un « cercle vicieux » dont on ne peut plus sortir. Il s'agit de développer un « enseignement réflexif et critique » pour rompre ce cercle. Si les auteurs reprennent à leur compte l'objectif ambitieux de J. Gilbert⁴, ils sont conscients de ses difficultés et de la nécessité de garder quelque modestie en la matière. Ce qui est sûr, c'est que le développement d'une posture épistémologique différente ne s'accommodera pas d'un enseignement selon des méthodes transmissives classiques ; l'enseignement lui-même doit mettre en œuvre cette épistémologie adéquate si on veut que les élèves-professeurs se l'approprient. Les propositions pour y arriver ne sont pas très clairement définies.

L'article suivant, « Formation des professeurs de physique : analyse et propositions » (Daniel Gil-Perez et Anna-Maria Pessoa de Carvalho), va dans le même sens. Il dresse un tableau de compétences nécessaires pour permettre un changement, regroupées sous quatre rubriques développées : connaître la matière à enseigner, connaître les idées spontanées sur la physique et l'enseignement de la plupart des professeurs, disposer d'un savoir théorique sur les processus d'enseignement-apprentissage, s'investir dans la recherche et l'innovation. Encore une fois le diagnostic est pertinent même si les exigences peuvent paraître difficiles à remplir. Les réponses sont plutôt du domaine des pistes de réflexion proposées que des aides à l'usage du formateur d'enseignants.

4. Gilbert prône « une forme d'enseignement qui est capable de prendre en compte les contextes politiques et sociaux dans lesquels la scolarisation prend place, aussi bien que ses aspects techniques et pratiques ; un enseignement qui évalue les pratiques de classe sur la base de leur capacité à contribuer au développement d'une plus grande équité et justice sociale ».

C'est bien la conclusion générale que l'on pourrait tirer de cette partie en disant, en reprenant la formule de Richard White dans ses commentaires sur cette partie : le challenge, pour les formateurs d'enseignants, est de construire des programmes avec ces caractéristiques !

La dernière partie traite du « développement des curriculums, de l'évaluation et des situations d'enseignement ». Elle vient bien englober les trois parties précédentes qui ont successivement étudié le savoir, l'élève et le professeur. Nous entrons bien dans la classe.

Le premier texte, « Développement curriculaire dans l'enseignement de la physique » (P.L. Lijnse) présente une très instructive analyse de quelques grands curriculums, essentiellement américains et britanniques. On y voit difficultés rencontrées, succès, échecs. Les auteurs rappellent que dans les grands choix interviennent bien d'autres raisons que les références à la physique. Les orientations en termes d'objectifs et finalités de l'école sont centrales (citoyen ou spécialiste ?) Après avoir analysé les effets du changement de paradigme (du comportementalisme au constructivisme), l'auteur semble craindre une stagnation des recherches en didactique. Il prône, si la didactique veut être productrice d'effets, de lancer des recherches de développement, liant étroitement chercheurs, didacticiens, physiciens et professeurs en exercice, coopérant sur une base d'égalité. Ceci permettrait de traiter de façon plus complète des problèmes de la classe.

Le deuxième article (Paul J. Black) traite de l'évaluation. L'auteur y étudie les trois fonctions de l'évaluation (sommative et certificative, formative, évaluation sociale du système d'enseignement). Il montre bien l'extrême variété des modes d'évaluation que l'on peut rencontrer dans les différents pays (et même à l'intérieur d'un même pays). Il analyse aussi l'influence forte du type d'évaluation à l'œuvre sur les contenus et méthodes d'enseignement. On peut juste regretter que la fonction régulatrice au sein de la classe ne soit pas évoquée : comment le professeur peut être amené à modifier ses pratiques à travers les « négociations » menées avec les élèves par l'intermédiaire de l'évaluation, comment l'élève prend

conscience de ce que l'on attend réellement de lui à travers l'évaluation, bref l'évaluation comme élément permettant que se tisse et évolue le contrat didactique (il est vrai qu'aucun des auteurs de cet ouvrage ne se place dans ce cadre théorique).

Les deux derniers articles constituent des éléments de concrétisation des souhaits de P.L. Lijnse. Dans « Construction de séquences d'apprentissage concernant des modèles particuliers préquantitatifs », l'auteur (Martine Méheut) décrit comment, par l'ensemencement de quelques prémisses de modèle, il est possible de faire construire à des élèves de collège des modèles scientifiquement satisfaisants par un va et vient didactiquement construit entre des phases d'expérimentation, de réflexion, de débat, de productions écrites, etc. L'autre article, « Enseigner l'électricité de base » (Dimitris Psillos) présente les stratégies développées pour permettre aux élèves de construire un modèle scientifique là aussi à travers expérimentations, prédictions, confrontations, apports d'aide par le professeur, etc. Ces deux contributions entrent bien dans le vif du sujet, se donnant comme objectif la recherche et le développement d'objets d'enseignement tentant de répondre concrètement aux nombreuses questions soulevées dans le reste de l'ouvrage. Je crois qu'il s'agit là d'excellents objets de formation, et que ce genre de travaux correspond bien à l'objectif que se fixaient les auteurs du livre : voir ce que les résultats des recherches en didactique pouvaient apporter à la formation des maîtres.

Certes, on peut se demander si cet ouvrage est réellement accessible au formateur d'enseignants. Je pense que ce n'est pas le cas de tous les articles ; certains me sembleraient plus destinés au chercheur, débutant comme confirmé, qui aurait besoin d'une revue bien faite et complète. Une autre remarque s'impose à cette lecture. L'on a critiqué (souvent à juste titre) un penchant franco-français des chercheurs français en didactique. Force est de constater qu'il s'agit d'un travers partagé (voire plus aigu chez certains...) : si l'on trouve chez les auteurs non anglophones des références variées prises dans des revues éditées dans divers

coins du globe, cela n'est absolument pas le cas des auteurs anglophones. Comme il semble peu probable que ces derniers modifient leur domaine de lecture très rapidement, il faut recommander aux chercheurs de faire l'effort de tenter⁵ de publier dans des revues en langue anglaise s'ils veulent avoir un espoir que leurs travaux ne soient pas ignorés dans de vastes parties du monde.

En conclusion, je dirai qu'il s'agit là d'un livre important. Les quelques remarques qui ont pu être faites « au fil de la plume », les quelques regrets sur l'absence de références à tout un courant des recherches en didactique des sciences (il est vrai plutôt présent en France et en Europe continentale du sud...) et des mathématiques n'enlèvent rien à son intérêt. Ce livre peut susciter débat, et c'est normal, et c'est bien ainsi. Sa lecture est donc à recommander (des versions en espagnol et en français sont annoncées sur le site Internet).

J.-J. Dupin

MILLAR R., OSBORNE J. (1998). *Beyond 2000, science education for the future*. Rapport d'un ensemble de séminaires organisé par la fondation Nuffield.

Ce texte rend compte d'un ensemble de quatre séminaires organisés par la fondation Nuffield.

Considérant que l'importance des aspects scientifiques dans notre vie quotidienne nécessite que la population ait une compréhension suffisante de la science pour en suivre les développements et l'incidence sur la société, les auteurs analysent l'état actuel de l'enseignement des sciences au Royaume Uni pour formuler dix recommandations.

Les auteurs constatent que, dans les années 1980, un consensus s'est opéré au Royaume Uni pour que les sciences fassent partie du curriculum d'enseignement destiné aux élèves de 5 à 16 ans. Des évaluations internes, et l'enquête internationale TIMSS

5. Bien entendu, il faut pouvoir passer la barrière des comités de rédaction, donc savoir respecter certains canons.

ont montré les effets positifs de ce fait sur la formation scientifique des élèves. Le rapport souligne cependant que des difficultés subsistent : les changements relatifs à l'enseignement des sciences pour les 5-16 ans n'ont pas été suivis de changements analogues au niveau secondaire. Or les besoins sociaux ont évolué : il faudrait ne plus former seulement, dans le secondaire, des scientifiques spécialisés en vue de permettre un développement de la productivité industrielle, mais former un grand nombre de personnes ayant une compréhension large de la science, tant pour leur travail que pour participer, en tant que citoyens, aux choix de société. Alors que de nombreux événements ont entaché l'image de la science et des usages qui en sont faits, il convient de donner aux citoyens une formation qui leur permette de comprendre les méthodes employées par la science, leurs limites, d'évaluer les risques et de mesurer les conséquences éthiques et morales des choix qu'offre le développement scientifique. Or, actuellement, la formation scientifique développe peu le sens de l'étonnement et de la curiosité, les élèves mettent peu en relation la formation scolaire avec les informations scientifiques qu'ils rencontrent dans la vie quotidienne. La formation scientifique apparaît comme un ensemble de notions disjointes, sans perception de la nature de la science et de ses méthodes.

Ces constats conduisent les auteurs à poser deux questions : « Pourquoi est-il important de dispenser une formation scientifique ? » et « À qui est destinée l'éducation scientifique ? » Une formation scientifique de base, destinée à tous les élèves de 5 à 16 ans, doit permettre à chacun de lire des articles de journaux, de suivre des émissions de télévision portant sur des sujets scientifiques, et de se former une opinion sur les questions sociales et éthiques concernant l'usage de la science. L'enseignement destiné à tous doit se distinguer plus clairement de celui destiné à former de futurs spécialistes. Cette formation doit permettre de percevoir comment est conduite la recherche scientifique, et suivant quels principes une connaissance est considérée comme

scientifique, pour en percevoir l'étendue et les limites. Ceci, soulignent les auteurs, dépasse la conception trop restreinte, mais communément admise, d'un enseignement scientifique visant à acquérir des connaissances utiles pour l'action. Les auteurs montrent comment cet enseignement pourrait s'appuyer sur une pratique pédagogique de « l'histoire explicative », utilisant la forme narrative pour présenter un ensemble de notions en inter-relations, qui, prises dans leur ensemble, permettront de donner un cadre à la compréhension d'un ensemble de situations. Des exemples « d'histoires explicatives » sont développés dans le rapport : modèle particulière de la matière, modèle héliocentrique, etc. Dans cette partie, les auteurs ne mentionnent pas explicitement l'utilisation dans l'enseignement de travaux pratiques ou d'expériences conduites par le maître ou les élèves. Les auteurs décrivent ensuite plusieurs des éléments indispensables à une telle formation : place de l'approche historique, réflexion sur les incertitudes de mesures, sur la notion de modèle, etc. L'évaluation des élèves devrait porter davantage sur l'aptitude des élèves à lire et comprendre des textes scientifiques, à analyser la validité d'un raisonnement, à faire preuve d'esprit critique, à faire preuve d'une compréhension globale.

On aura reconnu, au cours de ce résumé, de nombreuses questions qui se posent en France à propos des évolutions concernant l'enseignement des sciences, à l'école primaire (impulsion donnée par l'opération « La main à la pâte », à mettre en relation avec les pratiques antérieures de l'enseignement des sciences), au collège et au lycée (réforme des programmes, place de l'enseignement expérimental, conception d'une culture scientifique pour les élèves des sections littéraires, évaluation au baccalauréat).

Rédigé dans le contexte du Royaume Uni, ce rapport est d'une grande actualité dans la phase actuelle de réforme en France.

J.-M. Bérard

CHARPAK G. (1998). *Enfants, chercheurs et citoyens*. Paris, Odile Jacob, 278 p.

Qui ignore encore l'attachement de Georges Charpak à Léon Lederman, d'abord professionnel, aujourd'hui tourné vers les réalisations dans le cadre de l'enseignement ?

Cet ouvrage est constitué de quatre comptes rendus dont deux s'appuient sur une visite d'une équipe française auprès du physicien américain. Les réalisations du prix Nobel américain, à Chicago, fonctionnent comme un modèle pour le français, qu'il a souhaité faire observer : les écoles primaires du projet Hands On, et le lycée expérimental pour de brillants élèves. Ce sont donc des témoignages qui sont rapportés, que leurs auteurs veulent corréler au contexte français, comme l'indique G. Charpak dans son introduction.

Le premier témoignage est la traduction d'un document d'experts physiciens qui proposent leurs orientations pour l'amélioration de l'enseignement de la physique secondaire aux États-Unis. Après les efforts qui ont suivi les injonctions présidentielles dans les années soixante, les auteurs déplorent un enseignement scientifique secondaire actuel sans grand succès. Les propositions qui sont faites rappelleront les avancées de la Commission Lagarrigue ou les suggestions des GTD à ceux qui les ont connues ... et peu ou prou mises en œuvre dans les programmes français. On comprend, par conséquent, l'inquiétude des experts américains, mais on voit peu l'intérêt de cet article dans notre propre contexte.

Le second témoignage est celui d'une équipe de Vaulx en Velin, fortement impliquée dans l'opération locale de La Main à la pâte. C'est non seulement les écoles de Chicago qui ont été visitées, mais aussi l'Exploratorium de San Francisco. Dans les deux cas, l'activité des enfants est au cœur des suggestions des concepteurs, la place des parents importante, les actions de formation des enseignants essentielles. Les auteurs du compte rendu, parties prenantes de l'opération à plusieurs titres (inspecteur, directeur d'école, scientifique associé) semblent convaincus du bien-fondé des options qu'ils ont observées et dont s'inspire l'expérimentation lyonnaise. On adhère facilement à leurs convictions, tout en les replaçant dans le contexte d'une expérience exemplaire. Comme le précise le récent (juin 1999) rapport de l'Inspection

Générale (J-P. Sarmant, IG de sciences physiques, rédacteur) sur l'opération La Main à la pâte : « *tirer parti de ce succès et envisager la généralisation de l'opération à tout le territoire pose une question redoutable. Il faut en effet prendre en compte deux logiques qui s'opposent : la logique de l'institution (...) et la logique de l'opération (...)* ». Là est effectivement tout le problème d'un témoignage dont d'ailleurs les auteurs sont conscients des limites : un exemple ne peut être un modèle à répliquer à grande échelle, malgré toutes ses qualités.

Le troisième témoignage est celui d'une équipe issue du Lycée Saint Louis, de Paris, dont G. Charpak fut élève. Il relate une visite dans le lycée expérimental conçu par L. Lederman (l'IMSA) pour une minorité brillante d'élèves de l'Illinois, toutes catégories sociales confondues. Le ton admiratif de ce témoignage contraste étonnamment avec le premier compte rendu dans lequel l'enseignement scientifique américain était présenté comme inadapté. Dans celui-ci, la réussite des élèves semble assurée par le choix des activités qui leur sont proposées dont, en particulier, des activités de «mentorat» où les élèves ont à mener à terme, dans le cadre d'un « contrat pédagogique », un projet personnel avec l'aide d'un mentor externe au lycée. La corrélation avec les TIPE (les Travaux d'Initiative Personnelle Encadrés) des classes préparatoires aux grandes écoles françaises conduit à autant d'enthousiasme de la part des auteurs. Là encore, la qualité d'un témoignage ne peut être une justification généralisante. Heureusement, en fin de compte rendu, la partie rédigée par un ancien élève, qui a eu contact avec les étudiants américains, relativise largement cet enthousiasme, en particulier en termes d'effectifs : moins du quart des étudiants suit ce cursus et très peu semblent satisfaits des formes d'enseignement, ... mais relativisons nous-mêmes l'avis des acteurs !

Le quatrième témoignage rend compte de la visite d'un chercheur français (de l'INRP) dans une école japonaise. Ce compte rendu, beaucoup plus court que les autres, a toutefois un impact non négligeable : le mode de fonctionnement des écoles japonaises, en particulier vis-à-vis de l'enseignement

scientifique (qui apparaît efficace), suggère des évolutions pertinentes pour le contexte français, sans évidemment être transférables telles quelles. L'une d'elles reprend d'ailleurs une proposition du rapport de l'IG cité ci-dessus, de « *prévoir parmi les conseillers pédagogiques une spécialité sciences et technologie* » qui pourrait être une personne ressource au niveau d'un groupe d'écoles.

À la fin de son introduction, G. Charpak pose la question pertinente, et déjà maintes fois posée, « *Pouvons-nous tirer, des expériences en cours, des règles qui nous permettront, en cinq ou dix ans, d'entraîner la totalité de nos trois cent quarante mille instituteurs dans une réforme radicale ? Je le crois.* »

Malgré l'admiration de quelques-uns des auteurs, la lecture de l'ouvrage ne permet pas d'être aussi optimiste que G. Charpak, pas plus que l'auteur du rapport de l'IG : « *L'auteur de ce rapport n'a pas la naïveté de croire que l'ensemble des mesures préconisées conduira dans toutes les écoles à la mise en place rapide d'un enseignement des sciences de qualité irréprochable.* »

J. Toussaint

COHEN C. (1999). *L'homme des Origines ; Savoirs et Fictions en Préhistoire*. Paris, Le Seuil, 320 p.

Une histoire des savoirs savants sur l'anthropologie et de leurs représentations populaires.

On ne dit pas assez que les théories et les concepts scientifiques des sciences sociales et humaines, réputées portant « molles », posent, à tous ceux qui veulent les enseigner ou les vulgariser, des questions d'une rare complexité. Certes, un communicateur gagne toujours à être parfaitement informé de la spécialité scientifique qu'il a charge de diffuser ou d'enseigner pour prélever dans la culture savante ce qui se prêtera le mieux à la construction d'une présentation cohérente et valide du point de vue de son actualité scientifique. Cependant, ce travail de sélection et de transposition soulève, non seulement des questions pratiques et terre à terre (Où et comment se procurer les textes et les publications récentes absents des

bibliothèques et autres centres de documentation pédagogiques ?), mais aussi des questions d'ordre épistémologique (Comment résumer une théorie ? Que faut-il supprimer dans l'explication pour gagner du temps ? Comment parvenir à intéresser le public visé ? Peut-on faire l'économie de l'apprentissage de certains pré-requis et, dans ce cas, le détour préalable ne sera-t-il pas trop important, et ainsi de suite).

À ces difficultés, qui on le sait sont le lot de toutes les théories scientifiques, quel que soit leur domaine disciplinaire d'appartenance, les sciences humaines ajoutent un autre obstacle, à vrai dire au moins aussi redoutable : comment faire accepter une théorie ou une explication qui, de plein fouet, va heurter la pensée populaire et commune ? Qu'il s'agisse d'évoquer les origines de l'homme, son mode de vie ou ses croyances, les productions symboliques des « hommes des cavernes » et ainsi de suite, à chaque fois c'est un trop plein d'explications, d'images et de contre-certitudes qui sont présents chez les jeunes, les adultes, comme les enseignants eux-mêmes et les vulgarisateurs.

D'une certaine façon, exposer la préhistoire et l'anthropologie conduit à faire preuve d'un véritable recul critique vis-à-vis de ces sciences, de façon à discerner ce qu'il y a de spécifique dans les savoirs savants. Sont-ils récents ou déjà anciens ? Dans quelles conditions expérimentales ont-ils été découverts ? Comment s'articulent-ils avec d'autres théories ?

Enfin, et ce n'est pas la moindre difficulté, le concepteur d'une présentation publique a, ici plus qu'ailleurs, le devoir d'estimer et soupeser la nature des décalages entre les savoirs savants qu'il propose (ou transpose) et les représentations des futurs utilisateurs : les théories scientifiques sont-elles totalement inconnues ou déjà un peu familières ? En quoi sont-elles susceptibles de choquer la pensée commune ? Si nul n'ignore plus qu'il est préférable de tenir compte des conceptions préalables des destinataires lors du travail d'écriture d'une conférence ou d'un manuel d'enseignement, encore faut-il savoir s'il est possible, et par quels procédés, de les ébranler...

Ceci est vrai de toutes les disciplines

scientifiques mais certaines d'entre elles, voire certaines thématiques plus spécifiques, parce qu'elles intéressent *a priori* le public, soulèvent davantage de difficultés que d'autres. On pense évidemment aux exposés scientifiques qui abordent des questions d'actualité (Les organismes génétiquement modifiés sont-ils dangereux ?), ou à celles, parce qu'elles abordent l'environnement quotidien de chacun (Où faut-il entreposer les déchets radioactifs ?) ou la santé (Le tabac est-il la cause de tous les cancers du poumon ?), qui impliquent davantage les visiteurs. D'autres thèmes, parce qu'ils correspondent à des domaines de recherche relativement jeunes, créent eux aussi des difficultés particulières. On songe, par exemple, à l'astronomie ou à l'archéologie, domaines dans lesquels les scientifiques amateurs peuvent côtoyer les chercheurs professionnels et où les modèles sont relativement peu formalisés.

Le livre que Claudine Cohen consacre exclusivement aux sciences de la préhistoire de l'homme s'inscrit exactement dans ce registre. C'est que l'homme fossile n'est pas une preuve scientifique comme une autre. Il représente un témoin à mi-chemin entre la trace lointaine imprimée dans les sédiments et la mémoire intime d'ossements résolument proches de notre corps. Tels des enfants qui, découvrant dans une exposition des momies égyptiennes d'êtres humains, se bouchent spontanément le nez pour se prévenir d'une insupportable odeur, nous ne pouvons rester indifférents devant les traces de nos pseudo-aïeux.

« Au delà même de leur intérêt scientifique, tous ces témoins de l'ancienneté de l'homme (...) gardent quelque chose d'émouvant, et de précieux, de fascinant et de sacré : leur conservation, leur contemplation et leur étude sont aujourd'hui comme les rites d'un culte laïcisé que nous rendons aux reliques de nos ancêtres » (p. 49).

Mais en réalité, toute la difficulté tient dans ce paradoxe : est-il possible de conduire une recherche sur l'homme préhistorique sans l'interpréter à l'aune des valeurs de la société contemporaine dans laquelle le chercheur est évidemment immergé au moment où il esquisse des hypothèses et formule ses conclusions ?

Il faut admettre que les recherches sur les origines des premiers hommes et sur la vie de nos très lointains ancêtres se prêtent plus que d'autres à des interférences entre les observations objectives du chercheur et son propre système de valeurs ou de croyances. La rareté des traces et la volonté de reconstituer malgré tout des pans entiers d'une histoire interminable conduisent à imaginer, donc à créer, des scènes, des tableaux, des descriptions ou des évocations, aussi fondées, solides et plausibles qu'on le peut... mais qui ne sont que des fictions. Et les reconstitutions, comme les interprétations, sont toujours déformées par le prisme que constitue pour le chercheur sa propre image d'homme et celle de société dans laquelle il vit.

Plusieurs des chapitres de l'ouvrage abordent ce qui nous apparaît aujourd'hui comme des sortes de rêves éveillés de chercheurs ou des fantasmagories de théoriciens construites à partir d'un matériel incomplet, lacunaire, approximatif et trop hâtivement interprété. Mis bout à bout, ces chapitres offrent un catalogue tout à fait fascinant, non seulement des fantasmes qui ont traversé les recherches sur la préhistoire au cours de ces deux derniers siècles, mais aussi de leur devenir dans l'histoire scientifique, intellectuelle et même littéraire.

Parmi les idées scientifiques erronées les plus tenaces que Claudine Cohen passe soigneusement en revue, deux survolent tout l'ouvrage : la première est celle de l'opposition entre ce qui ferait la spécificité de l'humain et l'animalité des grands singes primates qui lui ressemblent (et dont le genre humain se serait détaché) ; la seconde, elle aussi ancienne puisqu'elle prend naissance dès l'opposition entre l'homme de Néandertal (prognathe et plus primitif) et l'Homo sapiens (plus intelligent et habile) est le sempiternel débat sur les différences entre les races humaines.

Or, dans ces sciences, on assiste depuis quelques dizaines d'années à une double révolution : d'une part, des méthodes de recherche, avec la naissance d'une instrumentation raffinée permettant de s'intéresser plus aux traces invisibles qu'aux anciens et spectaculaires trophées, extraits de fouilles (qui bouleversaient et détruisaient

le milieu investigué), et d'autre part, à une remise en cause des idées et des théories anciennes sur l'apparition des hommes sur la terre (avec un saut qui a fait passer cette histoire de quelques dizaines de milliers à plusieurs millions d'années).

De nouvelles preuves, comme la possibilité de comparer l'ADN, ont sérieusement remis en cause une série de dogmes qu'on croyait définitivement établis et ont brouillé considérablement les oppositions entre espèces comme le prétendu « fossé » séparant l'homme de l'animal ou la théorie dite du « chaînon manquant ».

Ces sciences offrent aussi un exemple remarquable (et qui devrait à notre sens être longuement médité par les chercheurs des sciences dures) sur l'ambiguïté des rapports entre une communauté scientifique de spécialistes et les autres catégories de chercheurs et d'intellectuels. En effet, les théories de l'histoire des premiers hommes, parce qu'elles ont fasciné, et ce dès leur apparition, tous les intellectuels et beaucoup d'artistes (qui cependant les connurent par leur vulgarisation plus qu'en lisant et rencontrant les savants) ont connu de multiples banalisations, généralisations hâtives ou interprétations hasardeuses.

Aux yeux du public, les hypothèses scientifiques rapidement vulgarisées se sont très vite confondues ainsi avec les reconstitutions imagées et naïves des figures de premiers hommes, leur contextualisation dans un décor et une mise en scène évoquant leurs activités quotidiennes de chasse ou de cueillette, de quête du feu ou de guerre, au sein d'une nature hostile, ou au contact d'animaux géants, depuis disparus. Ces images prototypiques ont profondément influencé, non seulement la nature des représentations communes, mais aussi l'imaginaire de la création artistique et littéraire (donnant même naissance à un genre – le roman de préhistoire – ou à des bandes dessinées qui connaissent aujourd'hui encore un grand succès).

Ainsi, les obsessions qui traversent l'œuvre romanesque de Victor Hugo reflètent, démontre Claudine Cohen, à la fois son image narcissique de poète et d'intellectuel au front immense et celles des recherches en

craniologie et des théories sur les relations que le poids et les formes des crânes entretiennent avec les races primitives d'hommes (par opposition aux races évoluées).

C'est la critique de l'histoire de ces idées et leur évolution en deux siècles que les différents chapitres du livre abordent. Par exemple, à propos de la distinction homme/animal, Claudine Cohen rapporte la lumineuse réflexion de Freud qui, pour rendre compte de la difficulté à accepter la théorie évolutionniste (qui fait descendre l'homme du singe), explique que la théorie darwinienne superpose, à la « *blessure narcissique infligée par la science à l'orgueil humain, la vexation biologique* ».

Le chapitre le plus original est probablement celui que Claudine Cohen consacre au sexe et à l'érotisme dans la préhistoire. Elle évoque les clichés de la bestialité et de la sauvagerie de l'homme de Cro-Magnon armé d'un gourdin et traînant par les cheveux sa proie dans une sombre caverne. Elle cite la théorie Freudienne qui rend compte de la genèse de l'hystérie féminine à cause de l'abstinence due à la longue période de glaciation et que la femme vécut de façon différente des hommes, eux plus insoucians. Elle analyse longuement les interprétations sexuelles de l'art préhistorique : les vénus *impudiques* ou *horribles*, les multiples représentations de sexes masculins ou féminins... Ces figures, montre-t-elle, ont été interprétées tour à tour comme obscènes ou réalistes, rituelles ou mythiques, symboliques ou reflétant un système complexe. Autant dire que le tableau dressé des interprétations de la sexualité apparaît, avec le recul de l'histoire des sciences, plutôt cinglant...

Précis et savant, d'une actualité étonnante, souvent drôle, remarquablement documenté tout en étant écrit de façon savoureuse, cet ouvrage intéressera tous ceux qui se préoccupent de préhistoire et de paléanthropologie. Au-delà, il réjouira tous ceux qui pensent que l'on ne consacre pas assez de recherches à l'histoire des sciences. Enfin, il rappelle à ceux qui enseignent, construisent des musées ou conçoivent des expositions, que ce travail, tout comme les livres de vulgarisation ou les œuvres romanesques, reflètent impitoyablement un

état (provisoire) d'une science trop vite dogmatisée.

D. Jacobi

PAQUELIN D. (1999). *Conception d'un environnement d'apprentissage interactif en fonction des attentes des usagers*. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse. UFR Sciences & Langues Appliqués, Département de Communication, Sciences de l'information et de la Communication.

Voici une thèse originale et étonnante. Elle porte sur la conception d'hypermédias éducatifs, sur l'apprentissage par l'action à l'occasion de l'utilisation de dispositifs médiatisés et sur la notion fondamentale d'interactivité. Dans cette perspective, l'auteur étudie le processus de conception d'une application interactive dans le domaine de l'enseignement de l'agronomie et plus particulièrement d'une interface qui soit un espace de médiation entre l'apprenant et les concepts objets de l'apprentissage – les techniques culturelles –, ainsi que la pertinence de l'interface elle-même. La thèse se compose de quatre parties :

– 1) un cadre de référence relatif à l'acte d'apprendre ; il s'agit de formuler, à partir des acquis de la psychologie cognitive appliqués à la démarche de résolution de problèmes dans un hypermédia, les éléments susceptibles de guider la conception d'applications multimédia centrées sur l'utilisateur ;

– 2) une grille d'analyse des applications multimédia interactives : l'auteur propose de circonscrire le champ conceptuel à partir duquel analyser, et en conséquence concevoir, une application interactive multimédia. Cette analyse repose sur la structuration des éléments constitutifs de l'application, organisés et structurés autour des modalités fondamentales de l'interactivité, intentionnelle et fonctionnelle, incidente et non incidente ;

– 3) des éléments de méthode pour la conception d'un environnement d'apprentissage interactif. Cinq axes strictement définis et articulés guident la conception : le

contenu scientifique, la tâche, le sujet, le pédagogique et la médiatisation réalisée par l'interface ;

– 4) l'évaluation formative d'un environnement d'apprentissage interactif *Largile et Lamotte*, application développée à l'occasion de cette recherche.

Le travail de D. Paquelin qui, ne l'oublions pas, est zootechnicien de formation, rompt avec les répartitions et par conséquent avec les clivages tant disciplinaires que méthodologiques trop souvent observés à propos des dispositifs de communication et de formation médiatisées. Par rapport à ses contextes institutionnel et disciplinaire, cette thèse présente de fortes composantes psychologique et pédagogique ainsi qu'une double approche, qualitative mais aussi quantitative. Autant d'aspects généralement peu développés à l'occasion de recherches menées dans un département de Communication qui favorise en général une approche herméneutique et interprétative. Étroitement liée au processus de développement d'une application réelle, auquel elle renvoie sans cesse, cette thèse s'apparente, d'une certaine façon, aux recherches actions qui sont plus fréquentes dans le champ des sciences de l'éducation. Dans la perspective de celles-ci, l'auteur tente d'articuler l'analyse du domaine et des concepts – les techniques culturelles –, les tâches mobilisatrices proposées et enfin les représentations de l'apprenant. Du point de vue des sciences de la communication, il considère l'hypermédia comme un média et, en conséquence, le processus d'apprentissage comme un processus de communication médiatisée dont il faut tenter de mettre en liaison, dans une perspective systémique, les trois moments de tout processus de communication : la production, le message lui-même, enfin la réception. On comprend mieux, dès lors, la structure globale du travail et les relations entre les quatre parties qui pourraient paraître par moment insuffisamment intégrées.

Multidisciplinaire, novatrice, résultat du parcours peu conventionnel – picaresque ? – d'un zootechnicien, la thèse de D. Paquelin possède de nombreux mérites, mais elle présente, en même temps, les défauts –

prévisibles ? – de sa nature multidisciplinaire, de son ambition et de son originalité.

Du côté des qualités, le travail tente d'articuler les aspects cognitif et sémiotique dans une perspective tant ergonomique que pédagogique. Pour ce faire, l'auteur utilise des cadres théoriques de référence issus de champs disciplinaires différents (sémiotique, sciences de l'éducation, théorie de l'apprentissage, styles cognitifs, ergonomie cognitive et appliquée) et tente de les intégrer (avec cependant un succès inégal) dans un cadre cohérent. La pertinence de cette démarche a été maintes fois soulignée par la recherche mais elle a rarement été mise en œuvre de façon systématique. Au moment où, grâce au renouvellement technologique des outils sémiocognitifs – les technologies de l'intelligence –, resurgit avec insistance la nécessité d'une articulation entre les représentations sémiotiques (matérielles, externes) et cognitives (internes), au moment enfin où la sémiotique s'oriente vers une sémiotique cognitive, une telle tentative mérite d'être signalée, encouragée et développée.

Nous soulignerons, de notre point de vue, l'intérêt de la deuxième partie : la conception d'une grille d'analyse des applications multimédia ainsi que son application à un corpus important de Cd-Roms. D'une part, cette grille constitue un premier outil préalable à toute analyse. Conçue sur la base d'un cadre théorique d'inspiration communicationnelle – il est vrai parfois succinct – et sur l'analyse méticuleuse d'un corpus important, elle mériterait cependant d'être validée expérimentalement, ce qui pourrait constituer un prolongement intéressant. D'autre part, elle repose sur une analyse de la notion d'interactivité et plus particulièrement sur la distinction fondamentale entre plusieurs formes d'interactivité, fonctionnelle et intentionnelle, incidente et non incidente. Le premier de ces distinguo avait été proposé, on s'en souviendra, par S. Pouts-Lajus et E. Barchecheat et retravaillé à leur suite notamment par G. Jacquinet. Ignorée de la plupart des développeurs et des ergonomes, elle permet pourtant d'introduire les notions de communication et d'énonciation au centre de toute démarche portant sur les hypermédiats. Ces deux formes d'interactivité

étaient restées cependant à l'état de simple proposition théorique : aussi leur modélisation dans le cadre d'une classification opérationnelle constitue-t-elle un développement particulièrement intéressant. L'auteur pose encore quelques hypothèses intéressantes quant aux relations entre ces deux types d'interactivité : il suppose par exemple que l'interactivité fonctionnelle incidente renforcerait l'interactivité intentionnelle. Voilà quelques pistes ouvertes qui mériteraient d'être approfondies.

La perspective choisie tente de concilier les sphères de la production et celle de la réception autour du produit lui-même ; on retrouvera ici la problématique de la logique des usages mais aussi celle de la co-construction du sens des messages médiatiques. Dans cette optique, la conception de l'interface comme un espace de médiation est porteuse de développements ultérieurs.

Enfin, plus localement, la thèse apporte encore des outils et des hypothèses qui mériteraient d'être développés et testés à l'occasion des travaux ultérieurs. Citons à titre d'exemple :

- la création de plusieurs indices (d'identification, de dénomination, etc.) qui s'avèrent des outils d'analyse des messages iconiques très pertinents et efficaces ;
- la formalisation de type syntaxique des liens entre les différentes unités d'information semble une piste prometteuse pour des analyses ultérieures ;
- l'analyse des différentes valorisations des solutions à des problèmes culturels selon différents établissements d'enseignement agricole constitue en soi un résultat extrêmement intéressant qui mériterait un développement et une publication ;
- l'analyse des variations de comportements entre les experts et les novices sur différents aspects d'utilisation du logiciel multimédia apporte de nombreux aspects intéressants.

Du côté des faiblesses, nous signalerons tout d'abord une maîtrise et une appropriation parfois inégales des cadres théoriques de référence et de leurs concepts : étonnamment, les aspects sémiotiques semblent parfois moins développés que ceux

liés aux théories de l'apprentissage et il arrive qu'ils fassent l'objet d'interprétations discutables. Il est sans doute difficile de maîtriser, dans une perspective multidisciplinaire, de façon égale tous les cadres de référence indispensables d'autant que dans le développement de l'application et dans la recherche qui l'accompagne, l'auteur joue tous les rôles : l'expert matière, le psychopédagogue, le méthodologue, le technologue de l'éducation, le concepteur multimédia et bien évidemment le chercheur.

Ensuite, la partie expérimentale – la quatrième – qui vise à mettre en évidence un effet « méthode de conception » sur la qualité de l'apprentissage paraît la plus contestable au vu du dispositif mis en place : la variable « méthode de conception » est en effet bien trop globale pour permettre une analyse fine de ses effets. On connaît le risque d'échec qu'encourt presque inévitablement ce type de tentative. Enfin, le traitement statistique des données recueillies sur des échantillons très réduits mériterait parfois plus de rigueur et certaines interprétations nous semblent discutables, d'autant qu'elles reposent sur des données ténues. Il s'agirait donc, tout au plus, d'indications ou de tendances.

La thèse ne convainc donc pas sur un des aspects qu'elle voulait primordial : mettre en évidence l'impact positif de la méthode de conception sur l'apprentissage lui-même. Mais, même dans le cadre de cette quatrième partie, l'auteur fait apparaître des observations intéressantes sur les stratégies d'apprentissage des différents groupes d'utilisateurs.

Paradoxalement, cette thèse, dont on peut discuter la pertinence de certains choix méthodologiques comme celle de certaines conclusions, apporte énormément à la marge de son hypothèse principale. Et c'est par tous ces aspects-là qu'elle nous semble intéressante, novatrice et propre à susciter un grand nombre de recherches complémentaires.

D. Peraya