

Enseignement d'un modèle particulaire cinétique de gaz au collège

*Questionnement et simulation**

Martine MÉHEUT

IUFM de l'Académie de Créteil
Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Paris 7-Denis Diderot
75251 Paris cedex 05, Case 7021, France.

Résumé

La séquence pédagogique présentée ici fait jouer des aspects spécifiques des modèles particuliers : leur caractère rationnel plutôt qu'empirique, leur caractère d'analogie mécanique. Elle repose sur l'utilisation d'une animation informatique dérivant de la théorie cinétique des gaz. Nous avons cherché à placer les élèves en situation d'attribuer une signification à différentes variables intervenant dans cette animation et de construire à partir de ces variables un modèle interprétatif des propriétés thermoélastiques des gaz. L'analyse des données recueillies au cours d'entretiens et de séances de classe permet d'évaluer cette séquence comme dispositif d'enseignement ; elle conduit également à discuter les hypothèses sous-jacentes aux choix de phénomènes et de questions effectués pour élaborer cette séquence.

Mots clés : *gaz, propriétés thermoélastiques, modèle cinétique, simulation, collège.*

* Ce travail a été réalisé dans le cadre de la RCP Modélisation, Recherche Concertée sur Programme LIREST- INRP.

Abstract

In designing this learning sequence, we took into account some distinctive features of particle models ; their rational more than empirical foundations and their character of mechanical analogy. Using a computer simulation, we tried to put students into a position to give meaning to the variables of this simulation and to develop particle models to explain and predict thermoelastic properties of gas. The didactical experimentation included interviews and classroom sequences in French secondary schools. The analysis of the data provides information about the effectiveness of this learning process ; it allows us to discuss the hypotheses underlying the choice of phenomena and questions we formulated in planing this sequence.

Key words : *gas, thermoelastic properties, kinetic model, computer simulation, secondary school.*

Resumen

La secuencia didáctica presentada aquí pone en juego dos aspectos específicos de los modelos particulares : su carácter racional más que empírico y su carácter de analogía mecánica. Ella reposa sobre la utilización de una animación informática derivada de la teoría cinética de los gases. Nosotros buscamos a poner al alumno en situación de atribuir una significación a diferentes variables intervinientes en esta animación y a hacer de esta animación un modelo interpretativo de las propiedades termoelásticas de los gases. Los datos recogidos en el transcurso de las entrevistas y de sesiones de clase suministran una evaluación de esta secuencia como dispositivo de enseñanza ; ellas permiten por otra parte de discutir las hipótesis sub-jacentes a la selección de fenómenos y de preguntas efectuada para la elaboración de esta secuencia.

Palabras claves : *gas, propiedades termoelásticas, modelo cinético, simulación, colegio.*

L'épistémologie des modèles souligne deux caractéristiques importantes de ces constructions intellectuelles : leur caractère théorique et leur caractère fonctionnel (voir par exemple Walliser, 1977 ; Delattre & Thellier, 1979). Ces deux aspects ne sont bien sûr pas indépendants ; ainsi par exemple, un modèle statique de sphères indéformables permet d'expliquer ou de prévoir certaines propriétés géométriques de la matière à l'état cristallin, un modèle cinétique de points matériels est fonctionnel dans le champ des propriétés thermoélastiques des gaz, etc.

L'enseignement des modèles de structure de la matière dans les collèges français tenait peu compte de cette dimension d'outils théoriques, pertinents par rapport à un ensemble limité de questions sur le monde

matériel, en tout cas jusqu'au récent renouvellement des programmes en septembre 1993. Que ce soit dans les désormais anciens programmes ou les manuels destinés à l'enseignement dans les collèges, molécules et atomes sont présentés comme des objets dont l'«existence», la «réalité», ne sauraient être mises en question. Au-delà d'arguments d'autorité, les informations susceptibles de conférer à ces entités une certaine réalité sont la possibilité d'en obtenir des images, et les ordres de grandeur de leurs dimensions ; les domaines de pertinence des modèles susceptibles d'être construits à partir de ces entités n'apparaissent pas. On peut lire par exemple que «*Toutes les méthodes permettant d'étudier la structure des métaux conduisent à une même constatation : dans un métal, les atomes sont au contact les uns des autres, et disposés de manière ordonnée.*» (Chirouze et al., 1979, p. 60) ou encore «*Un examen approfondi montre qu'un métal est un empilement d'atomes identiques, parfaitement rangés les uns par rapport aux autres.*», et «*Ils se touchent dans la réalité.*» (Michaud & Le Moal, 1988, p. 113). Par rapport à quels phénomènes, quelles propriétés des métaux ces modèles sont-ils fonctionnels ? Que permettent-ils de prévoir, d'expliquer ? Ceci n'est guère évoqué.

Le caractère théorique de ces modèles semble également sous-estimé. Ainsi est-il demandé dans un manuel de classe de cinquième une explication du mouvement brownien (Durandeu et al., 1987, p. 121). Dans un autre ouvrage, une explication de la vaporisation de l'eau est donnée de la manière suivante : «*L'agitation incessante et désordonnée des molécules devient prépondérante ; elles se dispersent dans toutes les directions. À cause de cette agitation, les distances entre les molécules deviennent considérables [...]*» (Chirouze et al., 1993, p. 70).

Prendre en considération ces deux caractères, théorique et fonctionnel, des modèles dans une démarche d'enseignement suppose tout d'abord d'assurer la cohérence entre les modèles objets de l'enseignement d'une part, les phénomènes et questions sur ces phénomènes d'autre part. Se pose également la question de l'adéquation de ces choix par rapport aux possibilités cognitives des élèves. C'est pourquoi nous avons pris en considération dans l'élaboration de cette séquence les résultats de recherches concernant :

- les conceptions des élèves à propos des propriétés thermoélastiques des gaz (Séré, 1985) ;
- les difficultés d'apprentissage dans le domaine de la structure de la matière (Dow et al., 1978 ; Novick & Nussbaum, 1978 ; Pfundt, 1981 ; Méheut, 1982 ; Brook et al., 1984 ; Rozier, 1988 ; Andersson, 1990...) ;
- les formes spécifiques du raisonnement linéaire causal en thermodynamique élémentaire (Rozier & Viennot, 1990 ; Viennot, 1993).

Il nous est apparu que certaines des difficultés d'apprentissage dans le domaine de la structure de la matière mises en évidence par les travaux de recherche didactique pourraient être éclairées par le développement historique des modèles particuliers (Boltzman, 1902 ; Perrin, 1903 ; Kubbinga, 1983 ; Bensaude & Kounelis, 1991 ; Pullman, 1995). En effet, l'atomisme s'est constitué moins à partir de données empiriques que d'une assertion philosophique : la permanence de la matière à travers ses transformations et son unité sous ses divers aspects. Les philosophes atomistes considéraient les sensations comme trompeuses. Reconnaisant le caractère « arbitraire » de certaines hypothèses, ils justifiaient cette élaboration théorique principalement comme un instrument d'unification et de prévision des phénomènes (Méheut, à paraître).

Dans l'élaboration de cette séquence, nous avons voulu mettre en jeu ces caractères qui apparaissent comme spécifiques des modèles particuliers de la matière : leurs origines rationnelles plutôt qu'empiriques, leur caractère d'instrument de pensée plutôt que de réalité observable et enfin leur caractère d'analogie mécanique, qui sert de support à diverses concrétisations.

L'épistémologie des modèles (Walliser, 1977 ; Delattre & Thellier, 1979) a constitué pour nous une référence utile non seulement pour le choix d'objectifs cognitifs (modèles visés et raisonnements nécessaires à la mise en œuvre de ces modèles) mais aussi pour l'élaboration de situations favorables à la construction de ces connaissances et raisonnements par les élèves. Dans ce cadre, nous avons envisagé des constructions de connaissances de différents ordres. Certaines concernent le modèle lui-même : établissement de relations entre variables du modèle, mise en œuvre de nouvelles variables. D'autres concernent les relations entre modèle et système modélisé. D'autres enfin concernent le comportement du système lui-même.

Dans une première étape, qui a fait l'objet de publications (Chomat et al., 1988 ; Larcher et al., 1990 ; Méheut & Chomat, 1990), nous avons fait travailler des élèves de quatrième (quatorze ans environ), puis de cinquième (treize ans environ) à l'interprétation de quelques aspects de transformations physiques de la matière dans le cadre d'un modèle encore très peu sophistiqué.

Dans la deuxième étape, qui est l'objet de cet article, le champ de référence est celui de propriétés thermoélastiques des gaz, le cadre théorique est celui de la théorie cinétique des gaz parfaits. Ce cadre théorique n'est bien sûr pas immédiatement accessible aux élèves ; il leur est proposé par l'intermédiaire d'un logiciel de simulation.

1. CONCEPTION DE LA SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT : HYPOTHÈSES ET CHOIX

Nous avons fait le choix d'une approche «synthétique», phénomènes / questions / modèles, les modèles devant se préciser progressivement, en relation avec les questions. La séquentialisation inhérente au processus d'enseignement-apprentissage (Chevallard, 1985 ; Johsua, 1985) se manifeste donc par l'extension du champ de référence et par l'évolution des structures théoriques des modèles. Ainsi avons-nous choisi phénomènes et questionnements de telle sorte que les élèves soient en situation de construire des raisonnements de plus en plus élaborés, en faisant intervenir progressivement différentes variables du modèle (voir paragraphe 2.3). Notons que les raisonnements visés sont de type préquantitatif, seules les propriétés ordinales des variables étant mises en jeu dans des raisonnements de covariation.

Une hypothèse importante de ce travail (H) est que, pour être adopté par les élèves, un modèle doit leur être utile, autrement dit leur permettre d'expliquer, de prévoir les phénomènes de façon plus efficace. Cette hypothèse se rapproche des points de vue constructivistes développés par exemple par Posner et al. (1982) ou par von Glasersfeld (1994).

Nous avons recherché à cet effet des phénomènes dont la prévision ou l'explication posait problème aux élèves ou sur lesquels ils effectuaient des prévisions fausses. Des résultats de recherche (Séré, 1985), ainsi que des entretiens complémentaires (Chomat et al., 1992), montrent que des élèves de cet âge sont susceptibles de développer des raisonnements leur permettant de prévoir des phénomènes provoqués par des différences de pression lorsque la température n'intervient pas (ni différences, ni variations de température) ; ils raisonnent en termes de *tassement*, de tendance à revenir à un état *normal*, parfois en termes de différence ou d'égalité de *pression* – mais l'utilisation qu'ils font de ce terme laisse craindre une confusion entre densité et pression.

Nous avons fait l'hypothèse (H₁) que la prévision et l'explication de phénomènes faisant intervenir la température (différence ou variation de température) leur posent davantage problème.

Nous avons donc choisi de faire travailler les élèves, dans un premier temps, à l'interprétation de phénomènes sans faire intervenir la température ; les caractéristiques du modèle à mettre en jeu sont alors les dimensions des cadres, le nombre d'entités, et la *fréquence* des chocs de ces entités sur les bords des cadres. Dans un deuxième temps sont abordés des phénomènes mettant en jeu des différences de température ; *vitesse* des entités et *force* des chocs doivent également être pris en considération.

En ce qui concerne le choix du questionnement sur ces phénomènes (voir paragraphe 3), nous faisons l'hypothèse (H_2) que pour prévoir ou expliquer un déplacement, les élèves ne prendront en considération qu'un seul sous-système gazeux, celui dont les actions sur la paroi ont le sens du déplacement ; alors que le questionnement sur l'immobilisation favorisera une prise en considération et une comparaison des actions exercées par les deux sous-systèmes.

2. OUTILS DIDACTIQUES POUR LA RÉALISATION DE LA SÉQUENCE

2.1. Logiciel de simulation

Ce logiciel génère une image d'entités mobiles se déplaçant dans un cadre rectangulaire (figure 1). Les règles de déplacement des entités dérivent de la théorie cinétique des gaz moyennant les procédures associées à la discrétisation du traitement et au faible nombre de particules (Chomat et al., 1990, pp. 76-78). Les positions initiales de ces entités sont tirées au hasard en décomposant l'espace limité par le cadre en cases (4x4 pixels). Leurs vitesses initiales sont réparties de façon quasi boltzmanienne autour d'une vitesse moyenne que l'utilisateur peut choisir. La trajectoire des entités ne peut être figurée de façon continue ; elles occupent des positions successives très rapprochées «en ligne droite» jusqu'à rencontrer les contours du cadre ou une autre entité ; leur vitesse est alors modifiée suivant une procédure de type réflexion s'il s'agit du cadre, ou conformément aux principes de conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique s'il s'agit d'une autre entité.

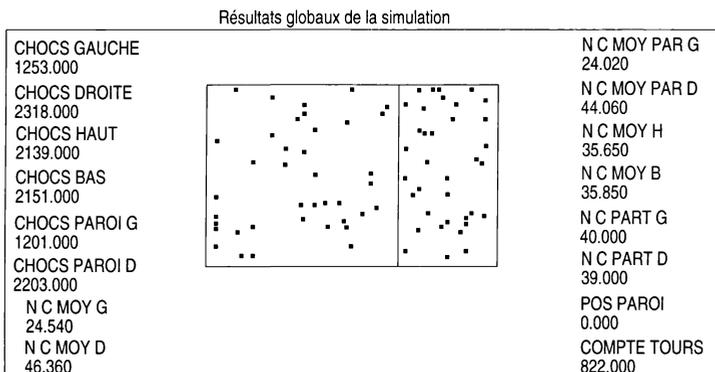


Figure 1 : «**Concrétisation**» du modèle ; copie d'écran

L'utilisateur peut choisir les dimensions du cadre ; il peut aussi le diviser en deux par un trait vertical dont il choisit la position. Ce trait peut, sur option, être mobile ; ses déplacements sont alors gérés de la manière suivante : on affecte à la paroi une masse et une vitesse, on calcule la somme des quantités de mouvement des particules qui heurtent la paroi de part et d'autre et on en déduit la variation de la vitesse de la paroi. Si pendant un tour de simulation, le déplacement de la paroi atteint la valeur définissant le côté d'une «case» (4 pixels), la paroi est déplacée.

L'utilisateur peut demander l'affichage des valeurs des paramètres de la simulation en cours et les valeurs des différentes variables :

- nombre de chocs sur une paroi, par unité de longueur de la paroi, pour une durée de simulation donnée ;
- lorsque la paroi est mobile, position de la paroi à un instant donné, position moyenne de la paroi pour une durée de simulation donnée.

2.2. Dispositif et manipulations

Nous avons choisi un dispositif «simple» (figure 2), de façon à rendre aussi aisée que possible la mise en correspondance entre les éléments de l'image animée (cadres, trait séparateur, entités mobiles), et les éléments du dispositif matériel. Ce dispositif comprend deux seringues (pleines d'air) reliées par un tuyau souple dans lequel peut se déplacer une goutte d'eau colorée. Une pince ou un robinet permet de «fermer» ce tuyau ; les pistons des seringues peuvent être bloqués.

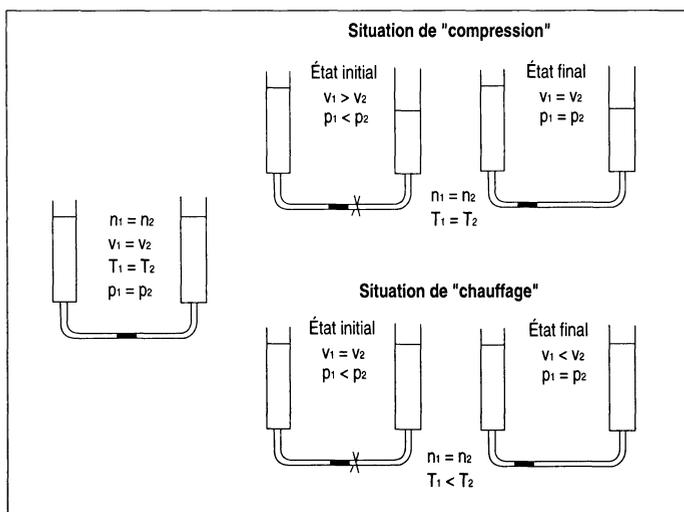


Figure 2 : Dispositif et situations expérimentales

Les manipulations consistent à établir une différence de pression entre les deux sous-systèmes gazeux (la pince étant serrée) et à laisser évoluer le système après avoir enlevé la pince. La différence de pression est établie, soit en déplaçant l'un des pistons (situation de *compression*), soit par un apport de chaleur (situation de *chauffage*).

2.3. Relations entre phénomènes et simulation

Au volume d'un système gazeux correspond la surface d'un cadre ; à une quantité de gaz un nombre d'entités, la température étant traduite par la vitesse quadratique moyenne des entités. Les forces de pression résultent des chocs des entités sur la paroi. La procédure de rebondissement des particules sur les bords des cases correspond à une paroi rigide et adiabatique (aucun échange d'énergie avec le milieu extérieur, que ce soit sous forme de travail des forces de pression ou sous forme de chaleur). Les déplacements de la paroi mobile traduisent par contre des échanges d'énergie entre les deux échantillons gazeux sous forme de travail.

Les échanges énergétiques apparaissent donc comme fortement simplifiés par rapport au dispositif réel. Ceci constitue une limite de cette simulation ; notons que cette limitation n'apparaît pas dans l'usage qui est fait ici de la simulation.

Dans le cadre de cette séquence, nous souhaitons placer les élèves en situation de construire les significations suivantes :

- | | |
|--------------------------|---|
| (1) quantité de gaz | <i>nombre de particules</i> |
| (2) volume des enceintes | <i>surface des cases</i> |
| (3) température | <i>vitesse (quadratique moyenne)
des particules</i> |
| (4) actions de pression | <i>chocs : fréquence et «force»</i> |

et de développer des relations préquantitatives entre ces variables, par exemple :

– **dans le cas de la compression**

- mise en mouvement

Les deux seringues contiennent des quantités de gaz égales à la même température.

Les deux cases contiennent des nombres égaux de particules animées de mouvements de même vitesse (quadratique moyenne).

Si le volume de la seringue de droite est inférieur au volume de la seringue de gauche, les actions de pression exercées sur la paroi par l'échantillon de droite sont supérieures à celles exercées par l'échantillon de gauche.

Si la surface de la case de droite est inférieure à la surface de la case de gauche, la fréquence des chocs sur la paroi des particules de droite est supérieure à celle des chocs des particules de gauche.

- immobilisation

(En supposant que les températures des deux échantillons restent égales)

La paroi reste immobile lorsque les actions de pression sont égales ; les volumes des échantillons sont alors égaux.

La paroi reste immobile lorsque les fréquences de chocs sont égales ; les surfaces des cases sont alors égales.

– **dans le cas du chauffage**

- mise en mouvement

Les deux seringues, de même volume, contiennent des quantités de gaz égales.

Les deux cases, de même surface, contiennent des nombres de particules égaux.

Si la température de l'échantillon de droite est supérieure à la température de l'échantillon de gauche, les actions exercées sur la paroi par l'échantillon de droite sont supérieures à celles exercées par l'échantillon de gauche.

Si la vitesse des particules de droite est supérieure à la vitesse des particules de gauche, la force des chocs des particules de droite est supérieure à la force des chocs des particules de gauche.

- immobilisation

(En supposant que la température de l'échantillon de droite reste supérieure à celle de l'échantillon de gauche)

La force des chocs des particules de droite restera supérieure ; pour que la paroi s'arrête, il faut donc que la fréquence soit plus faible, le volume de droite sera donc supérieur au volume de gauche.

3. EXPÉRIMENTATION DIDACTIQUE

Les apprentissages visés dans cette expérimentation s'intègrent dans une perspective à plus long terme d'enseignement des modèles de structure de la matière. Dans les expérimentations que nous avons réalisées, ils viennent après une première phase dont les objectifs étaient la mise en œuvre par les élèves de l'idée d'éléментарité pour interpréter la conservation de la matière dans quelques transformations physiques. Au cours de cette

première phase, nous avons cherché à faire établir par les élèves des relations entre :

- surface (dimensions) des cadres et volume des échantillons de gaz,
- nombre de particules et quantité de gaz.

Ce travail s'est appuyé sur l'utilisation de représentations iconiques statiques (petits dessins). Dans cette première phase, les aspects cinétiques ont été à peine abordés : la mobilité des particules a été évoquée pour interpréter le mélange par diffusion de deux gaz ; le mouvement n'a été ni figuré, ni caractérisé.

Dans la deuxième phase, qui est l'objet de cet article, nous cherchons à placer les élèves en situation de s'approprier certains aspects de la théorie cinétique des gaz, qui leur est présentée par l'intermédiaire du logiciel, pour se construire un modèle cinétique de gaz.

Les activités que nous leur proposons dans cette perspective consistent à élaborer, à l'aide du logiciel, des simulations de quelques phénomènes et à s'appuyer sur ces simulations pour développer des raisonnements permettant la prévision, ou l'explication, de quelques aspects de ces phénomènes : sens de déplacement et conditions d'équilibre.

L'expérimentation vise à fournir des informations sur l'accessibilité de tels objectifs (et à les préciser). Elle constitue par ailleurs un test des hypothèses relatives aux questionnements considérés comme favorables à de telles élaborations.

Cette expérimentation a comporté plusieurs étapes.

Une première étape s'est déroulée sous forme de cinq entretiens faisant intervenir chacun un intervieweur et deux élèves de classe de cinquième. Ces entretiens, réalisés sous forme de deux séances de trois quarts d'heure environ chacune, ont été enregistrés puis transcrits.

La deuxième étape a consisté en la mise en place d'une séquence d'enseignement dans seize classes de cinquième. Cette séquence s'est étendue sur six séances d'une heure et demie chacune, soit une durée totale de neuf heures. Les données ont été recueillies sous forme écrite. Nous disposons pour chaque élève d'un jeu de neuf fiches correspondant à différents moments du questionnement. Ont été analysées les productions de dix élèves par classe (soit 160 élèves), choisis au hasard.

Dans une troisième étape, deux années après la mise en place de cette séquence, nous avons recueilli, par des questionnaires écrits auprès d'élèves ayant ou non déjà participé à cette expérimentation, des informations complémentaires dans deux directions. Il s'agissait d'une part de confirmer et de préciser des résultats que nous avons obtenus par l'analyse des

données recueillies au cours de la séquence d'enseignement, d'autre part d'évaluer l'impact à long terme de cette séquence.

3.1. Entretiens

Comme indiqué aux paragraphes 1 et 2.2, les questions portent sur une situation de *compression*, puis de *chauffage*.

– Pour chaque situation, le questionnement comporte une première phase de prévision, puis d'observation et d'explication des phénomènes, sans appel au modèle ; les questions concernent le déplacement, son sens, et l'immobilisation de la paroi.

– *Que va-t-il se passer si on enlève la pince ? Pourquoi ?*

– *Que s'est-il passé ? Pourquoi ?*

– *Pourquoi la goutte s'est-elle arrêtée ?*

Ces questions ont pour but de favoriser une première lecture du phénomène en termes d'actions de deux sous-systèmes gazeux sur la paroi.

Du point de vue de la recherche, nous souhaitons déterminer dans quelle mesure les élèves sont, ou non, capables de prévoir, et d'expliquer, ces phénomènes, ce qui revient à mettre à l'épreuve l'hypothèse (H_1) qui a orienté le choix des phénomènes de référence. L'analyse des justifications des prévisions et des explications met à l'épreuve l'hypothèse (H_2).

– Dans une deuxième phase, une représentation iconique (petit dessin) du dispositif est demandée aux élèves.

– *Représente l'air dans les seringues et le tuyau avant qu'on enlève la pince et après l'arrêt de la goutte. Explique tes dessins.*

– *Pourquoi la goutte s'est-elle déplacée ? Pourquoi la goutte s'est-elle arrêtée ?*

Le but de ces questions est d'amener les élèves à prendre en considération les deux sous-systèmes gazeux, que la représentation et l'explication qu'ils proposent soient continues ou particulières.

– Le questionnement comporte une troisième phase : l'utilisation du logiciel pour modéliser le système et obtenir une simulation de son évolution.

Dans cette phase, il est d'abord demandé aux élèves de discuter la validité d'une simulation qui leur est proposée.

– *Que vois-tu ?*

– *Pourrait-on utiliser ce logiciel pour représenter ce qui s'est passé ?*

– *Est-ce que ça convient pour représenter l'air dans les seringues juste avant qu'on enlève la pince ? Que faut-il modifier ?*

L'enjeu de ce travail concerne les relations 1, 2, 3 (voir paragraphe 2.3) ; il s'agit de choisir de façon pertinente les valeurs des paramètres du modèle : surface des cadres, nombre d'entités dans chaque cadre, *vitesse* des entités dans chaque cadre.

Les questions visent ensuite à faire construire par les élèves une explication du déplacement et de l'arrêt de la paroi en se servant de la simulation. L'enjeu (relation 4) est ici l'interprétation des actions de pression par les *chocs* des entités sur les bords des cases.

- *D'après la simulation, la goutte va-t-elle bouger ? Pourquoi ?*
- *Pourquoi, d'après la simulation, la goutte ne bouge-t-elle plus ?*

Dans la situation de *compression*, il suffit, pour prévoir le sens de déplacement de la paroi, de comparer les *fréquences* de chocs de part et d'autre de la paroi, et, de fait, les densités de particules, les températures étant supposées égales. Si l'on néglige les variations de température dans chaque compartiment, il est facile de prévoir que la paroi s'immobilisera lorsque les volumes occupés par les deux échantillons seront les mêmes.

Dans la situation de *chauffage*, interviennent la différence des *vitesse*s et les effets de cette différence sur la *fréquence* et la *force* des chocs ; ceci permet de prévoir (ou d'expliquer) le sens de déplacement de la paroi. L'interprétation de l'immobilisation demande un raisonnement complexe. En supposant que la température de l'air initialement chauffé reste supérieure à celle de l'autre compartiment, la *force* des chocs reste différente de part et d'autre de la paroi. De plus, au cours de cette évolution, les volumes des compartiments, donc les densités de particules varient. Un raisonnement qualitatif ne suffit plus à déterminer les sens de variation des *fréquences* de chocs de part et d'autre de la paroi au cours de l'évolution du système. On peut cependant affirmer qu'à l'équilibre, la *fréquence* des chocs du côté initialement chauffé sera inférieure à la *fréquence* des chocs de l'autre côté.

3.2. Séquence d'enseignement

L'organisation de cette séquence reprend les différentes étapes du protocole d'entretien.

– Nous avons cependant jugé utile d'ajouter un type de question que nous avons mis en œuvre dans notre précédent travail, qui consiste à décrire les changements d'état en précisant les invariants et les variables. Ainsi, pour chaque phénomène étudié, avons-nous commencé par une question de ce type. L'état initial du système étant ainsi caractérisé, venaient les demandes de prévision sur son évolution.

1. *Qu'est-ce qui a changé ?*

- pour l'air de la seringue de droite :
- pour l'air de la seringue de gauche :

2. *Qu'est-ce qui n'a pas changé ?*

- pour l'air de la seringue de droite :
- pour l'air de la seringue de gauche :

3. *Que va-t-il se passer si on enlève la pince ?*

4. *Est-ce que la goutte va se déplacer ?*

- oui non je ne sais pas

Pourquoi ?

- Après observation, venaient des demandes d'explication.

1. *Pourquoi la goutte a-t-elle bougé ?*

2. *Comment expliquer qu'elle s'arrête ? (Où s'arrête-t-elle ? À quelles conditions ?)*

– Il était ensuite demandé aux élèves de discuter la pertinence d'une simulation qui leur était proposée. Compte tenu du faible nombre d'ordinateurs, des contraintes de temps et d'encadrement des élèves, il ne nous a pas été possible de laisser les élèves manipuler l'ordinateur. C'est l'enseignant qui a effectué ces manipulations, les élèves exprimant leurs choix soit par oral, soit par écrit.

1. *Est-ce que l'animation convient pour représenter la situation avant qu'on enlève la pince ?*

- oui non je ne sais pas

Si vous avez répondu oui, expliquez pourquoi cela convient.

Si vous avez répondu non, dites ce qu'il faudrait modifier, en expliquant pourquoi.

2. *Est-ce que l'animation convient pour représenter la situation juste après l'arrêt de la goutte ?*

- oui non je ne sais pas

Si vous avez répondu oui, expliquez pourquoi cela convient.

Si vous avez répondu non, dites ce qu'il faudrait modifier, en expliquant pourquoi.

Une simulation pertinente ayant été obtenue, il était demandé aux élèves de proposer, en s'appuyant sur cette simulation, une explication du déplacement, puis de l'arrêt de la paroi.

1. *D'après l'animation proposée, pourquoi le trait de séparation (qui représente la goutte) va-t-il bouger ?*

2. *Comment expliquer qu'il s'arrête ? Où s'arrête-t-il ? À quelles conditions ?*

Les possibilités d'affichage des nombres de chocs et de simulation

avec paroi mobile pouvaient être ensuite utilisées par les enseignants pour aider les élèves à développer les raisonnements visés.

– Cette démarche ayant été effectuée à propos des situations de *compression* et de *chauffage*, une autre situation (*détente* ou *refroidissement*) était proposée à titre de réinvestissement.

3.3. Questionnaires complémentaires

Nous voulions par ces questionnaires recueillir des données susceptibles de préciser et de confirmer les résultats que nous avons obtenus lors des entretiens et de la séquence d'enseignement dans la perspective de valider notre hypothèse H_1 (les propriétés thermoélastiques des gaz posent davantage problème aux élèves que les propriétés élastiques).

Nous avons à cet effet proposé une série de questions à des élèves de classe de cinquième (3 classes, 74 élèves) et de quatrième (3 classes, 82 élèves). Les élèves de cinquième n'avaient pas suivi d'enseignement de physique au collège du fait de la suppression des enseignements de physique et chimie en sixième (septembre 1991) et cinquième (septembre 1992). Par ailleurs, le programme de quatrième ne comporte pas d'étude des propriétés thermoélastiques des gaz.

Les questions étaient présentées sous forme de deux questionnaires, distribués chacun à la moitié des élèves d'une classe. Nous disposons donc d'environ 80 réponses pour chaque question.

Nous avons par ailleurs soumis un ensemble de questions à des élèves de troisième ayant suivi un enseignement relatif aux propriétés thermoélastiques des gaz (12 classes, 250 élèves). Une partie d'entre eux (107) avait participé à la séquence d'enseignement au cours de leur année de cinquième, soit deux ans auparavant. Il s'agissait ici pour nous d'évaluer l'impact à long terme de cette séquence. Les questions étaient présentées sous forme de quatre questionnaires ; chaque élève a répondu à un seul questionnaire.

4. RÉSULTATS

4.1. Analyse des entretiens

4.1.1. *Prévision sans utilisation du modèle*

L'analyse des données recueillies lors des entretiens (cf. paragraphe 3) confirment que les élèves disposent de raisonnements suffisants pour

prévoir le sens d'évolution des systèmes dans le cas de la compression. Ainsi, au cours des entretiens, tous les élèves prévoient-ils correctement le sens de déplacement de l'index.

Pour prévoir ce déplacement, ils raisonnent sur un seul système gazeux, celui qui a subi une compression. Aucun élève ne prend ici en considération le gaz enfermé dans l'autre seringue. Le raisonnement majoritaire (7/10) peut être schématisé de la manière suivante : *l'air possède un état normal, non comprimé ; le déplacement du piston écarte l'air de cet état ; l'air tend alors à y revenir.*

Jonathan : *L'air comprimé ici, il va partir d'un seul coup et pousser le liquide vers la gauche jusqu'à ce que tout l'air soit dépressurisé.*

Julia : *Tout l'air qui est comprimé ici va se... Il va se remettre normalement, l'air va se remettre bien dans le tuyau et ça va pousser le liquide.*

Les prévisions concernant la situation de chauffage sont moins assurées.

Parmi les neuf élèves présents lors de cette séance, quatre seulement prévoient correctement le sens de déplacement de l'index, deux prévoient que l'index ne se déplacera pas, deux disent ne pas savoir ce qui va se passer, le dernier ne s'exprime pas sur ce point.

4.1.2. Modélisation

Le passage à un modèle particulière a été effectué, lors des entretiens, par certains élèves à l'occasion de la représentation iconique, par les autres lors de la mise en œuvre du logiciel comme outil de simulation.

4.1.2.1. Compression

– Lors de la représentation iconique, les élèves se sont surtout préoccupés de traduire des effets (variation ou différence) de densité de l'air. Cinq élèves (quatre groupes) le font en représentant des particules plus ou moins espacées ; citons pour exemple :

Alexis et Laurent

L : Les particules, elles sont plus resserrées ; donc il y a une pression. Alors que là, elles sont moins serrées.

I : Bon, et quand la goutte s'arrête, alors ?

L : Ben, c'est que les particules sont aussi serrées d'un côté que de l'autre.

– Cette caractéristique est également prise en considération par six élèves (quatre groupes) au cours de la discussion de la validité d'une

simulation, seule ou en relation avec le nombre de particules et les dimensions du cadre.

Jonathan et Stanislas

J : Je voudrais réduire la taille du rectangle.

S : Et à peu près le couper en deux.

... *S : Avec des petites particules qui soient plus serrées les unes que les autres.*

... *J : Celle de droite plus rétrécie que celle de gauche et le même nombre de particules dans les deux cases.*

– Pour expliquer le déplacement de l'index, trois élèves (deux groupes) font intervenir les chocs des particules sur le bord des cases et expliquent le déplacement et l'arrêt de la goutte en effectuant des comparaisons de fréquences de chocs de part et d'autre de la goutte.

Olivier et Pascal

– déplacement

I : Et sur l'image, comment ça se traduit que l'air pousse ?

O : L'air, ça rebondit un peu ; les petits points rebondissent sur la paroi, ici plus parce qu'ils ont moins d'espace donc ils tapent plus sur les endroits, sur les murs...

P : Disons, comme ils ont moins d'espace, ils rebondissent plus sur toutes les parois, et comme ils vont à la même vitesse, ils rencontrent plus les parois.

– arrêt

O : Ils vont taper autant parce qu'ils auront autant d'espace.

Développer ce type de raisonnement n'est cependant pas immédiat pour tous les groupes. Un groupe raisonne uniquement en termes de densité de particules. Deux groupes raisonnent d'abord en termes de densité et n'évoquent les chocs de particules qu'après des questions insistantes de l'intervieweur, et devant une simulation à paroi mobile.

4.1.2.2. Chauffage

Tous les élèves parviennent à une interprétation de l'élévation de *température* par un accroissement de *vitesse*. Cette relation entre *température* et *vitesse* a été proposée par trois élèves, dans trois groupes différents, avant même que l'intervieweur ne leur demande de travailler sur la simulation (voir par exemple Olivier et Pascal). Elle a été proposée par un élève en réponse à cette demande. Elle a été acceptée plus difficilement par les autres qui, avant de la formuler, ou de la reprendre lorsqu'elle a été proposée par leur camarade, explorent d'autres possibilités : particules qui

grossissent, se multiplient ; forces de répulsion entre les particules (Méheut et al., 1994).

Olivier et Pascal

Ils semblent d'abord éprouver quelque difficulté à prévoir ce qui va se passer. Pascal s'appuie ensuite sur l'idée de dilatation et effectue une prévision correcte.

P : L'air va se dilater et puis quand on va ouvrir, il va pousser ; il va plus pousser la goutte que le...

Après avoir observé le phénomène, il passe de cette idée à celle d'une accélération des particules.

P : L'air était plus... Les particules étaient plus écartées dans un espace toujours aussi restreint, elles tapaient beaucoup plus vite.

... *P : Quoi, elles tapent beaucoup plus vite. C'est pas vraiment qu'elles sont plus espacées mais... Elles s'entrechoquent beaucoup plus vite, elles bougent beaucoup plus vite.*

... *P : En chauffant, on a accéléré le mouvement des particules.*

Olivier s'est jusque-là peu exprimé. En commentant la représentation iconique qu'il a réalisée, il développe l'idée que les particules ont grossi.

O : Il y a autant de particules dans les deux seringues et elles tapent autant ; elles tapent toutes les deux autant sur la même paroi, donc la paroi reste stable et, deuxième situation, les particules grossissent donc quand elles tapent sur la paroi, ça fait un choc plus gros que quand les petites particules tapent sur la paroi.

Pascal intervient alors pour rappeler l'hypothèse d'immuabilité des particules. Olivier se range alors à l'avis de Pascal.

La question de la traduction d'une élévation de température se pose à nouveau lors de l'utilisation du logiciel.

P : Faudrait essayer de chauffer, quoi !

... *P : Faudrait essayer de recréer quand on chauffe.*

... *O : Sur l'ordinateur, est-ce qu'on pourrait faire quand on chauffe ?*

L'intervieweur leur renvoie la question.

I : Comment est-ce qu'il faudrait faire ça ?

P : Si ce que j'ai dit est juste, faudrait pouvoir accélérer le mouvement des particules dans celle-là.

Pascal demande alors à utiliser une simulation à paroi mobile pour tester son hypothèse.

L'exploitation de cette relation température-vitesse a été plus ou moins approfondie dans les différents groupes d'élèves. Une élève, après avoir formulé cette hypothèse, ne parvient pas à l'utiliser pour construire une interprétation des phénomènes. Cinq élèves (trois groupes) établissent une relation entre *vitesse* des particules et *fréquence* des chocs, mais ne font pas intervenir la *force* des chocs ; l'équilibre correspond alors pour eux à l'égalité des *fréquences* des chocs de part et d'autre de la paroi. Deux élèves parviennent à développer des raisonnements mettant en jeu *fréquence* et *force* des chocs. Un élève ne s'est pas exprimé à ce sujet.

Jean-Michel et Florence

JM : ... Les chocs sont plus violents parce que les molécules vont plus vite...

I : Et alors, la paroi, à ton avis, devrait s'arrêter quand ?

F : Quand les molécules bleues vont toucher le même nombre de fois la paroi.

... JM : Par exemple, si un choc de molécule bleue vaut 10 et qu'il y a 10 chocs et que un choc de molécule noire vaut 5, il faudrait 20 chocs de molécules noires pour 10 chocs de molécules bleues ; et la paroi s'arrêtera.

Jonathan et Stanislas

J : Comme à droite ça va plus vite, la force de frappe, si on peut appeler ça comme ça est plus grande que celle de gauche. Mais, comme à gauche ça touche plus de fois la paroi, les deux sont compensés.

4.1.3. Apports de la simulation

Comme nous l'avons vu précédemment, l'interprétation des forces de pression par les chocs des particules contre une paroi a été effectuée sans difficulté par trois groupes d'élèves. Pour deux groupes, l'intervieweur a fait appel à une simulation à paroi mobile.

L'affichage des comptages de nombres de chocs a été mis en œuvre, soit à l'initiative de l'intervieweur, soit à la demande d'un élève lors des demandes d'explication du déplacement et de l'immobilisation de l'index mobile.

Ainsi un élève, après avoir fait l'hypothèse d'une relation entre température et *vitesse* des particules, a demandé à utiliser une simulation avec paroi mobile.

Olivier et Pascal

P : Si ce que j'ai dit est juste, faudrait pouvoir accélérer le mouvement des particules dans celle-là.

- ... I : Dans le logiciel, on peut changer la vitesse donc qu'est-ce qu'il faudrait, là ?
- ... P : Il faudrait mettre une paroi mobile et on verrait si quand ça accélère ça pousse ou pas.
- ... I : Alors, qu'est-ce que tu voudrais voir comme logiciel ? Il y a deux possibilités : soit on laisse la paroi fixe et puis on compte les chocs, soit on met la paroi mobile ; qu'est-ce que vous voulez voir ?
- P : Est-ce qu'on peut mettre la paroi mobile et puis compter les chocs ?

C'est en regardant cette simulation que les élèves ont développé les raisonnements reliant *vitesse* des particules et *fréquence* des chocs.

Deux élèves ont également fait appel à une simulation pour «vérifier», dans le cas du *chauffage*, que la position d'équilibre correspondait à des *fréquences* de chocs, de part et d'autre de la paroi, égales. Cette interprétation n'étant pas vérifiée, ils n'ont, dans le temps imparti à l'entretien, pas trouvé d'issue à cette contradiction.

Dans le cas du *chauffage* également, cette intervention, initiée par l'intervieweur, a conduit deux élèves à développer des raisonnements faisant intervenir *fréquence* et *force* des chocs.

4.2. Résultats de la séquence d'enseignement

Nous présentons ici les principaux résultats issus de l'analyse des données ; une présentation plus détaillée en a été faite dans Méheut et al. (1994). Ces résultats peuvent être lus d'une part comme une évaluation de l'efficacité pédagogique de la séquence, d'autre part comme un test des hypothèses sous-jacentes à la conception de la séquence.

4.2.1. Évaluation de l'efficacité de la séquence d'enseignement

L'efficacité à court terme de la séquence a été évaluée en particulier en termes de réinvestissement du modèle à la prévision et à l'interprétation dans des situations légèrement différentes de celles abordées au cours de l'enseignement. En gardant le même dispositif, nous avons proposé une *détente* et un *refroidissement*. Les élèves devaient effectuer des prévisions à propos d'une des situations.

Les prévisions concernant le sens du déplacement sont correctes pour une grande majorité des élèves pour la situation de détente (91 %), un peu moins pour la situation de refroidissement (80 %).

Situation		détente N = 96	refroidissement N = 70
Raisonnement			
particules	actions	12 %	10 %
	fréquence des chocs	53 %	60 %
	autres	6 %	16 %
non particules	statique	10 %	6 %
	actions	44 %	40 %
	autres	22 %	4 %
Prise en considération des deux quantités de gaz		55 %	69 %
d'une seule quantité de gaz		42 %	31 %
non réponse		3 %	1 %

Table 1 : Réinvestissement du modèle à la fin de la séquence

Pour les deux situations, un peu plus de la moitié des élèves raisonnent en termes de particules (voir table 1). La plupart d'entre eux appuient leur prévision sur une comparaison de la fréquence des impacts.

– Dans la situation de *détente*, 15 % explicitent une relation entre dimensions des cadres et fréquence des impacts ; par exemple :
(La goutte va se déplacer) parce qu'à gauche, l'espace est plus petit donc les particules vont heurter les parois plus de fois...

– Pour la situation de *refroidissement*, 26 % explicitent une relation entre vitesse des particules et fréquence des chocs ; par exemple :
Elle (la goutte) va se déplacer car la fraîcheur réduit la vitesse des particules ; donc il y a moins de chocs...

Ils sont 13 % à prendre en considération à la fois la *force* et la *fréquence* des chocs ; par exemple :
Elle (la goutte) s'arrête car le volume ayant diminué à droite, les chocs seront plus fréquents à droite, donc on aura : à gauche, chocs violents mais peu fréquents ; à droite, chocs fréquents mais peu violents. Donc on aura rétabli l'équilibre suivant la violence et le nombre de chocs.

Table 2a

Situation	Population témoin		Après la séquence	
	Chauffer N = 80	Refroidir N = 63	Chauffer N = 50	Refroidir N = 57
Prédiction				
Déplacement sens correct	72 %	52 %	80 %	47 %
Pas de déplacement	12 %	21 %	12 %	25 %
Déplacement sens incorrect	11 %	22 %	8 %	25 %
non réponse	4 %	5 %	0 %	3 %

Table 2b

Situation	Population témoin		Après la séquence	
	Chauffer N = 80	Refroidir N = 63	Chauffer N = 50	Refroidir N = 57
Explication particulière	5 %	3 %	22 %	26 %
non particulière	81 %	76 %	60 %	56 %
pas d'explication	14 %	21 %	18 %	17 %
Situation de «chauffage» :	$\chi^2 = 9,9$	$p < 0,01$		
Situation de «refroidissement» :	$\chi^2 = 13,2$	$p < 0,01$		

Table 2 : Efficacité à long terme de la séquence d'enseignement

L'efficacité à plus long terme de cet apprentissage peut être évaluée à partir des réponses aux questionnaires complémentaires (voir paragraphe 3.3). L'analyse de ces réponses ne révèle aucune différence significative entre les élèves ayant suivi cette séquence et les autres, en ce qui concerne la prévision des phénomènes (table 2a). Par contre, les élèves ayant suivi cette séquence utilisent davantage un modèle particulière que les autres (table 2b).

4.2.2. Test des hypothèses sous-jacentes à la conception de la séquence

Notre première hypothèse était que les étudiants utiliseraient un modèle dans la mesure où il leur semblerait utile, c'est-à-dire dans la mesure où il leur permettrait d'expliquer ou de prévoir des phénomènes de manière plus efficace. En relation avec cette hypothèse très générale, nous avons fait l'hypothèse (H_1) que les phénomènes faisant intervenir la température (variation ou différence de température) se révéleraient plus «problématiques» que les propriétés élastiques dans lesquels la température n'intervient pas. Enfin, dans le choix des questions, nous avons fait l'hypothèse (H_2) que les étudiants prendraient en considération et effectueraient des comparaisons entre les actions exercées par les deux systèmes davantage pour expliquer ou prévoir l'immobilisation que le déplacement de l'index mobile.

Si l'on considère l'hypothèse (H_1), les réponses aux questionnaires complémentaires (table 3) montrent que les élèves sont en mesure de prévoir les propriétés des gaz liées à une variation de volume : *compression* (ils sont plus de 70 % à effectuer des prévisions correctes) ou *détente* (plus de 50 %) ; les propriétés faisant intervenir des variations de température apparaissent effectivement comme plus problématiques (ils ne sont que 20 % à faire des prévisions correctes).

Situation	compression N = 79	détente N = 77	chauffage N = 79	refroidissement N = 77
déplacement sens correct	77 %	53 %	22 %	21 %
pas de déplacement	11 %	12 %	39 %	40 %
déplacement sens incorrect	11 %	31 %	22 %	25 %
non réponse	0 %	4 %	17 %	14 %

Table 3 : Test de l'hypothèse H₁

Si l'on considère l'hypothèse (H₂), les résultats obtenus durant la séquence d'enseignement mettent en évidence une différence significative entre les questions concernant le déplacement et les questions concernant l'immobilisation (table 4). Dans la situation de *compression*, 4 % seulement des élèves prennent en considération les deux échantillons de gaz pour expliquer le *déplacement* ; 28 % le font lorsqu'il s'agit d'expliquer l'*immobilisation*. Dans la situation de *chauffage*, 10 % seulement des élèves prennent en considération les deux échantillons de gaz pour expliquer le *déplacement* ; 37 % le font lorsqu'il s'agit d'expliquer l'*immobilisation*.

Situation	compression N = 145		chauffage N = 160	
	déplact	arrêt	déplact	arrêt
Prise en considération une seule quantité de gaz	96 %	69 %	88 %	56 %
les deux quantités de gaz	4 %	28 %	10 %	37 %
non réponse	0 %	3 %	2 %	7 %
	$\chi^2 = 36,4$ p < 0,001		$\chi^2 = 40,5$ p < 0,001	

Table 4 : Test de l'hypothèse H₂

Ces résultats contribuent donc à la validation des deux hypothèses (H₁) et (H₂).

En ce qui concerne notre hypothèse générale par contre, nous n'avons, à la fin de la séquence, noté aucune différence significative dans l'utilisation du modèle à propos de situations de *détente* et de situations de *refroidissement* (table 1).

5. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Les résultats obtenus contribuent à la description d'étapes possibles et d'obstacles à franchir dans l'enseignement de premières notions de structure de la matière, si l'on se place dans une perspective de modélisation de systèmes physiques et d'utilisation de ces modèles comme instruments d'interprétation et de prévision de phénomènes physiques.

Les observations réalisées au cours des entretiens et de la séquence d'enseignement apportent des informations sur les changements que les élèves doivent opérer dans leurs manières de raisonner. Certains de ces changements renvoient à des résultats de recherche déjà bien assurés :

– passage d'une explication finaliste : *l'air a un état normal, il tend à y revenir s'il s'en trouve écarté* (Séré, 1985) à une explication dynamique, à caractère causal (recherche de forces) ;

– développement de raisonnements non linéaires (voir en particulier Viennot, 1993) : prise en considération des forces exercées par deux sous-systèmes sur un même troisième.

D'autres apparaissent plus spécifiques :

– développement de raisonnements dans un micro-monde très contraint (particules immuables, dotées de propriétés newtoniennes : mouvement inertiel et chocs élastiques) ;

– séparation et mise en relation de deux modes de description des phénomènes : mode phénoménologique et modèle, les relations entre variables phénoménologiques et variables du modèle n'étant pas toutes biunivoques ; l'interprétation d'une variation de pression par exemple pouvant demander de raisonner à la fois sur la *fréquence* et la *force* des chocs, la *fréquence* des chocs dépendant elle-même, pour un système de particules donné, du volume et de la vitesse des particules, donc de la température.

Si l'on s'intéresse à l'efficacité de cette séquence comme dispositif d'enseignement, on peut éprouver une certaine satisfaction en comparant les prévisions effectuées par les élèves à l'issue de cette séquence à celles d'élèves n'ayant reçu aucun enseignement relatif aux propriétés thermoélastiques des gaz. Ainsi dans leur quasi-totalité, les élèves effectuent-ils, à l'issue de la séquence, des prévisions correctes sur des phénomènes mettant en jeu des propriétés thermoélastiques des gaz. La majorité d'entre eux utilisent alors le modèle de façon convenable (un raisonnement en termes de fréquence de chocs était ici suffisant, compte tenu de la question posée). Par contre on doit noter qu'à l'issue de cette séquence, une faible fraction d'élèves seulement est parvenue à développer des raisonnements mettant en jeu *fréquence* et *force* des chocs. Le temps imparti à ce travail,

les situations didactiques mises en œuvre n'ont permis qu'à une minorité d'élèves d'élaborer ces raisonnements complexes.

Deux ans après, et par comparaison à une population d'élèves ayant suivi un autre enseignement, les résultats sont également discutables. Les prévisions des élèves ayant suivi la séquence d'enseignement ne semblent pas significativement différentes de celles des autres élèves par rapport à des questions similaires à celles abordées au cours de la séquence d'enseignement. Ils sont cependant (un peu) plus nombreux à utiliser un modèle particulière que les autres élèves.

Si l'on se place dans une perspective de test d'hypothèses, les données recueillies confirment qu'avant un enseignement concernant les propriétés thermoélastiques des gaz, les élèves sont capables, dans une proportion beaucoup plus importante, de prévoir les propriétés des gaz associées à des variations de volume (compression ou détente), sans prendre en considération d'éventuelles variations de température ; les propriétés des gaz liées à des variations de température leur posent effectivement davantage de problèmes (hypothèse H_1). Elles mettent par ailleurs en évidence une différence significative entre questions concernant l'immobilisation et questions concernant le déplacement, eu égard à la prise en considération des actions exercées par deux sous-systèmes (hypothèse H_2).

Les questions posées deux ans après à des élèves ayant participé à cette séquence montrent que ceux-ci, d'une part, n'utilisent pas explicitement le modèle dans leur majorité (même s'ils le font plus que les autres), d'autre part n'effectuent pas, statistiquement, des prévisions plus justes que des élèves ayant suivi un enseignement différent sur cette partie du programme.

Ceci nous amène à revoir notre hypothèse initiale, concernant l'utilité et l'efficacité du modèle. Nous devons donc considérer que les questions que nous avons choisies n'ont pas été suffisantes pour que le modèle apparaisse utile aux élèves et qu'ils l'utilisent préférentiellement à d'autres formes d'explications. Des questions concernant l'isotropie et l'homogénéité des forces de pression pourraient s'avérer plus fructueuses dans cette perspective (Méheut et al., 1994) ; cependant rien ne nous permet aujourd'hui d'affirmer que les élèves ne puissent, ici encore, développer des explications locales, fonctionnelles par rapport à un ensemble de questions limité. Il faut nous souvenir que l'une des forces des modèles particuliers réside dans leur caractère unificateur. Il est clair que faire jouer un tel type d'utilité et d'efficacité demande du temps.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSSON B. (1990). Pupils' conceptions of matter and its transformations (age 12-16). In P.L. Lijnse et al. (Eds), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*. Utrecht, CDB Press, pp. 12-35.
- BENSAUDE-VINCENT B. & KOUNELIS C. (1991). *Les atomes. Une anthologie historique*. Paris, Presses Pocket.
- BOLTZMANN L. (1902). *Leçons sur la Théorie des Gaz*. Paris, Gauthier-Villars.
- BROOKS A., BRIGGS H. & DRIVER R. (1984). *Aspects of Secondary Students' Understanding of the Particulate Nature of Matter*. The University of Leeds.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble, La Pensée Sauvage.
- CHIROUZE P.-J., BÉRANGER M. & VENTO R. (1979). *Sciences physiques, classe de quatrième*. Paris, Colin.
- CHIROUZE P.-J. & VENTO R. (1993). *Sciences physiques, quatrième*. Paris, Colin.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1988). Modèle particulière et activités de modélisation. *Aster*, n° 7, pp. 143-184.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1990). *Modèle particulière et démarches de modélisation*. Paris, LIRESP- INRP.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1992). Modèle particulière et démarches de modélisation. In Équipe INRP-LIREST (Eds), *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- DELATTRE P. & THELLIER M. (Eds) (1979). *Actes du colloque «Élaboration et justification des modèles»*, tome 1. Paris, Maloine.
- DOW W.M., AULD J. & WILSON D.J. (1978). *Pupils' Concepts of Gases, Liquids, Solids*. Dundee, College of Education.
- DURANDEAU J.-P., BRAMAND P., CAILLET D. & COMTE M.-J. (1987). *Sciences Physiques 5e*. Paris, Hachette.
- JOHSUA S. (1985). *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique*. Thèse, Université d'Aix-Marseille II.
- KUBBINGA H. (1983). *Le développement historique du concept de «molécule» dans les sciences de la nature jusqu'à la fin du 18ème siècle*. Thèse, Paris, EHESS.
- LARCHER C., CHOMAT A. & MÉHEUT M. (1990). À la recherche d'une stratégie pédagogique pour modéliser la matière dans ses différents états. *Revue Française de Pédagogie*, n° 93, pp. 51-61.
- MÉHEUT M. (1982). *Combustion et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de sixième*. Thèse, Université Paris 7.
- MÉHEUT M. & CHOMAT A. (1990). Les limites de l'atomisme enfantin ; expérimentation d'une démarche d'élaboration d'un modèle par des élèves de collège. *European Journal of Psychology of Education*, n° 5, pp. 417-437.
- MÉHEUT M., CHOMAT A. & LARCHER C. (1994). Construction d'un modèle cinétique de gaz par des élèves de collège : jeux de questionnement et de simulation. In M. Caillot (Ed.), *Actes du Quatrième Séminaire National de la Recherche en Didactique des Sciences Physiques*. Amiens, IUFM de Picardie, pp. 53-71.
- MÉHEUT M. (à paraître). Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases. *International Journal of Science Education*.
- MICHAUD Y. & LE MOAL Y. (1988). *Sciences physiques 4e*. Paris, Magnard.

- NOVICK S. & NUSSBAUM J. (1978). Junior high school pupils' understanding of the particulate nature of matter : an interview study. *Science Education*, n° 62, pp. 273-281.
- PERRIN J. (1903). *Traité de Chimie Physique. Les Principes*. Paris, Gauthier-Villars.
- POSNER G.J., STRIKE K.A., HEWSON P.W. & GERTZOG W.A. (1982). Accomodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, n° 66, pp. 211-227.
- PFUNDT H. (1981). The final link in the division process or the first building block ? Pre-instructional conceptions about the structure of substances. *Chimica Didactica*, n° 7, pp. 75-94.
- PULLMAN B. (1995). *L'atome dans l'histoire de la pensée humaine*. Paris, Fayard.
- ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1990). Students reasoning in thermodynamics. In P.L. Lijnse et al. (Eds), *Relating Macroscopic Phenomena to Microscopic Particles*. Utrecht, CDB Press, pp. 36-49.
- SÉRÉ M.-G. (1985). *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution*. Thèse, Université Paris 6.
- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, n° 1, pp. 13-28.
- Von GLASERSFELD E. (1994). Pourquoi le constructivisme doit-il être radical ? In M. Larochelle & N. Berdnaz (Eds), *Constructivisme et Éducation. Revue des Sciences de l'Éducation*, n° 20, pp. 21-28.
- WALLISER B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris, Seuil.

Évolution des conceptions d'élèves de dix ans sur la génétique à la suite d'activités scolaires incluant une visite scolaire à la Cité des Enfants

Mondher ABROUGUI, Pierre CLÉMENT

Équipe «Didactique de la Biologie et Muséologie des Sciences»
Laboratoire Interdisciplinaire de Recherches en Didactique
et en Histoire des Sciences et des Techniques (LIRDHIST)
Université Lyon 1, Bâtiment 403
69622 Villeurbanne cedex, France.

Résumé

Cette recherche étudie l'évolution des conceptions d'élèves de dix ans à la suite d'activités scolaires incluant la visite d'un lieu muséal scientifique : la Cité des Enfants (CSI La Villette, Paris). Avant toute activité, il est demandé à des élèves d'associer des caractères socio-culturels à des traits biologiques. Après ces activités scolaires, les conceptions évoluent significativement vers des jugements moins stéréotypés. Cette évolution est aussi nette dans les classes ZEP (milieux sociaux défavorisés) que dans les classes non-ZEP étudiées. Elle est particulièrement importante dans les classes où une préparation pédagogique a précédé la visite. Elle n'est pas décelable dans la classe témoin soumise aux mêmes pré- et post-tests mais qui n'effectue pas la visite.

Mots clés : didactique de la biologie, génétique, conceptions, représentations sociales, école et musée, élèves de milieux défavorisés.

Abstract

This work concerns ten year-old childrens' conceptions after a series of school activities including a visit of a childrens' scientific center : «la Cité des Enfants (CSI La Villette, Paris)». Before these activities, children strongly associate socio-cultural characters with biological features. After these school activities, childrens' conceptions significantly evolve towards less stereotyped judgments. This evolution is as significant in ZEP schools (unfavourable social milieu) as in the other schools. It is particularly significant in the two classrooms where a pedagogical activity took place before the visit. In the control group, the pupils took the same pre- and post-test but did not visit the scientific center : there was no evolution of the pupils' conceptions in the post-test.

Key words : *biology education, genetics, conceptions, school and scientific center, unfavorable social milieu pupils.*

Resumen

Esta investigación estudia la evolución de las concepciones de alumnos de 10 años después de las actividades escolares incluyendo la visita de un centro de ciencias para niños : «la Cité des Enfants (CSI La Villette, Paris)». Ante toda actividad, los alumnos realizan asociaciones entre caracteres socio-culturales y características biológicas. Después de estas actividades escolares, estas concepciones evolucionan significativamente hacia juicios menos estereotipados. Esta evolución es percibida tanto en las clases ZEP (medios sociales desfavorecidos) como en las clases no ZEP (Non-ZEP) estudiadas. Ella es particularmente importante en las clases donde una preparación pedagógica ha precedido la visita. Ella no se revela en la clase control sometida a los mismos pre y post-test pero que no efectúa la visita.

Palabras claves : *didáctica de biología, genética, representaciones sociales, escuela y museo, alumnos de medios desfavorecidos.*

1. INTRODUCTION

La génétique n'est introduite actuellement dans les programmes scolaires français qu'en classe de troisième (élèves de 14-15 ans). Jusque là, c'est surtout dans des contextes d'éducation non formelle que les enfants s'informent sur les problèmes relatifs à l'hérédité. La famille et les médias jouent à cet égard un rôle essentiel. Dans les années 1980, ces questions faisaient explicitement partie du programme du cycle moyen de l'école primaire et étaient abordées dans le guide pédagogique de biologie (Bornancin et al., 1982). Elles ne sont pas mentionnées de façon explicite dans les nouveaux programmes de 1995 (BOEN, 1995). Mais les professeurs d'école avouent être régulièrement confrontés à des questions des élèves dans ce domaine, aussi bien dans le cadre des activités scientifiques (à

propos de la reproduction par exemple) que lors de l'éducation civique. C'est d'ailleurs pour répondre à ce type de demande que les médias destinés aux enfants de dix ans leur proposent régulièrement des dossiers sur l'hérédité et sur la génétique (par exemple *Okapi*, 1987, 1993).

Des notions élémentaires de génétique telles que la ressemblance ou la différence par rapport aux parents, l'identité de chacun, l'existence de sosies... ne sont pas simples à acquérir. Les connaissances communes à leur égard sont marquées par des représentations sociales tenaces, imprégnées par des courants de pensée malheureusement dominants en dehors du milieu scientifique, l'héréditarisme et le prédéterminisme (Clément et al., 1980, 1981 ; Rumelhard, 1986), dont l'enracinement est ancien : physiognomie du 18^e siècle (Madlener, 1993), phrénologie puis thèses de Lombroso sur les criminels au 19^e siècle (Jourdan, 1981 ; Gould, 1983 ; Pogliano, 1993 ; Strasser, 1993), caractérologie et morphopsychologie au 20^e siècle (Corman, 1932, 1983). Ces courants sont encore très influents aujourd'hui (Boy & Michelat, 1986), bien que des expériences récentes en double aveugle aient montré leur non-scientificité (Clément, 1994b).

Notre recherche concerne les conceptions d'élèves de dix ans issus de différents milieux sociaux, sur des notions élémentaires de génétique humaine. Nous parlons de conceptions plutôt que de représentations à la suite des arguments développés par Giordan & De Vecchi (1987) et Clément (1994a), sauf pour les représentations sociales : ce dernier concept, introduit par Moscovici en 1961, a conservé depuis un sens non ambigu (Moscovici, 1984 ; Jodelet, 1989 ; Doise, 1990) auquel peuvent se référer les didacticiens (Clément, 1994a). Nous entendons par «conceptions» l'univers mental d'un élève, c'est-à-dire ce que les psychologues appellent généralement des «représentations mentales» (Le Ny, 1985), et qui incluent les «représentations sociales». L'utilisation du terme «conceptions» permet aux didacticiens des sciences d'échapper au débat entre psychologues cognitivistes représentationnistes et anti-représentationnistes (Clément, 1994a).

Le protocole de notre recherche a été mis au point pour faire émerger des réponses à partir desquelles nous analyserons les conceptions, et notamment les représentations sociales, de ces élèves, afin de tester ensuite leur évolution (déstabilisation éventuelle) après une action pédagogique. Celle-ci s'effectue, d'une part, sur le lieu scolaire, en classe, d'autre part à l'occasion d'une visite scolaire sur un lieu muséal scientifique. Ce lieu est la Cité des Enfants (CSI La Villette, Paris) où l'îlot «Fais ta carte d'identité» (espace 6-12 ans) aborde ces questions : y sont en effet employés, dans l'espace ou dans le fascicule qui le présente, des termes tels que hérédité, gènes, chromosomes, caractères génétiques, identité, sosie, etc. (Citédoc, 1993).

Créée en 1992, la Cité des Enfants accueille 1 600 à 2 000 personnes par jour, enfants et accompagnateurs, soit environ 500 000 personnes par an, dont plus de 300 000 dans l'espace 6-12 ans. Près de la moitié de ces visiteurs sont des classes d'élèves accompagnés par leur enseignant (Guichard, communication personnelle). Des travaux ont déjà été réalisés sur la fonction éducative des musées scientifiques, et sur leur visite par des publics scolaires (Shettel, 1968, 1973 ; Screven, 1976, 1984 ; Miles, 1985, 1988 ; Gottesdiener, 1987 ; Samson & Schiele, 1989). Ces travaux se sont multipliés et renouvelés durant ces dernières années (Allard & Boucher, 1991 ; Lefebvre, 1994), notamment en s'articulant plus sur des recherches en didactique des disciplines scientifiques (Clément et al., 1992 ; Clément, 1993 ; Giordan et al., 1993, 1994 ; Guichard, 1989, 1990, 1992, 1994, 1995).

L'îlot «Fais ta carte d'identité» introduit les visiteurs dans le thème «Toi et les autres» qui a été conçu pour entraîner le visiteur à distinguer les caractères biologiques des aspects culturels ; il propose aux enfants des observations sur leurs caractéristiques morphologiques telles que la couleur de leur peau ou de leurs cheveux, la forme de leurs oreilles ou de leurs empreintes digitales : autant de traits qui illustrent explicitement la notion de «caractère génétique», mais qui risquent aussi, à l'insu des concepteurs de l'îlot, de mobiliser des associations puisées dans une mémoire collective (physiognomie, caractérologie, morphopsychologie, «science» nazie, eugénisme). De telles représentations sociales ne s'articulent que rarement à une idéologie structurée, mais n'en sont pas moins tenaces.

La recherche que nous présentons ici analyse les conceptions des élèves relatives à la façon dont ils associent des caractères morphologiques d'une part et des traits comportementaux/socio-culturels de l'autre : d'abord avant la visite, ensuite après la visite, pour savoir si ces conceptions ont été plutôt confortées ou plutôt déstabilisées. Le protocole mis en œuvre cherche à mesurer l'influence de trois variables :

(1) la visite de l'îlot, en comparant les classes qui visitent l'îlot à une classe témoin qui ne le visite pas, mais qui est soumise au même protocole de recueil de données ;

(2) le milieu social des élèves, en comparant des classes ZEP (Zones d'Éducation Prioritaire, où les élèves appartiennent majoritairement à des catégories socio-professionnelles défavorisées) et des classes Non-ZEP (avec l'hétérogénéité sociale «normale» des élèves) ;

(3) la préparation pédagogique de la visite, réalisée dans une sur deux des classes testées, aussi bien dans la situation ZEP que Non-ZEP.

Plusieurs types de données ont été recueillies dans le cadre de cette recherche, mais nous ne présentons ici que les résultats correspondant à

une méthode, utilisée en pré-test et en post-test : un jeu d'associations entre deux lots de cartes présentant l'un des caractères morphologiques, l'autre des traits comportementaux/socio-culturels. Les conceptions des élèves sont inférées à partir des résultats de ce jeu. Le corpus présenté ici ne permet pas de parler de l'ensemble des conceptions des élèves, mais de leurs seules «*conceptions conjoncturelles*» (Clément, 1994a) qui émergent dans la situation de jeu qui leur est proposée. Cette situation étant la même dans toutes les classes étudiées, les comparaisons entre les classes sont donc possibles pour analyser l'influence des trois variables testées sur ces conceptions des élèves.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Présentation des quatre classes qui ont visité l'îlot, et de la classe témoin

Le tableau 1 résume les principales caractéristiques des élèves des cinq classes avec lesquelles nous avons travaillé.

	ZP	Z	NP	N	T
nombre élèves	23	22	25	23	22
nombre garçons	14	12	15	13	13
nombre filles	9	10	10	10	9
origine étrangère	12	11	2	6	5
âge moyen	10 ans 3 mois	10 ans 2 mois	10 ans 1 mois	10 ans 3 mois	10 ans 3 mois

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des élèves des cinq classes étudiées.

Z : classes ZEP. **N** : classes Non-ZEP. **P** : avec une préparation pédagogique.

T : classe témoin (sans préparation pédagogique et sans visite à la Cité des Enfants).

Les cinq classes sont des CM2 (Cours Moyen 2ème année), qui correspondent à la dernière année du cycle d'études primaires (enfants de 10-11 ans).

La classe témoin est située dans la région lyonnaise (commune de Vénissieux). Les autres classes sont localisées dans la région parisienne (les deux classes ZEP dans la commune d'Aubervilliers et les deux classes Non-ZEP dans la commune de Tremblay-en-France).

Les effectifs de ces cinq classes, ainsi que l'âge moyen des enfants, et la proportion relative de garçons et de filles, sont très voisins.

La principale différence visible entre les classes ZEP et Non-ZEP, en dehors des catégories socio-professionnelles des parents (milieux plus défavorisés pour les classes ZEP), est la proportion d'enfants d'origine étrangère : elle est de 50 % dans les classes ZEP, alors qu'elle n'est que de 8 % et 26 % dans les deux classes Non-ZEP étudiées. Les origines maghrébines forment le plus fort contingent (7 en ZP, 6 en Z, 2 en NP, 5 en N), puis les élèves originaires d'Afrique noire (2 en ZP, 4 en Z dont un métis, et sans comptabiliser un français de couleur noire, antillais, en NP). Les autres ont des origines diverses : Asie (2 en ZP), Amérique latine (1 en ZP), Portugal (1 en Z), Espagne (1 en N). La classe N présente quelques caractéristiques intermédiaires entre les classes ZEP (Z et ZP) et la classe NP : le nombre d'élèves d'origine étrangère (26%) en est un signe, ainsi que les problèmes de discipline au sein de cette classe. La classe témoin (T) a des caractéristiques proches de celles de la classe N.

2.2. Présentation de l'îlot «Fais ta carte d'identité»

Voisin de l'îlot «Rencontrer les autres», qui parle de la diversité des cultures dans le monde (vêtements, objets, cuisines, musiques), l'îlot «Fais ta carte d'identité» aborde les aspects biologiques de l'identité.

À son entrée, chaque enfant prend une feuille sur laquelle, parmi les cases proposées, il choisira celle qui lui correspond pour chacun ces «six caractères génétiques» : d'abord la couleur de ses cheveux, en comparant les siens à la gamme de couleurs proposée, puis, dans le module suivant, la couleur de sa peau. Il note ensuite s'il peut ou non «rouler» sa langue (la mettre en gouttière), puis si ses oreilles ont leur lobe inférieur collé ou détaché. Ensuite il choisit la catégorie correspondant à la couleur de ses yeux, et enfin celle de son type d'empreintes digitales. À la suite de quoi il entre ces six données dans l'ordinateur situé à l'extrémité de ce cheminement, en posant sa feuille sur l'emplacement habituel du clavier, et en touchant les cases cochées. Pour chacun des six caractères, l'écran de l'ordinateur indique combien de visiteurs avant lui avaient les mêmes caractéristiques. Ce nombre diminue au fur et à mesure de l'entrée des indices, pour se terminer sur la conclusion la plus fréquente «*tu es unique*» (ce qui signifie qu'aucun autre des enfants comptabilisés jusque là n'a eu la même conjonction de caractéristiques), ou pour lui indiquer parfois qu'il a eu «un sosie» parmi les visiteurs précédents, ou rarement plus d'un.

Trois autres indices caractérisant l'enfant peuvent être notés sur la même feuille, mais ne sont pas compris dans les données à entrer sur l'ordinateur. L'enfant peut y mesurer respectivement sa taille, son poids et son rythme cardiaque dans trois emplacements un peu excentrés par

rapport à l'espace où sont groupés les modules correspondant aux six indices génétiques.

L'évaluation du comportement des enfants qui pénètrent dans cet îlot a été réalisée (Clément et al., 1995), mais n'est pas rapportée dans cet article.

2.3. Protocole expérimental (figure 1)

Le recueil des données présentées ici a été effectué en 1994. Pour chacune des classes étudiées, les paramètres contrôlés étaient les suivants :

- même chercheur dans les cinq classes, avec un protocole d'intervention contrôlé et aussi identique que possible ;

- même prise de contact préalable avec l'instituteur, pour organiser avec lui la visite et les éventuelles activités qui la précèdent en classe, avec engagement du maître de ne pas aborder ces thèmes avec ses élèves avant la dernière phase de cette recherche ;

- même pré-test (cf. son contenu dans le paragraphe 2.5), passé dans la même situation de classe, sans réponse du chercheur aux éventuelles questions des enfants, et avec le minimum d'interactions entre lui et les enfants ;

- même intervalle (24 h) entre le pré-test et le post-test, celui-ci étant également réalisé dans la classe habituelle des élèves ;

- durant cet intervalle, la visite de la classe à la Cité des Enfants a eu lieu avec consigne pour tous les enfants de passer à l'îlot «Fais ta carte d'identité». Le même chercheur était présent sur le lieu pour y observer le comportement des enfants ;

- pour deux classes (une ZEP et une Non-ZEP), une activité pédagogique est proposée juste après le pré-test : le jeu de filiation (cf. son contenu au paragraphe 2.4). Cette activité est animée par le chercheur avec l'aide de l'instituteur.

Les objectifs de ce protocole expérimental sont les suivants :

1 – pour les classes qui ont fait la visite, comparaison entre les classes ayant eu une préparation pédagogique (une ZEP et une Non-ZEP) et les classes qui n'en ont pas eu (une ZEP et une Non-ZEP) ;

2 – pour les classes qui ont effectué la visite, comparaison entre les deux classes ZEP et les deux classes Non-ZEP ;

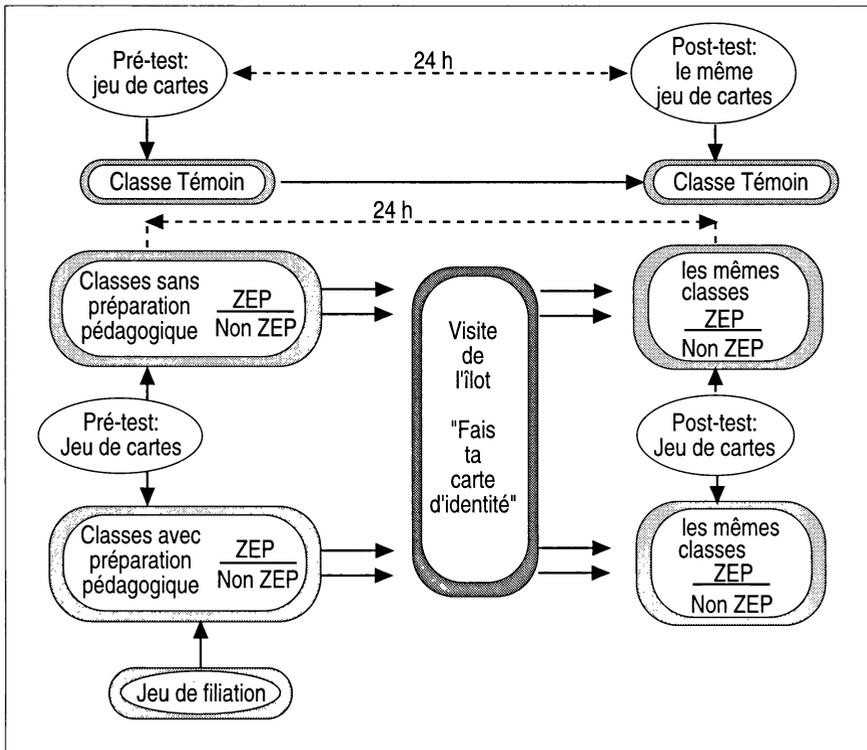


Figure 1 : Le protocole expérimental

3 – comparaison entre les quatre classes qui ont effectué la visite durant les 24 h entre pré- et post-tests, et la classe témoin qui n'a eu aucune activité pédagogique durant les 24 h entre pré- et post-test.

2.4. La préparation pédagogique (pour une classe sur deux) : le jeu de filiation

Dans deux classes (classes ZP et NP du tableau 1), le pré-test est suivi d'une activité pédagogique animée par le chercheur et l'instituteur. Il s'agit du «jeu de filiation», dont nous avons imaginé le contenu pour cette recherche. À travers ce jeu, les élèves se mettent dans la peau d'un couple qui doit retrouver, après vingt ans, son enfant qui avait été enlevé immédiatement après sa naissance. Ils disposent de deux listes : les caractéristiques socio-culturelles et/ou biologiques des parents d'une part, les caractéristiques de trois personnes de vingt ans dont le passé rend

pensable *a priori* cette filiation d'autre part. Les enfants travaillent d'abord individuellement, discutent ensuite par groupes de deux pour se mettre d'accord sur la meilleure solution et, finalement, élaborent une réponse individuelle au problème, sur une fiche/réponse. La solution ne leur est pas fournie, et le même jeu leur sera proposé après le post-test (la solution leur sera alors fournie).

Toutes ces discussions ont été enregistrées puis transcrites. Leur analyse, centrée sur les stratégies utilisées par les élèves pour résoudre ce problème, fera l'objet d'une publication ultérieure. Dans le présent travail, nous comparons l'impact de la présence ou de l'absence de ces activités pédagogiques antérieures à la visite, impact sur les conceptions des élèves relatives à des problèmes voisins de ceux abordés par le jeu de filiation, car concernant leurs associations entre caractères biologiques et caractères comportementaux/socio-culturels.

2.5. En pré-test et en post-test : le jeu de cartes

Un questionnaire pour enfants de dix ans doit être compréhensible et attractif, motivant. Nous en avons testé plusieurs types avant de choisir le jeu de cartes que nous avons ainsi progressivement élaboré. L'aspect ludique familier d'un jeu de cartes explique qu'il fonctionne bien auprès des enfants.

Le même jeu a été utilisé en pré-test et en post-test.

Après plusieurs essais visant à valider l'adaptation du protocole au public et à la situation visés, nous nous sommes restreints à cinq caractéristiques que nous avons appelées «socio-culturelles» : riche, sportif, intelligent, méchant, calme ; et à quatre caractéristiques que nous avons appelées «biologiques» : la taille, le poids, la couleur de la peau et celle des cheveux. Nous savons bien que tout caractère humain est à la fois biologique et socio-culturel, et que le débat inné «ou» acquis est actuellement dépassé pour les scientifiques (il existe à ce propos une littérature importante, depuis Jacquard, 1978 jusqu'à Stewart, 1993). Ainsi toutes les caractéristiques retenues témoignent d'une obligatoire interaction entre paramètres biologiques et socio-culturels. Cependant les traits que nous étiquetons «biologiques» sont plus indépendants du milieu et de l'expérience individuelle que les autres ; leur étiquette correspond à une acception commune qui nous semble *a priori* renforcée par l'îlot «Fais ta carte d'identité», et que nous cherchons justement à questionner par notre jeu. Nous reviendrons sur ce point dans la discussion de nos résultats.

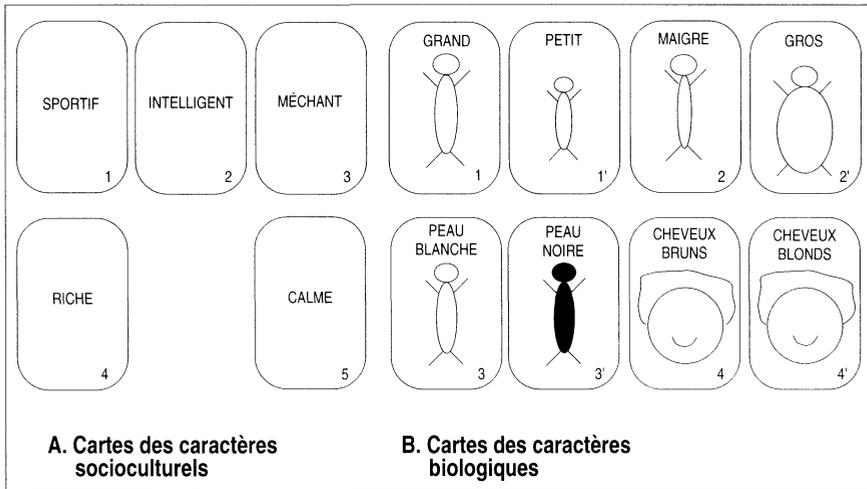


Figure 2 : Le jeu de cartes distribué aux enfants : chaque carte présente soit un caractère socio-culturel/comportemental (A), soit un caractère biologique (B).

N.B. : les cheveux étaient coloriés sur les cartes correspondantes.

Nom Prénom		LE PERSONNAGE				
		Sportif	Intelligent	Méchant	Riche	Calme
Taille	Grand					
	Petit					
Poids	Gros					
	Maigre					
Couleur de la peau	Noire					
	Blanche					
Couleur des Cheveux	Bruns					
	Blonds					

B. Disposition des cartes

Figure 3 : Le tableau que chaque enfant doit remplir (A), et la disposition des cartes sur la table lors du déroulement du jeu (B).

Le jeu se déroule de la manière suivante. Sur une grande table, les cartes des caractères «biologiques» sont disposées en cercle et par paires d'adjectifs antonymes (figures 2 et 3). Au centre de ce cercle, sont successivement posées, une à une, les cartes des caractères «socio-culturels» (selon un ordre constant, préalablement fixé : sportif puis intelligent puis méchant, puis riche puis calme). Les élèves, assis par quatre autour de la table doivent remplir chacun un tableau de correspondances entre caractères «biologiques» et caractères «socio-culturels».

Le maître, qui mène le jeu, a suivi les consignes suivantes qui ont été clairement formalisées avec lui auparavant :

- préciser aux élèves qu'ils ne devront dire aucun mot et ne poser aucune question dès que le jeu commence ;
- expliquer comment remplir le tableau des personnages (figure 3) : «mettre une croix dans la case correspondante au choix ; si aucun choix n'est possible, mettre une croix pour les deux réponses»
- introduire chaque carte «socio-culturelle», lorsqu'il la pose sur la table, par la question suivante : «d'après toi un sportif est ou grand ou petit ?» puis «ou gros ou maigre?», etc.
- avant de passer à la seconde question, attendre que les quatre élèves aient répondu, puis remplacer la carte «socio-culturelle» par la suivante ;
- une fois le tableau (figure 3) rempli, passer au groupe d'élèves suivant.

Les élèves qui ne jouent pas ont un travail à faire à leur place habituelle dans la classe, et ne voient pas ce qui se passe sur la table de jeu.

Les mêmes consignes ont été respectées pour le pré-test et le post-test.

2.6. Le traitement des données par analyse factorielle des correspondances (AFC)

Dans le tableau de la figure 3, les élèves avaient trois possibilités de réponses à associer à un caractère «socio-culturel». Par exemple, le sportif peut être associé à «grand» ou à «petit», ou être jugé aussi bien «grand» que «petit» si les deux cases (grand et petit) sont cochées. Aucune case spécifique ne correspondait à cette troisième possibilité, car la pratique du différenciateur sémantique d'Osgood montre qu'une case médiane est souvent plus attractive que les autres, comme case refuge, de prudence de choix. Mais cette troisième possibilité, de cocher les deux cases si le choix entre les deux n'était pas possible, était explicitement formulée par le maître lorsqu'il énonçait les consignes du jeu : il s'agissait alors d'un choix assumé.

Le tableau peut alors être traité par une AFC (analyse factorielle des correspondances), mise au point par Benzécri (1973), et dont nous avons montré qu'elle peut être utilisée sur des données issues d'un différenciateur sémantique d'Osgood (Clément et al., 1988 ; Chessel & Dodélec, 1989-93¹). Or notre tableau est comparable à celui que l'on construit à partir d'un

1 Dans les documents qu'ils diffusent avec leur logiciel ADE, Chessel et Dodélec ont notamment montré, à partir des données que leur a fournies P. Clément, obtenues à partir d'un différenciateur sémantique d'Osgood, que l'AFC est plus pertinente que l'ACP pour traiter ce type de données.

différenciateur sémantique : à chaque caractéristique en colonne correspondent quatre séries d'adjectifs antonymes avec trois jugements possibles pour chaque paire d'adjectifs. À un pré-test dans une classe correspond donc un tableau de 5 colonnes (les 5 caractéristiques «socio-culturelles») et de 12 lignes (4 paires d'adjectifs antonymes, avec une position médiane possible pour chaque paire). Pour comparer le pré-test au post-test, le tableau a 10 colonnes et 12 lignes. Pour comparer deux classes entre elles, pré-test + post-test, il a 20 colonnes et toujours 12 lignes. Nous avons donc réalisé plusieurs AFC, en fonction des comparaisons à effectuer et, à la fin, une AFC globale avec l'ensemble des données rassemblées sur les 5 classes (4 classes qui ont fait la visite, deux ZEP et deux Non-ZEP, et la classe témoin) : soit un tableau final avec 50 colonnes et 12 lignes.

3. RÉSULTATS

3.1. Les deux classes Non-ZEP

L'inertie totale dont rend compte l'AFC est de 44,92 %. L'écart entre ce pourcentage et 100 % exprime l'importance du «bruit de fond», qui est inévitable dans ce type de situation complexe, et qui exprime notamment ici la diversité des personnalités des élèves. L'intérêt d'une AFC est justement de faire émerger de l'ordre au-delà de ce bruit de fond : des résultats fort intéressants et fort significatifs peuvent apparaître avec une inertie totale très faible (Chessel, communication personnelle). Plus importante est la répartition de cette inertie sur les axes définis par l'AFC : si les pourcentages de cette répartition décroissent de façon linéaire, l'interprétation des plans factoriels devient inutile ; sinon doivent être retenus les axes pour lesquels le pourcentage de répartition est supérieur à la croissance linéaire des pourcentages suivants. Dans le cas présent, les pourcentages de répartition sont :

49,59 % pour l'axe F1	29,99 % pour l'axe F2	12 % pour l'axe F3
3,4 % pour l'axe F4	2,2 % pour l'axe F5	1,2 % pour l'axe F6

Les trois premiers axes doivent donc être pris en compte. Ces trois axes permettent de tracer trois plans factoriels : F1-F2 (figure 4), F1-F3 (figure 5) et F2-F3 (non reproduit car, ici, n'apportant pas d'information plus intéressante que les deux plans précédents). Les graphes des figures 4 et 5 correspondent donc à la même AFC. Celle-ci, rappelons-le, provient d'un tableau comportant 12 lignes (4 adjectifs, leurs 4 antonymes et les 4 possibilités de ne pas choisir entre eux en cochant les deux cases) et 20 colonnes (les 5 caractéristiques «socio-culturelles», multipliées par 2 car il y a les résultats des pré-tests et des post-tests, le tout multiplié encore par

2 car il y a 2 classes testées : les 2 classes Non-ZEP). L'AFC définit un nuage de 32 points (12 lignes + 20 colonnes), qui est ici tri-dimensionnel (axes F1, F2, F3), et peut être reconstitué à partir de ses projections sur les plans factoriels F1-F2 (figure 4) et F1-F3 (figure 5). Pour simplifier la lecture de ces plans factoriels, nous avons chaque fois tracé sur deux graphes différents (A et B des figures 4 et 5) les projections des points correspondant aux 12 lignes (graphes A en haut des figures 4 et 5), et les projections des points correspondant aux 20 colonnes (graphes B des figures 4 et 5) : l'interprétation de la signification des axes vient de la superposition des graphes A et B. L'interprétation de la place de chaque point par rapport aux axes doit se faire en imaginant leur emplacement dans un espace 3D, tel que celui présenté dans un cas (figure 7). Ici, l'interprétation 3D suppose la conjugaison 3D des graphes A des figures 4 et 5 pour les points correspondant aux caractères biologiques, et des graphes B des figures 4 et 5 pour les points correspondant aux caractères socio-culturels dans les pré-tests et post-tests des 2 classes Non-ZEP.

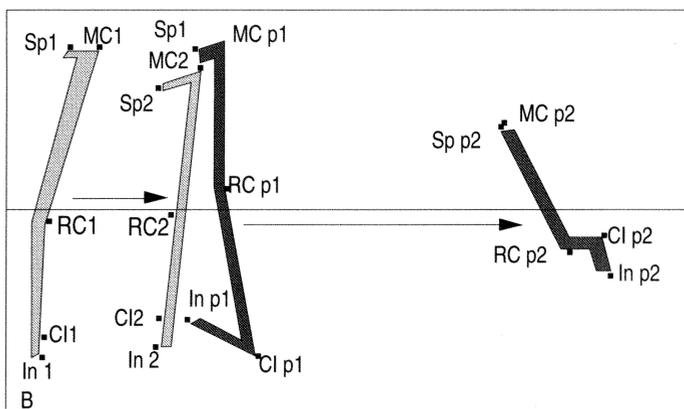
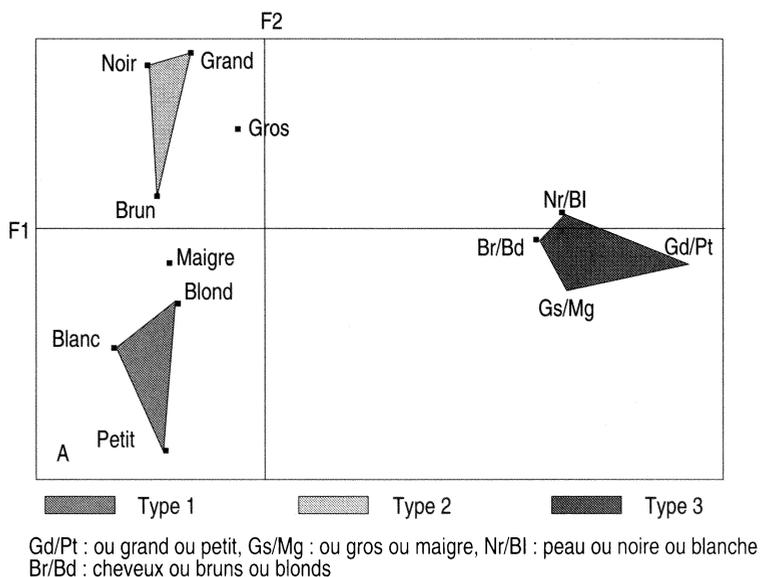
Les graphes A des figure 4 et 5 mettent en évidence une nette catégorisation ; trois types d'associations sont effectuées par les élèves entre plusieurs caractères biologiques :

Type 1	Type 2	Type 3
Petit	Grand	Ou grand ou petit
Peau blanche	Peau noire	Peau ou noire ou blanche
Cheveux blonds	Cheveux bruns	Cheveux ou bruns ou blonds
		Ou gros ou maigre

Tableau 2 : **Les trois types d'associations effectuées par les élèves entre plusieurs caractères biologiques.**

Les adjectifs «gros» et «maigre» sont, sur le plan F1-F2 (figure 4A), respectivement proches des types 2 et 1, mais ils doivent être considérés de façon indépendante, car ils s'opposent nettement sur l'axe F3, comme le montre le graphe A de la figure 5.

La signification des trois axes est donc la suivante : l'axe F1 oppose les stéréotypies (types 1 et 2 à gauche) à la non-stéréotypie (type 3 à droite). L'axe F2 oppose la stéréotypie de type 1 (petit, blanc, blond) à la stéréotypie de type 2 (grand, noir, brun). L'axe F3 oppose les caractères maigre (en haut) et gros (en bas), qui ne sont donc pas associés aux types 1 ou 2.

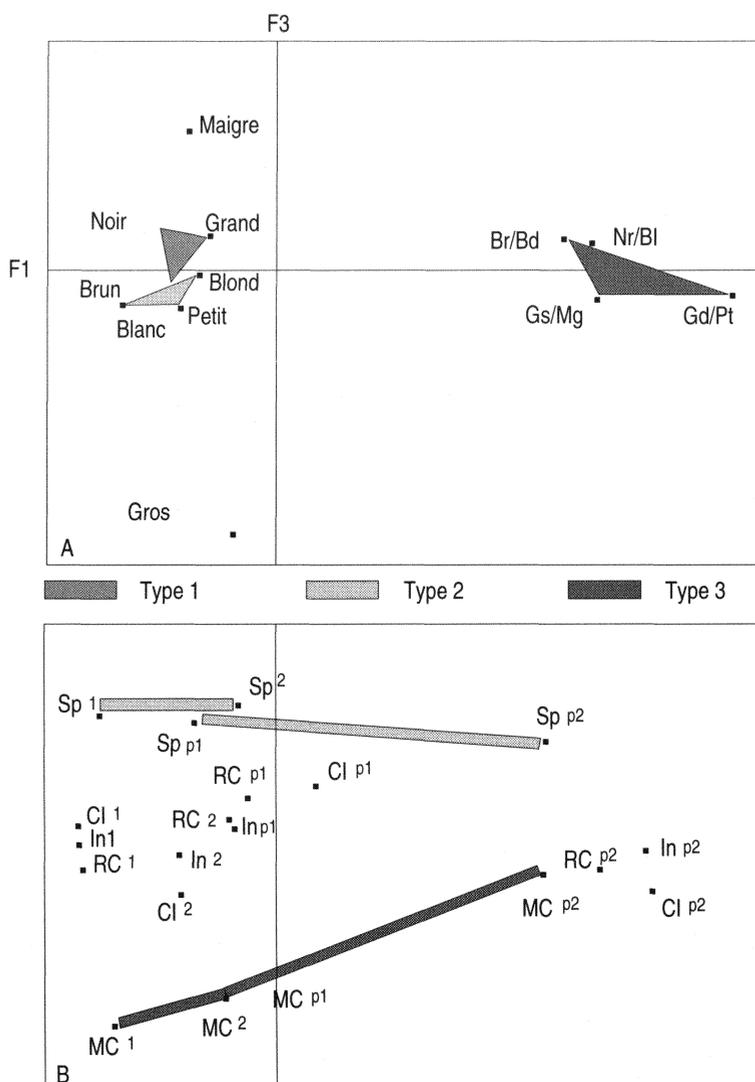


- p1 : Classe NP avant la visite et avant la préparation pédagogique
- p2 : Classe NP après la préparation pédagogique puis la visite
- 1 : Classe N avant la visite (sans préparation pédagogique)
- 2 : Classe N après la visite (sans préparation pédagogique)
- Sp : sportif, Mc : méchant, Rc : riche, Cl : calme, In : intelligent

Figure 4 : AFC réalisée avec les deux classes Non-ZEP, pré-tests et post-tests. Plan factoriel F1-F2.

A : projection sur le plan des points correspondant aux douze jugements possibles des caractères biologiques

B : projection sur le même plan factoriel, des points correspondant aux caractères «socio-culturels» avant (1) et après (2) la visite. Exemple pour lire ce graphe : Cl p1 signifie : jugements sur la caractéristique calme (associée aux caractères biologiques du type 1 sur le graphe A) dans la classe p1 (pré-test avant la visite et avant la préparation pédagogique), et Cl p2 signifie la même chose mais en post-test (après la visite et la préparation pédagogique)



(p) : classes avec préparation pédagogique après le pré-test et avant la visite

Figure 5 : **Même AFC que sur la figure 4. Plan factoriel F1-F3 (mêmes sigles et symboles que pour la figure 4)**

A : projection sur le plan des points correspondant aux douze jugements possibles des caractères biologiques

B : projection sur le même plan factoriel, des points correspondant aux caractères « socio-culturels » avant (1) et après (2) la visite (voir le sens des abréviations en légende de la figure 4)

En pré-test, avant la visite à la Cité des Enfants (points indicés «1» des figures 4 et 5), les caractéristiques «intelligent» et «calme» sont liées, chez les élèves des deux classes, au type 1 («petit, blanc, blond»), tandis que les «sportifs» et les «méchants» sont liés au type 2 («grand, noir, brun») mais s'opposent sur l'axe F3 (figure 5), les «sportifs» étant vers le pôle «maigre» et les «méchants» vers le pôle «gros» de cet axe F3. La caractéristique «riche» est typée, selon les élèves, soit par le type 1 soit par le type 2, et indifféremment par «maigre» ou «gros» ; elle occupe donc une position médiane entre les types 1 et 2 sur la figure 4B.

Après la visite, la classe NP qui a suivi une préparation pédagogique, a fortement évolué : les conceptions des élèves sur chaque caractère socio-culturel sont à présent considérées comme n'étant pas associées à un caractère biologique (type 3). Elles étaient d'ailleurs, en pré-test, déjà plus proches du type 3 que celles de la classe N.

Les conceptions des élèves de la classe N ont également un peu évolué vers le type 3, mais très peu, restant en post-test plus proches des types 1 et 2 que les élèves de la classe NP en pré-test (figure 4).

Les mêmes remarques sont vraies pour l'association entre «méchant» et «gros» (figure 5), la classe N évoluant peu sur l'axe F3, tandis que la classe NP évolue beaucoup vers le «ou-maigre/ou-gros». En revanche, «sportif» et «maigre» restent fortement associés (voir les projections des points Sp sur l'axe F3 dans la figure 5B : elles restent proches de celle du point «maigre» sur la figure 5A).

3.2. Les deux classes ZEP

L'inertie totale dont rend compte l'AFC est de 31,36 % ; elle se répartit ainsi sur les axes :

35,90 % pour l'axe F1	30,50 % pour l'axe F2	28,26 % pour l'axe F3
05,47 % pour l'axe F4	03,13 % pour l'axe F5	02,83 % pour l'axe F6

Les trois premiers axes doivent donc être pris en compte. Nous n'illustrons ici que les projections sur l'axe F1-F2 (66,40 % de la variance ; figure 6), mais nous prenons en compte les trois axes pour nos interprétations.

La figure 6A montre les trois types de caractères biologiques présentés dans le tableau 2 à partir de la figure 4A, tandis que la figure 6B montre que les caractéristiques «intelligent» et «calme» sont ici aussi associées au type 1 («petit, blanc, blond»), «méchant» au type 2 («grand, noir, brun»), le «riche» et le «sportif» étant associés soit au type 1 soit au type 2, ce qui explique leur position médiane entre ces deux types, «sportif» étant cependant plus proche du type 2.

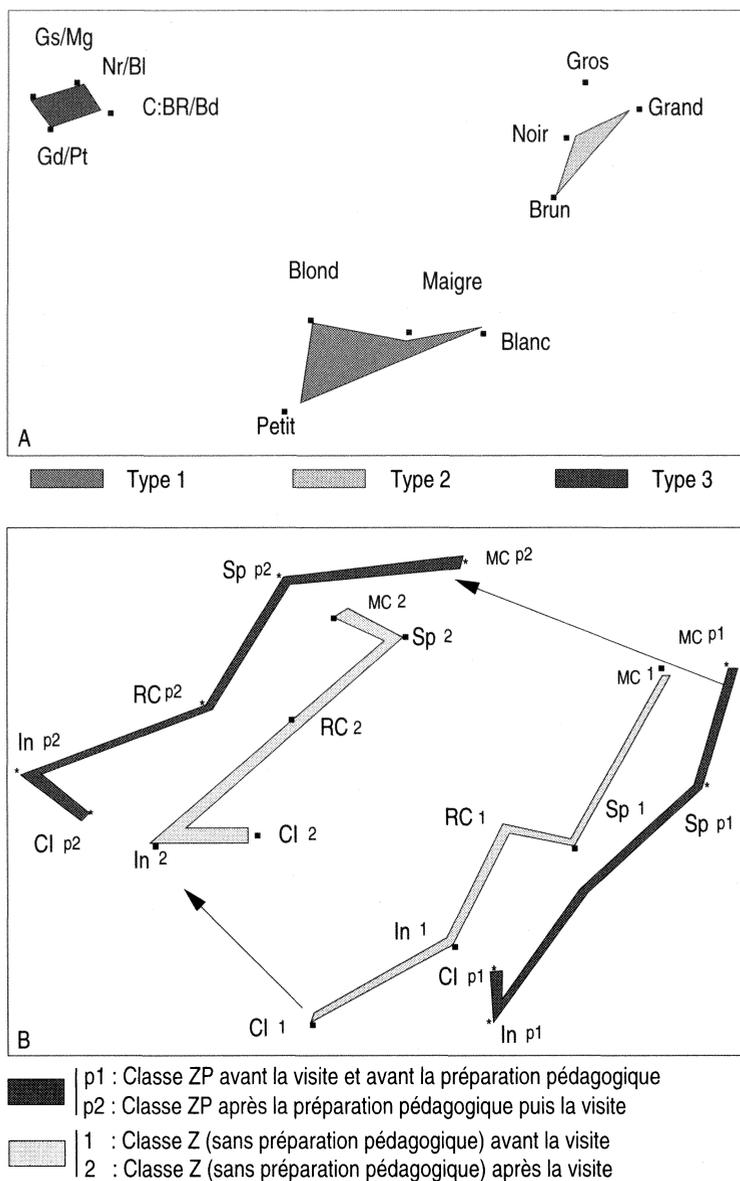


Figure 6 : AFC réalisée avec uniquement les deux classes ZEP, avant et après la visite. Plan factoriel F1-F2.

A : projection sur ce plan des points correspondants aux douze jugements possibles des caractères biologiques

B : projection sur le même plan factoriel, des points correspondant aux caractères «socio-culturels» avant (1) et après (2) la visite (voir le sens des abréviations en légende de la figure 4)

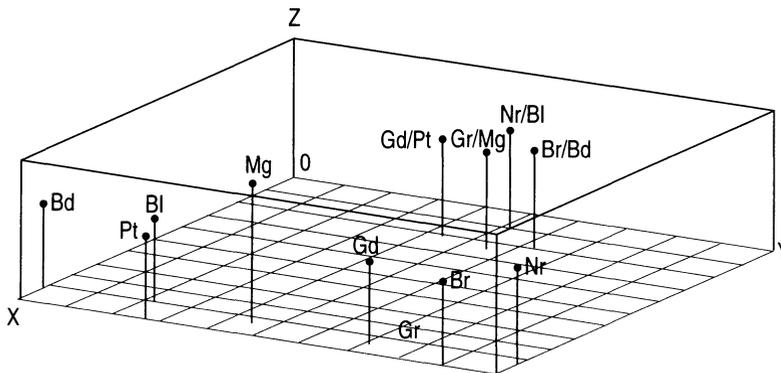
Par ailleurs, l'axe F3 oppose ici aussi les adjectifs «gros» et «maigre», en même temps que «méchant» et «sportif» (le plan F1-F3 n'est pas schématisé ici). Il s'agit donc ici encore de deux autres associations («méchant-gros», et «sportif-maigre»).

3.3. La classe témoin, comparée aux quatre classes (Z, ZP, N et NP)

L'inertie totale dont rend compte l'AFC est de 37,75 % ; elle se répartit ainsi sur les axes :

43,58 % pour l'axe F1	27,55 % pour l'axe F2	16,13 % pour l'axe F3
04,79 % pour l'axe F4	03,23 % pour l'axe F5	02,31 % pour l'axe F6

Les trois premiers axes doivent donc être pris en compte. Nous n'illustrons ici que les projections sur l'axe F1-F2 (71,13 % de la variance ; figure 8). Comme dans les deux AFC précédentes, l'axe F3 oppose les adjectifs «maigre» et «gros» (figure 7) : ils sont ici aussi associés, respectivement, à «sportif» et «méchant».



Gd : grand, **Pt** : petit, **Gs** : gros, **Mg** : maigre, **Nr** : peau noire, **Bl** : peau blanche,
Br : cheveux bruns, **Bd** : cheveux blonds, **Gd/Pt** : ni grand ni petit, **Gs/Mg** : ni gros ni maigre,
Nr/Bl : peau ni noire ni blanche, **Br/Bd** : cheveux ni bruns ni blonds.

Figure 7 : Répartition des caractères biologiques en 3D (axes F1, F2 et F3)

Le plan F1-F2 (figure 8) permet d'abord de retrouver pour l'ensemble des cinq classes étudiées, les mêmes tendances que celles observées dans les deux AFC précédentes (plan A de la figure 8, à superposer aux plans B2 à B5 de la figure 8) :

– les trois types présentés dans le tableau 2, relatifs aux caractères biologiques (plan A) ;

– l'association constante, en pré-test, entre le type 1 et «intelligent» ainsi que «calme»; entre le type 2 et «sportif» ainsi que «méchant» (par ailleurs opposés sur l'axe F3 défini par l'opposition «maigre»-«gros» : figure 7) ; «riche», quant à lui, est associé autant au type 1 qu'au type 2 ;

– après la visite, ces associations évoluent nettement : en post-test les conceptions des élèves sont moins typées, privilégiant plus le «ni-ni» (type 3, à gauche dans le graphe A) dans leurs réponses. Cette évolution est particulièrement nette quand il y a eu une préparation pédagogique préalablement à la visite (graphes B2 et B4) ; la stéréotypie disparaît même dans l'un de ces cas, dans la classe NP où les associations étaient déjà moins typées que dans les autres classes en pré-test (graphe B4). L'évolution peut être plus faible dans une classe Non-ZEP (graphe B5) que dans les deux classes ZEP (graphes B2 et B3). Elle semble en revanche d'autant plus marquée que les conceptions en pré-test étaient moins stéréotypées (graphe B3 comparé au graphe B5 ; graphe B4 comparé au graphe B2).

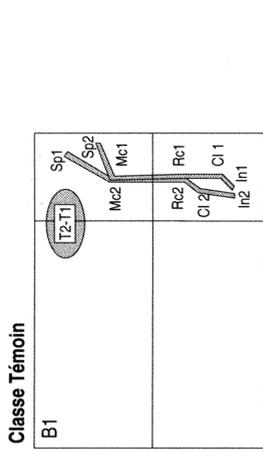
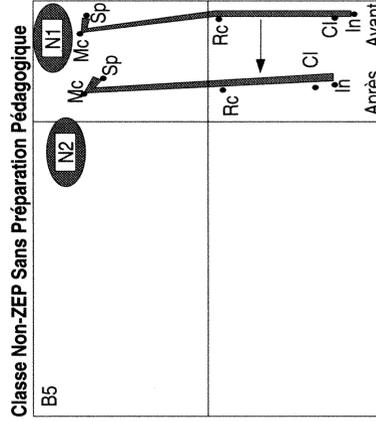
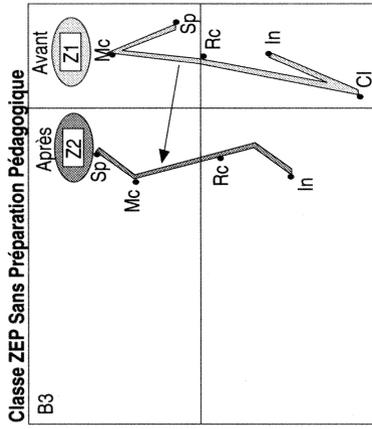
Ce plan F1-F2 montre enfin que les conceptions des élèves de la classe témoin n'ont pas évolué en 24 heures (figure 8 : graphe B1) : les évolutions visibles dans les quatre autres classes (figure 8 : graphes B2 à B5) ne sont donc pas des artefacts liés à la répétition du même jeu de cartes à 24 heures d'intervalle en situation scolaire.

4. DISCUSSION

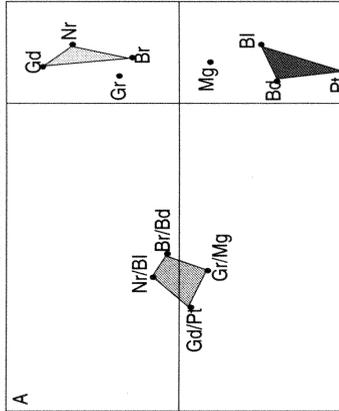
4.1. Représentations sociales et typicalité

Jodelet (1984) définit les représentations sociales comme *«une forme de connaissance spécifique, le savoir de sens commun, dont les contenus manifestent l'opération de processus génératifs et fonctionnels socialement marqués, plus largement il désigne une forme de pensée sociale»*... *«C'est donc à l'interface du psychologique et du social que nous plaçons la notion de représentation sociale. La connaissance du sens commun, la pensée naturelle, par opposition à la pensée scientifique»*. Les associations faites par les élèves entre caractères biologiques et socio-culturels relèvent du sens commun, de la pensée spontanée des élèves lors de la situation de jeu qui leur est proposée.

Le protocole de jeu que nous avons mis en œuvre a une finalité assez proche de celle des psychologues cognitifs pour des recherches sur la catégorisation ou sur la typicalité (Cordier & Denhière, 1990). L'existence



Carte factorielle des associations entre caractères biologiques



A: Carte factorielle des caractères biologiques
 Gd: grand, Pt: petit, Gs: gros, Mg: maigre, Nr: peau noire, BI: peau blanche,
 Br: cheveux bruns, Bd:cheveux blonds, Gd/Pt: ou grand ou petit, Gs/Mg: ou gros ou maigre,
 Ni/BI: peau ou noire ou blanche, Br/Bd: cheveux ou bruns ou blonds.

B: Carte factorielle des caractères socioculturels.
 Sp: Sportif In: intelligent Mc: Méchant Rc: Riche Ci: Calme
 Type 1 Type 2 Type 3
 (1): avant la visite, (2): après la visite, (Z): classes ZEP, (N): classes Non-ZEP
 (P): classes avec préparation pédagogique
 (T): classes témoin sans visite et avec jeu de cartes espacé de 24 h (T1: pré-test T2: post-test)

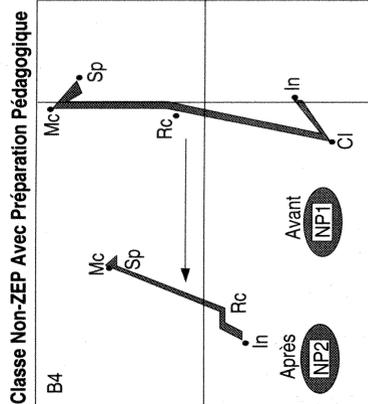
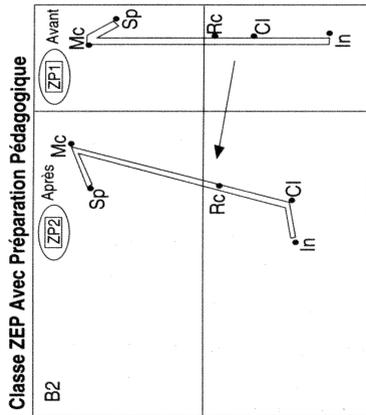


Figure 8 : AFC sur les cinq classes étudiées. Plan F1-F2.

Pour simplifier la lecture de ce plan, nous avons tracé six graphes qui sont à superposer pour comparer les positions respectives des points. Ceux ci correspondent aux projections sur le plan F1-F2 des points correspondant aux 12 lignes du tableau (graphe A) et aux 50 colonnes du même tableau (graphes B1 à B5 : un graphe par classe, avec, chaque fois, 1 = pré-test et 2 = post-test).

de stéréotypes sociaux leur est bien connue, et le premier résultat de notre recherche est d'en avoir retrouvé. Les catégories sur lesquelles nous avons travaillé (riche, sportif, calme, méchant, intelligent) sont, sur un plan scientifique, indépendantes des attributs biologiques avec lesquels les élèves pouvaient les associer. Mais la constance de ces associations effectuées par les élèves suggère que, pour eux, les caractères biologiques proposés peuvent être des attributs, des propriétés typiques des catégories socio-culturelles proposées.

Ce résultat émerge avec une étonnante régularité dans les trois AFC réalisées : à chacune des caractéristiques comportementales/socio-culturelles testées correspond, en pré-test dans chaque classe étudiée, une image d'une personne ayant des caractères biologiques précis. Cette typologie est résumée dans le tableau 3 ci-dessous.

Sportif	Grand, Noir, Cheveux bruns, Maigre
Méchant	Grand, Noir, Cheveux bruns, Gros
Riche	variable, mais plutôt Grand et Blanc
Intelligent	Petit, Blanc, Cheveux blonds
Calme	Petit, Blanc, Cheveux blonds

Tableau 3 : **Propriétés biologiques associées par les enfants à chaque caractéristique socio-culturelle proposée.**

Ces types sont suffisamment constants pour que les cinq caractéristiques socio-culturelles choisies pour cette recherche aient la même situation l'une par rapport à l'autre dans les analyses effectuées aussi bien dans les classes ZEP (figure 6) que dans les classes Non-ZEP (figure 4) et dans la classe témoin (figure 8-B1) : «calme» et «intelligent» vers le type 1 («petit, blanc, blond»), «riche» à mi-chemin entre les types 1 et 2, puis «méchant» et «sportif» vers le type 2 («grand, noir, brun»). Par ailleurs «sportif» et «méchant» se différencient nettement par le fait de leur association respective avec «maigre» et «gros» (axe F3 de la figure 5 et des deux autres AFC effectuées ; figure 7).

Les mêmes associations, se traduisant par le même ordre relatif des cinq caractères socio-culturels sur les plans factoriels des figures 4, 6 et 8, sont encore présentes en post-test, malgré les évolutions que nous allons récapituler dans le paragraphe 4.2.

Ces résultats expriment des «*conceptions conjoncturelles*» d'élèves, dans le sens défini par Clément (1994a) car elles sont toutes inférées à

partir des réponses d'élèves placés dans un seul type de situation (le jeu de cartes utilisé en pré-test comme en post-test). Nous avons cependant complété ce recueil de données par des entretiens, au cours desquels les enfants ont souvent verbalisé des jugements qui recourent les résultats de nos analyses. En témoignent les quelques citations suivantes : «*les héros sont toujours intelligents, beaux, forts, sportifs et riches*» ; «*j'ai comparé le sportif à Michael Jordan*» ; «*c'est toujours les petits qui sont plus intelligents que les grands*» ; «*les noirs y sont méchants... c'est comme les garçons qui sont toujours en bas de chez moi ils embêtent tout le monde*» ; «*c'est les grands qui sont méchants car ils frappent toujours les plus petits*»...

La convergence entre ces entretiens et nos résultats, et la stabilité de ceux-ci montrant dans toutes les classes étudiées les mêmes types d'association, au moins en pré-test, entre caractères socio-culturels et biologiques, nous permettent de constater que les conceptions mises en évidence chez les élèves sont plus que conjoncturelles : elles s'identifient à des «représentations sociales», au sens défini par Moscovici (1961, 1984) et Jodelet (1984, 1989). Ainsi les constats effectués par les enfants, et recueillis lors des entretiens, manifestent-ils, autant qu'ils les confortent, des préjugés culturellement et socialement entretenus, et enracinés dans des courants de pensée et idéologies que nous avons repérés dans l'introduction du présent travail.

4.2. Effet des activités scolaires (visite à la Cité des Enfants et préparation pédagogique)

Le second résultat de cette recherche est le constat que les associations faites par les élèves entre caractères socio-culturels et caractères biologiques peuvent être, malgré leur constance, plus ou moins déstabilisées à la suite d'activités pédagogiques qui portent sur un autre contenu : l'identification de caractères génétiques héréditaires chez l'homme (îlot «Fais ta carte d'identité» de la Cité des Enfants), et la différenciation entre caractères génétiques hérités et caractères socio-culturels acquis (le jeu de filiation proposé après le pré-test dans deux des classes testées).

Les conceptions des élèves évoluent vers des jugements moins stéréotypés (type 3 sur les figures 4, 6 et 8) : ceci est nettement démontré en comparant les quatre classes qui ont effectué cette visite avec la classe témoin qui ne l'a pas effectuée. En effet, seules les conceptions des élèves de cette classe témoin restent inchangées en post-test (fig. 8-B1), en associant autant qu'en pré-test caractères biologiques et socio-culturels.

Ce résultat prouve que l'évolution des conceptions des élèves vers le type 3 non stéréotypé est bien, dans les quatre classes qui ont visité La Villette, une conséquence des activités scolaires incluant la visite à la Cité des Enfants, et non un artefact lié à la répétition du même test à 24 h d'intervalle.

En post-test, les associations initiales entre caractères socioculturels et types biologiques 1 et 2 sont nettement moins prononcées pour les classes qui ont suivi une préparation pédagogique (figures 4, 6, 8-B₂ et 8-B₄) : la préparation pédagogique accentue fortement l'évolution des élèves vers des jugements moins stéréotypés (vers le type 3).

Les effets combinés de la préparation pédagogique et de la visite sont particulièrement nets pour les classes ZEP : les conceptions initiales des élèves étaient beaucoup plus stéréotypées dans la classe qui a suivi une préparation que dans celle qui n'en a pas bénéficié, alors que le résultat inverse est observé en post-test (figure 6).

Dans les classes Non-ZEP, l'effet de la préparation pédagogique est également très important : avant la préparation pédagogique, les réponses des élèves étaient déjà beaucoup moins stéréotypées que celles de la classe sans préparation ; en post-test, les conceptions de ces élèves sont les moins stéréotypées de toutes celles que nous avons obtenues (figures 4 et 8-B4). Pour les critères d'évaluation choisis, cette classe est celle qui a, et de loin, le plus bénéficié de la visite conjuguée à une préparation pédagogique.

Au cours d'une autre recherche (Clément et al., 1995), menée en parallèle avec celle que nous venons de présenter, nous avons montré que la seule visite de l'îlot «Fais ta carte d'identité» ne modifiait pas les conceptions d'enfants de dix ans venus à la Cité des Enfants en week-end, généralement dans un contexte familial. L'effet des visites que nous avons mis en évidence n'est donc pas le seul résultat de la visite de cet îlot : le contexte scolaire de la visite en groupe de classe, renforcé peut-être par le pré-test réalisé en classe la veille de la visite, joue donc un rôle important dans l'évolution des représentations sociales initiales des élèves.

Malgré un grand nombre de recherches en didactique de la biologie sur les conceptions des élèves (Giordan et Martinand, en 1988, avaient déjà recensé plus de deux cents publications sur ce sujet), peu de travaux ont jusqu'ici porté sur l'impact de situations pédagogiques précises provoquant une évolution de ces conceptions. Vuala (1991) et Paccaud (1991, 1994) font partie de ces rares auteurs qui ont étudié les conceptions d'élèves avant et après une action pédagogique (sur le thème de la respiration et de la circulation) et qui ont montré des évolutions très significatives de ces conceptions. Des recherches de didactique de la biologie relatives aux

conceptions d'élèves de dix ans sur des concepts de génétique manquaient jusqu'à présent.

Le type de méthode que nous avons utilisé a surtout été développé en psychologie cognitive, pour aborder des questions sur la typicalité et sur les catégorisations à partir d'exemples souvent empruntés à la biologie (Rosch, 1973 ; Cordier & Dubois, 1981 ; Cordier & Denhière, 1990). La même démarche sur des notions courantes d'hérédité ou de génétique n'a pas, à notre connaissance, été mise en œuvre jusqu'à présent. De plus, l'ensemble de ces recherches cognitives est jusqu'ici resté descriptif, ne se donnant pas les moyens d'étudier les conditions d'évolution de ces conceptions (associations typiques, catégories...).

Les résultats que nous avons présentés montrent que les conceptions d'élèves peuvent évoluer significativement à la suite d'actions pédagogiques articulant l'éducation formelle (contexte scolaire) et l'éducation non formelle (visite d'un centre scientifique pour enfants).

4.3. Comparaison entre les classes ZEP et les classes Non-ZEP : effet de l'état initial des conceptions des élèves

La figure 8, qui synthétise nos résultats, fait apparaître que l'état initial des conceptions des élèves (en pré-test) ne varie pas selon que la classe est ZEP ou Non-ZEP. Certes, c'est dans une classe Non-ZEP que les conceptions initiales sont les moins stéréotypées par rapport aux quatre autres classes de notre échantillon (graphe B4 de la figure 8) ; mais c'est aussi dans une autre classe Non-ZEP que les conceptions initiales sont les plus stéréotypées (graphe B5). Qui plus est, l'évolution de ces conceptions vers moins de stéréotypie, à la suite de la visite à la Cité des Enfants, si elle existe dans les quatre classes étudiées (elle n'existe pas que dans la classe témoin qui n'a pas fait la visite : graphe B1), ne semble pas non plus varier avec le statut ZEP ou Non-ZEP des classes. Ainsi, pour les deux classes sans préparation pédagogique (graphes B3 et B5), c'est la classe ZEP qui évolue le plus (graphe B3) ; alors que pour les deux classes avec préparation pédagogique (graphes B2 et B4), c'est la classe Non-ZEP (graphe B4).

En revanche, dans ces deux dernières comparaisons (B3 et B5 ; B2 et B4), il apparaît que les classes où les stéréotypes sont initialement les plus forts sont celles qui évoluent le moins (graphes B2 et B5), alors que les classes où les stéréotypes initiaux sont les moins marqués sont celles où on constate la plus nette évolution vers moins de stéréotypie (graphes B4 et B3).

Certes le nombre de classes sur lequel nous avons travaillé reste trop faible pour permettre des conclusions sur une éventuelle absence de différence entre classes ZEP et Non-ZEP, au-delà des quatre classes étudiées. Mais ils sont suffisants pour suggérer que plus les stéréotypes initiaux sont fortes, moins les actions pédagogiques étudiées (visite seule, visite couplée à une préparation pédagogique) sont efficaces. Rappelons que la visite seule en groupe scolaire provoque toujours une évolution, mais que celle-ci est nettement plus importante quand la visite est couplée à une préparation pédagogique.

Au total, ces résultats nous permettent de conclure qu'une exposition scientifique peut avoir un effet éducatif, en déstabilisant notamment des représentations sociales initiales d'élèves, à condition de l'organiser dans un contexte scolaire, et de la valoriser par une préparation scolaire. Nombre d'enseignants ont déjà une telle intuition, et mettent en œuvre des stratégies souvent innovantes d'accompagnement scolaire de visites d'expositions scientifiques. Mais rares étaient jusqu'à présent les recherches qui avaient fondé une telle intuition.

Remerciements

Cette recherche a été possible grâce à la Convention n°930934 DJF00 entre l'Université Claude Bernard - Lyon 1 et la Cité des Enfants - Cité des Sciences et de l'Industrie, La Villette, Paris (contrat sous la responsabilité scientifique de P. Clément). Nous remercions vivement Jack Guichard qui a régulièrement suivi ce travail en nous faisant profiter de son expérience et de ses conseils précieux, ainsi que Valérie Ott et Pierre Arthus qui ont travaillé avec nous dans le cadre du même contrat, et toute l'équipe de la Cité des Enfants qui nous a toujours réservé un bon accueil et nous a maintes fois aidés.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLARD M. & BOUCHER S. (1991). *Le Musée et l'École*. Québec, Hurtubise HMH Ltée.
- BENZÉCRI J.-P. (1973). *L'analyse des correspondances*. Paris, Dunod / Bordas.
- BORNANCIN B., PUIG G. & BALLAREL Y. (1982). *Guide pédagogique de biologie cycle moyen, nouvelles instructions*. Paris, Nathan, pp. 181-183.
- BOY D. & MICHELAT G. (1986). Croyance aux parasciences : dimensions sociales et culturelles. *Revue Française de Sociologie*, n° 27, pp. 175-204.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1995). *Programme de l'école primaire*, n° 5 du 9 Mars 1995. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.

- CHEssel D. & DODÉLEC S. (1989). *ADE Software Multivariate Analyses and Graphical Display for Environmental Data, logiciel ADE, version 3.6* (version réactualisée 1993). Lyon, URA CNRS 1451, Université Claude Bernard-Lyon 1.
- CITÉDOC (1993). *Tous semblables tous différents*. Paris, CSI-la Villette, n°18.
- CLÉMENT P., BLAES N. & LUCIANI A. (1980). Le mythe tenace du chromosome du crime. *Raison présente*, n° 54, pp. 109-127.
- CLÉMENT P., BLAES N., BLAINEAU S., DEBARD E., JOURDAN F. & LUCIANI A. (1981). *Biologie et Société. Le matin des biologistes ? Raison Présente*, n° 57.
- CLÉMENT P., NDIAYE V. & ROUBY C. (1988). Comment des chercheurs en éthologie se représentent-ils et hiérarchisent-ils des disciplines scientifiques ? In A. Gallo & F. Oge (Eds), *Homme, Animal, Société ; I - Biologie et animal*. Toulouse, Presse de l'IEP, pp. 265-297.
- CLÉMENT P., DEBARD É. & BOYRIVENT A. (1992). De la place de la didactique en muséologie des sciences et des techniques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Eds), *Actes des XIV^{es} Journées internationales sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et techniques*. Paris, Université Paris 7, UF de Didactique des disciplines, pp. 387-392.
- CLÉMENT P. (1993). La spécificité de la muséologie des sciences, et l'articulation nécessaire des recherches en muséologie et en didactique des sciences, notamment sur les publics et leurs représentations/conceptions. In REMUS, *La muséologie des sciences et des techniques*. Dijon, OCIM, pp.128-165.
- CLÉMENT P. (1994a). Représentations, conceptions et connaissances. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément (Eds), *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang, pp. 15-45.
- CLÉMENT P. (1994b). Critique de la morphopsychologie. In *Nimbus*, Émission scientifique de FR3, 26 mai 1994.
- CLÉMENT P., ABROUGUI M. & OTT V. (1995). *Rapport de recherche UCBL/Cité des Enfants*. Paris, Cité des Sciences et de l'Industrie, la Villette.
- CORDIER F. & DUBOIS D. (1981). Typicalité et représentation cognitive. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, n° 3, pp. 299-333.
- CORDIER F. & DENHIÈRE G. (1990). Les connaissances concernant les catégories naturelles. In J.-F. Richard, C. Bonnet & R. Ghiglione (Eds), *Traité de psychologie cognitive, Tome 2*. Paris, Dunod, pp 41-46.
- CORMAN L. (1932). *Visages et Caractères*. Paris, Plon.
- CORMAN L. (1983). *Caractéologie et morphopsychologie*. Paris, PUF.
- DOISE W. (1990). Les représentations sociales. In R. Ghiglione, C. Bonnet & J.-F. Richard (Eds), *Traité de psychologie cognitive, Tome 3*. Paris, Dunod, pp. 111-174.
- GIORDAN A. & DE VECCHI G. (1987). *Les origines du savoir, des conceptions des apprenants aux conceptions scientifiques*. Neuchâtel, Delachaux-Niestlé.
- GIORDAN A. & GUICHARD J. (1993). Le corps humain en spectacle. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Eds), *Actes des XV^{es} Journées internationales sur la communication, l'éducation et la culture scientifiques et techniques*. Paris, Université Paris 7, UF de Didactique des disciplines, pp. 355-362.
- GIORDAN A. & MARTINAND J.-L. (1988). État des recherches sur les conceptions des apprenants à propos de la biologie. *Annales de Didactique des Sciences*, n° 2, pp. 11-63.
- GIORDAN A., GIRAULT Y. & CLÉMENT P. (1994). *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang.
- GOTTESDIENER H. (1987). *Évaluer l'exposition : définitions, méthodes et bibliographie sélective commentée d'études d'évaluation*. Paris, La Documentation Française.

- GOULD S.J. (1983). *La Mal-mesure de l'homme*. Paris, Ramsay.
- GUICHARD J. (1989). Démarche pédagogique et autonomie de l'enfant dans l'exposition scientifique. *Aster*, n° 9, pp.17-42.
- GUICHARD J. (1990). *Diagnostic didactique pour la production d'un objet muséologique*. Thèse, Université de Genève, Faculté de Psychologie et des Sciences de l'Éducation.
- GUICHARD J. (1992). La Cité des Enfants de la Villette. Comment prendre en compte les jeunes visiteurs ? *Lettre de l'OCIM*, n° 23, pp. 17-23.
- GUICHARD J. (1994). Diagnostic didactique pour faire évoluer les conceptions des enfants en dehors du cadre scolaire. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément (Eds), *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang, pp. 93-106.
- GUICHARD J. (1995). Designing tools to develop the conceptions of learners. *International Journal of Science Education*, n° 17, pp. 713-723.
- JACQUARD A. (1978). *Éloge de la différence. La génétique et les hommes*. Paris, Le Seuil.
- JODELET D. (1984). Les représentations sociales : phénomènes, concept et théorie. In S. Moscovici (Ed.), *Psychologie sociale*. Paris, PUF, pp. 357-378.
- JODELET D. (1989). *Les représentations sociales*. Paris, PUF.
- JOURDAN F. (1981). La neurobiologie et ses auteurs ; fantasmes, pouvoirs et principes de réalité. *Raison Présente*, n° 57, pp. 33-55.
- LEFEBVRE B. (1994). *L'éducation et les musées. Visiter, explorer et apprendre*. Montréal, Les Éditions Logiques.
- LE NY J.-F. (1985). Comment (se) représenter les représentations. *Psychologie Française*, n° 30, pp. 231-238.
- MADLENER E. (1993). L'exploration physiognomique de l'âme. In *L'âme au corps. Arts et sciences 1793-1993*. Paris, Réunion des musées nationaux, Gallimard, Électra, pp. 224-237.
- MILES R.S. (1985). Museum audiences. *The International Journal of Museum Management and Curatorship*, n° 5, pp. 73-80.
- MILES R.S. (1988). Museums and public culture : a context for communicating science. In P.G. Heltne & L. Marquardt (Eds), *Science learning in the informal setting*. Chicago, Chicago Academy of Science.
- MOSCOVICI S. (1961). *La psychanalyse, son image et son public*. Paris, PUF.
- MOSCOVICI S. (1984). *Psychologie sociale*. Paris, PUF.
- OKAPI (1987). *Dossier : Pourquoi ressemblons nous à nos parents ?*, *Okapi* n° 363. Paris, Bayard Presse.
- OKAPI (1993). *Dossier : À qui ressemblons nous ?*, *Okapi* n° 508. Paris, Bayard Presse.
- PACCAUD M. (1991). Les conceptions comme levier d'apprentissage du concept de respiration. *Aster*, n° 13, pp. 35-58.
- PACCAUD M. (1994). Utilisation des conceptions d'élèves âgés de 15 à 17 ans sur le cœur et la circulation du sang. In A. Giordan, Y. Girault & P. Clément (Eds), *Conceptions et connaissances*. Berne, Peter Lang, pp. 171-183.
- POGLIANO C. (1993). Entre forme et fonction : une nouvelle science de l'homme. In *L'âme au corps. Arts et sciences, 1793-1993*. Paris, Réunion des musées nationaux, Gallimard, Électra, pp. 238-265.
- ROSCH E. (1973). Natural categories. *Cognitive Psychology*, n° 4, pp. 328-350.
- RUMELHARD G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne, Peter Lang.

- SAMSOND. & SCHIELEB. (1989). *L'évaluation muséale : publics et expositions. Bibliographie raisonnée*. Paris, Expo-Média.
- SCREVEN C.G. (1976). Exhibit Evaluation : a goal-referenced approach. *Curator*, n° 19, pp. 271-290.
- SCREVEN C.G. (1984). Educational evaluation and research in museums and public exhibits : a bibliography. *Curator*, n° 27, pp.147-165.
- SHETTEL H. (1968). An evaluation of existing criteria for judging the quality of science exhibits. *Curator*, n° 11, pp.137-153.
- SHETTEL H. (1973). Exhibits : Art form or educational medium ? *Museum News*, n° 52, pp. 32-41.
- STEWART J. (1993). Au-delà de l'inné et de l'acquis. *Intellectica*, n° 16 (Biologie et cognition), pp. 151-174. Paris, CNRS.
- STRASSER P. (1993). Cesare Lombroso : l'homme délinquant ou la bête sauvage au naturel. In *L'âme au corps. Arts et science, 1793-1993*. Paris, Réunion des musées nationaux, Gallimard, Électra, pp. 352-359.
- VUALA J. (1991). Le rôle d'un dessin animé dans l'évolution des conceptions d'élèves sur la respiration. *Aster*, n° 13, pp. 7-34.

Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur

Françoise CHAUVET

Université Paris 7 – Denis Diderot
Laboratoire de Didactique de la Physique
dans l'Enseignement Supérieur
Tour 24 - 2 place Jussieu
75251 Paris cedex 05, case 7021, France.

Résumé

Cet article décrit la démarche de construction d'un outil d'évaluation des conceptions et des modes de raisonnement d'étudiants sur le thème de la couleur. L'étude préalable des idées communes et l'observation des réactions des étudiants au cours de l'expérimentation d'une séquence d'enseignement a permis de dégager un nombre limité d'indicateurs (couples «question/élément de réponse») relatifs à la compréhension des aspects multiples de la couleur (physiques, techniques, perceptifs).

Pour donner une vision plus globale de l'état des connaissances et des outils conceptuels disponibles, les couples ont été regroupés en familles caractéristiques d'un type de compréhension. La répartition des taux d'occurrence des couples dans une population donnée signe le «profil conceptuel» de ce groupe.

Mots clés : *raisonnement commun, séquence d'enseignement, évaluation, optique, couleur.*

Abstract

This article describes how a specific tool has been built in order to evaluate students' conceptions and ways of reasoning about colour. After a preliminary inquiry about common ideas and students' reactions during a teaching sequence, it has been possible to find out a limited number of indicators (couples «question / element of answer») which are relevant to understanding the multiple aspects of colour (physical, technical and perceptual aspects).

In order to give a more organised view of the state of knowledge and available conceptual tools, couples have been grouped together in «families» that present a relative homogeneity about a type of understanding. Thus a histogram of these couples in a given sample gives a «conceptual profile» of this group.

Key words : *common reasoning, teaching sequence, evaluation, optics, colour.*

Resumen

Este artículo describe el procedimiento de construcción de un instrumento de evaluación de las concepciones y de los modos de razonamientos de los estudiantes sobre el tema del color. El estudio previo de las ideas comunes y la observación de las reacciones de los estudiantes en el curso de la experimentación de una secuencia de enseñanza, permitió despejar un número limitado de indicadores (parejas «pregunta/elemento de respuesta») relativos a la comprensión de los aspectos múltiples del color (físicos, técnicos, perceptivos).

Para dar una visión más global del estado de los conocimientos y de las herramientas conceptuales disponibles, las parejas fueron reagrupadas en familias características de un tipo de comprensión. La repartición de las tasas de ocurrencia de las parejas en una población dada marca el perfil conceptual de este grupo.

Palabras claves : *razonamiento común, secuencia de enseñanza, evaluación, óptica, color.*

1. INTRODUCTION

Quels instruments construire pour évaluer l'état des connaissances dans un domaine donné ? Comment apprécier le degré d'évolution des conceptions des élèves après un apprentissage et, par là, évaluer l'impact d'une séquence d'enseignement ? Ce sont les questions qui se posent après toute intervention. La recherche décrite ici propose un outil spécifique pour l'évaluation des conceptions et des modes de raisonnement d'étudiants après un enseignement scientifique sur le thème de la couleur. Les étudiants concernés, titulaires du baccalauréat, préparent le brevet de technicien supérieur d'arts appliqués.

De manière générale, les objectifs de l'enseignement scientifique dans les sections de techniciens supérieurs consistent « à développer chez les étudiants la compréhension et la connaissance des phénomènes et des lois physiques mis en œuvre dans le domaine professionnel » (BOEN, 1985). Le programme d'optique comporte une partie identique à celle de l'enseignement secondaire (avant que celui-ci n'ait été modifié à partir de 1990) à laquelle s'ajoutent des chapitres techniques, des notions de colorimétrie notamment, orientées vers les applications artistiques. Les liens entre les différentes rubriques sont laissés à l'initiative de l'enseignant : « le professeur [...] cherchera des exemples et applications en liaison avec les enseignements technologiques ». Dans ce cadre d'enseignement, où il faut concilier mise en cohérence conceptuelle et ouverture sur les techniques, le thème de la couleur, que nous avons choisi pour aborder l'optique, apparaît comme un thème transversal qui permet de donner une cohérence à un ensemble de notions diverses et de les articuler avec le contexte culturel et technique des étudiants.

Outre le choix du thème, la deuxième prise de position, qui sous-tend ce travail au plan pédagogique, est de se placer dans une perspective constructiviste au sens large du terme (Driver, 1993). Ceci implique de donner toute leur place aux activités de l'élève, qu'elles soient expérimentales, d'analyse ou de raisonnement. C'est bien sûr une condition minimale pour susciter la motivation des étudiants, mais au-delà, c'est une nécessité pour que les étudiants puissent négocier leur acquis avec leurs idées initiales, et pour que l'enseignant ait accès à celles-ci. Ce dernier point est lui-même décisif à la fois pour l'élaboration d'une séquence aussi adaptée que possible à son public et pour l'évaluation de celle-ci. Ainsi, une enquête préalable, dont nous exposerons les principaux résultats, a orienté le choix des situations didactiques qui structurent la séquence comme le choix de l'ordre d'introduction des concepts et de leur mise en cohérence. Mais c'est grâce à l'expérimentation en situation de classe que la construction de l'outil d'évaluation a pu se faire. En effet, c'est par l'observation précise des réactions des étudiants lors des différentes activités, que nous avons pu spécifier les indicateurs de raisonnement qui nous paraissent les plus pertinents pour l'évaluation. Nous nous attacherons à illustrer cette démarche. Nous montrerons comment nous avons géré la nécessaire multiplicité de ces indicateurs, pour obtenir un outil d'évaluation à la fois multidimensionnel, du point de vue des éléments conceptuels en cause, et maniable, compte tenu des contraintes habituelles de l'enseignement. Les résultats obtenus avec des groupes ayant participé à l'expérimentation et d'autres groupes (témoins) illustreront, en fin d'article, l'apport d'information **qualitative** que génère l'ensemble des résultats **quantitatifs** associés à cet outil d'évaluation.

2. ENQUÊTES PRÉLIMINAIRES ET CHOIX POUR LA SÉQUENCE

2.1. Un point de vue intégré sur la couleur

Quelques repères historiques peuvent aider à situer le contenu conceptuel. En effet, les connaissances sur la couleur se sont élaborées à la croisée de plusieurs domaines scientifiques. En physique, après les expériences de décomposition et de recombinaison de la lumière blanche à partir de ses différentes composantes colorées (Newton, 1704), ce sont les questions posées par la nature de la lumière qui ont intéressé principalement les physiciens au cours du XVIII^e siècle. La théorie ondulatoire a permis de caractériser une radiation monochromatique par une grandeur mesurable, la longueur d'onde λ . Chaque radiation du domaine visible, caractérisée en physique par une longueur d'onde, produit sur l'observateur une sensation donnée de **couleur associée à la longueur d'onde** de la radiation. La connaissance du spectre d'une substance dans le visible, en absorption ou en émission, est une caractéristique intrinsèque de cette substance et permet d'avoir une information globale sur sa couleur. Cependant l'analyse spectrale à elle seule ne permet pas de faire des prévisions sur bon nombre de phénomènes de couleur. En effet, quel physicien peut prévoir par exemple, sans faire intervenir la réponse du système visuel, qu'on voit du jaune sur un écran blanc, là où sont superposés un faisceau laser rouge et un faisceau laser vert ?

Des ponts ont été établis entre physique, physiologie de l'œil et effets perceptifs, au cours du XIX^e siècle. Ceci a permis le développement, en parallèle avec la spectroscopie, d'un nouveau domaine de connaissances, la colorimétrie, dont l'objectif est de caractériser la couleur autrement que par le spectre de la lumière. La colorimétrie repose sur l'hypothèse de Young-Helmholtz concernant l'existence de trois types de récepteurs de la rétine (les cônes) et sur les mesures de Maxwell qui ont contribué à quantifier un résultat expérimental, appelé le fait trichrome : presque toutes les couleurs peuvent être reproduites par un mélange de trois lumières seulement. Ces trois lumières sont classiquement un rouge, un vert et un bleu très saturés et constituent les couleurs «primaires» de la **synthèse additive**, l'un des procédés de production de couleurs. Lorsque les couleurs sont produites par le mélange ou la superposition de substances, lesquelles absorbent sur un tiers environ de la bande spectrale du visible, on parle de procédés de **synthèse soustractive**. Les couleurs «primaires» par ce procédé, sont alors jaune (bandes spectrales rouge et verte diffusées), cyan (bleue et verte) et magenta (rouge et bleue). Cette rationalité technique liant physique et vision humaine fonde actuellement la production industrielle

d'objets colorés (imprimerie, textile, peintures utilisent les procédés soustractifs) comme celle des images électroniques (télévision, vidéo, images de synthèse utilisent les procédés additifs).

Par ailleurs, d'autres faits expérimentaux, connus depuis longtemps des artistes, illustrent la complexité de la relation entre stimulus physique et mécanismes de la vision. Ils n'ont reçu que récemment une explication avec l'étude des interactions entre les différentes couches de cellules nerveuses de la rétine (Buser & Imbert, 1987). Ces phénomènes perceptifs, non explicables par des lois physiques et appelés phénomènes de «contraste simultané», sont facilement observables : la couleur perçue d'une plage dépend non seulement de la composition de la lumière venant de cette plage, mais également de celle des plages environnantes.

Ainsi, en se limitant aux données scientifiques et en excluant toute considération culturelle ou symbolique sur la couleur, la compréhension des phénomènes de couleur nécessite d'**intégrer** au minimum des éléments de connaissances provenant des différents domaines que sont la physique, la physiologie de la vision et la psychologie de la perception visuelle (Lindsay & Norman, 1980). La couleur n'est donc pas un concept isolé de la physique. On doit la situer dans un contexte plus large où la part dévolue à l'observateur est aussi importante que celle donnée à la physique. La couleur est considérée, dans cette étude, comme une **réponse perceptive à de la lumière reçue** : l'accent est mis ainsi sur la relation entre la couleur perçue par l'observateur et la distribution spectrale d'énergie de la lumière reçue. C'est donc un domaine conceptuel complexe où les connaissances n'ont pu que récemment être mises en cohérence. Alors que les applications pratiques de la couleur se multiplient, le contenu de l'enseignement scientifique traditionnel se révèle inadapté pour en acquérir la maîtrise.

2.2. Les idées des étudiants

Une enquête préalable a été menée, auprès d'étudiants auxquels est destinée la séquence, au moyen d'un questionnaire papier-crayon (N = 60) et d'une dizaine d'entretiens semi-directifs par petits groupes devant montage expérimental. Cette enquête, dont nous ne pouvons ici que rappeler à grands traits les résultats, a révélé un ensemble de difficultés des étudiants. Pour ce public spécifique, les éléments susceptibles d'avoir contribué à ces difficultés sont probablement de deux types : acquis de l'enseignement scientifique préalable d'une part, et connaissances de la vie quotidienne renforcées par la pratique de la peinture, d'autre part.

Ainsi, de nombreuses réponses données par les étudiants sont compatibles avec l'idée d'une association biunivoque entre couleur et

longueur d'onde. À propos de la question portant sur l'arc-en-ciel (*Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?*), de nombreux étudiants évoquent les radiations infrarouges et ultraviolettes comme des «*couleurs invisibles*», une formulation qui exclut le rôle de l'œil dans la constitution du concept de couleur, au profit de la longueur d'onde. Nul doute qu'il s'agisse là de traces laissées par l'enseignement de la physique. Le thème de l'arc-en-ciel y est quasiment toujours lié à l'introduction de la couleur. Et dans les manuels de l'enseignement secondaire qui ont pu servir d'outils aux étudiants, on parle volontiers de la «*couleur d'une radiation monochromatique*» ou de la «*couleur intrinsèque de la lumière*», en privilégiant par ces images les couleurs produites par des distributions spectrales assimilables à une valeur de longueur d'onde, les autres n'étant pas de «*vraies*» couleurs. Ajoutons que les mécanismes de la vision ne sont pas objet d'enseignement et qu'une distinction claire entre la lumière reçue (le stimulus physique) et la perception qui en résulte n'est pas toujours faite. Cette assimilation de la couleur aux seules propriétés de la lumière, point de vue restrictif de «*physicien*», laisse les étudiants sans outil d'analyse pour la plupart des situations techniques de création de couleurs, puisque les couleurs y sont créées par des bandes spectrales larges.

Dans un autre registre de difficultés, on a pu constater que, pour analyser les situations expérimentales mettant en jeu la lumière colorée (pour l'éclairage d'un écran blanc par exemple), les étudiants éprouvent les mêmes difficultés à propos de la diffusion que celles repérées par les chercheurs avec des publics plus jeunes (Tiberghien, 1983 ; Guesne, 1984). Les étudiants se réfèrent aux techniques de synthèse soustractive dont ils connaissent les résultats par leur pratique de la peinture : les termes de couleur y prennent le sens de matière colorée. Le fait de considérer la couleur comme un objet matériel constitue un autre obstacle à la compréhension, allant jusqu'à bloquer l'observation. C'est ce dont témoigne ce dialogue entre deux étudiants, placés dans une salle noire, devant un objet blanc éclairé simultanément avec de la lumière rouge et de la lumière verte, objet où s'observe un jaune vif :

Qu'est-ce que vous voyez ?

*Alain : Ça tend vers l'ocre... c'est pas ocre mais ça tend vers le marron. Dans les mélanges picturaux, **en principe**, le rouge et le vert mélangés deviennent généralement une couleur marron.*

*Élodie : En pratique... **Moi je vois du jaune.***

*Alain : Un jaune ?... du dessus, on ne voit pas du jaune, **je vois du marron**, y'a peut-être un problème ?... le problème, c'est qu'il y a deux couleurs superposées...*

Élodie : Mets-toi en face.

Alain : Du dessus je ne vois pas du jaune, de face... je vois du jaune. (Entretien n° 4, Élodie / Alain)

Bon nombre d'étudiants ont ainsi beaucoup de difficultés dans une analyse physique des situations de couleur. Ils se réfèrent plus volontiers à des règles mémorisées, adhérentes à la situation d'apprentissage. Le caractère local de leurs connaissances sur la couleur les rend incapables de transfert d'une technique à une autre, de l'addition de lumières à celle du mélange de matières par exemple. Ils ne disposent pas d'outils opérationnels pour une analyse des situations complexes auxquelles ils sont confrontés dans leur formation professionnelle.

2.3. La séquence

C'est pourquoi nous avons créé une séquence d'enseignement, décrite en détail par ailleurs (Chauvet, 1993, 1994). D'une durée d'une quinzaine d'heures, elle a été expérimentée dans les contraintes normales de la classe avec différents groupes d'étudiants (N = 200 étudiants environ sur deux ans) par le chercheur et par un autre enseignant. Nous ne rappellerons ici que les grandes lignes de cette séquence. Son but est de faire en sorte que les étudiants s'approprient un modèle simple de la couleur qui intègre des éléments de connaissances relatifs à la physique, aux techniques ainsi qu'aux mécanismes de la vision et de la perception.

Pour que les connaissances puissent être mises en œuvre dans des raisonnements à propos des situations les plus courantes, on insiste sur la mise en relation et sur la cohérence des différents éléments provenant des trois domaines cités. La clef de voûte de cette cohérence conceptuelle est l'idée de «chaîne» de transformation de l'information visuelle véhiculée par la lumière depuis la source jusqu'à l'œil, *via* une éventuelle interaction avec la matière. À cette chaîne de phénomènes correspond une chaîne d'analyse, outil de raisonnement proposé aux étudiants pour prendre en compte l'ensemble des paramètres. À chaque maillon de cette chaîne, se posent les questions relatives à la composition de la lumière, à l'interaction de la lumière et de la matière, à la lumière diffusée ou transmise par la matière et à la réponse du système visuel.

L'ordre d'introduction des concepts, en jouant d'abord sur une déstabilisation, vise à susciter un questionnement des étudiants et à leur permettre d'intégrer leurs connaissances dans un ensemble plus cohérent. Les étudiants travaillent d'abord à dissocier couleur et matière. Pour cela, la séquence commence non pas par une analyse spectrale fine, mais par l'étude de l'addition de lumières colorées (rouge, verte et bleue). Le

découpage en trois bandes du spectre de la lumière blanche est d'ailleurs justifié par les techniques additives de création de couleurs. L'accent est mis d'emblée sur le rôle joué par la lumière qui atteint l'œil et qui transporte dans tous les cas l'information sur la couleur.

Prendre en compte l'absorption sélective de lumière par la matière et donner du sens au terme «synthèse soustractive» qui qualifie les techniques utilisant les mélanges de matières est aussi une difficulté pour les étudiants. Ce n'est qu'après un travail progressif sur la soustraction d'une ou plusieurs lumières colorées arrêtées par un obstacle, où sont mises en relation la composition simplifiée de la lumière et la couleur perçue, que les résultats connus des mélanges de peinture sont interprétés en termes d'absorption.

Le statut des activités expérimentales est celui d'une observation guidée. Comme dans d'autres propositions de séquence en optique (Kaminski, 1991), les activités sont construites autour d'un jeu de questions portant sur des prévisions à propos de phénomènes que les quelques lois physiques déjà introduites suffisent à analyser et dont l'étudiant pourra vérifier lui-même la validité et la cohérence. Ainsi, le dispositif pédagogique met l'accent sur la cohérence d'un minimum de concepts qui se révèlent suffisants pour permettre la maîtrise de questions de synthèse plus complexes, notamment l'influence de la lumière sur la couleur des corps. Par ailleurs, la séquence permet une observation fine des étudiants et donne des indications pour caractériser, à un instant donné, les outils conceptuels dont disposent les étudiants et en évaluer la disponibilité dans divers domaines techniques.

3. CONSTRUCTION DE L'INSTRUMENT D'ÉVALUATION

3.1. Principes généraux

Pour évaluer l'«état» conceptuel des étudiants après l'enseignement, nous avons construit un questionnaire papier-crayon (voir annexe 1) dont la durée de passation est d'une heure environ. Ce questionnaire comporte un ensemble de huit questions de types différents, en relation avec les objectifs principaux d'intégration et de mise en cohérence de connaissances d'origines diverses sur le thème de la couleur. Nous cherchons à identifier dans les réponses les maillons de la «chaîne» de transformation évoquée plus haut (émission par la source, interaction lumière et matière, réception par l'œil) considérés par les étudiants dans leurs raisonnements et sous quelles modalités ils le sont.

Dans cette recherche, on se garde bien de conclure à partir des réponses des étudiants à une seule question. En effet, la signification que prend un commentaire donné, pour l'enquêteur, dépend beaucoup de la question qui l'a fait surgir (Viennot, 1994b). Ce point sera illustré plus loin. En particulier, pour notre étude, la multiplicité des domaines de référence (techniques, physique, perception) conduit à ouvrir l'éventail des questions. Ainsi, il est intéressant de voir si un élément d'argumentation donné apparaît plus volontiers avec une question de type technique ou une question liée à l'enseignement traditionnel de la physique. C'est pourquoi nous avons retenu comme outil pertinent d'analyse un ensemble de couples «élément de réponse / question». Toutefois on risque d'aboutir ainsi, sur un large éventail de questions, à une multiplicité de couples dont la structure et le sens ne sont pas donnés. D'autre part, faire l'hypothèse d'une cohérence dans la pensée des étudiants amène à rechercher une certaine communauté de points de vue à travers l'analyse de situations parfois très diverses. Cette cohérence des productions des étudiants fait d'ailleurs écho à l'un des objectifs de la séquence, celui d'un changement conceptuel appuyé sur une multiplicité de situations. Nous avons donc cherché à définir des sous-ensembles de couples (ou «familles») sur lesquels *a priori* les étudiants ont le plus de chances de se montrer cohérents. Si cette cohérence est limitée à l'un de ces sous-ensembles (cohérence locale), on peut la retraduire par l'existence d'un type de compréhension «marquée» d'une manière ou d'une autre. Plus largement, la répartition des taux d'occurrence des couples «élément de réponse / question» dans une population donnée signe en quelque sorte un «profil conceptuel» de ce groupe.

3.2. La sélection de couples «élément de réponse / question» : l'importance des observations préalables

Les exemples suivants illustrent la démarche de sélection des couples, appuyée sur les observations préalables. Au cours de l'expérimentation, à propos de la question intitulée «addition de lumières rouge et verte» (*Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte. a) Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ? b) Où se crée cette couleur : dans l'espace où les faisceaux se rencontrent, sur le décor, dans l'œil de l'observateur (sur la rétine), dans le cerveau de l'observateur ?*), on a pu observer que la reconnaissance du rôle de l'œil et du cerveau va de pair avec une prise en compte de la composition simplifiée de la lumière, de la diffusion par l'écran blanc, de l'entrée de la lumière dans l'œil et donc de la couleur envisagée comme réponse perceptive. On peut s'interroger au vu de cette question, et se demander s'il y a une grande différence entre celui

qui répond que la couleur s'est créée dans l'œil et celui qui choisit la réponse «espace» ou «décor», ou s'il s'agit de subtilités verbales. C'est l'observation qui permet de trancher sur ce point. Dans une phase qui favorisait l'expression des étudiants, des schémas très explicites sur les liens que les étudiants établissent entre les différents éléments de la chaîne d'analyse (figure 1) sont toujours associés à la formulation verbale correspondante. Il est donc peu probable qu'une compréhension complète aille avec une réponse verbale non appropriée et inversement. Aussi nous considérons comme traduisant deux points de vue distincts les deux couples suivants (les numéros renvoient à la liste récapitulée en annexe 2) :

– le jaune se crée seulement sur le décor ou dans l'espace / question «addition de lumières rouge et verte» (couple n° 20) ;

– le jaune se crée dans l'œil ou le cerveau / question «addition de lumières rouge et verte» (couple n° 5).

2. Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte.

Question b) Où se crée cette couleur ?

dans l'espace où les faisceaux se rencontrent
 sur le décor
 dans l'œil de l'observateur (sur la rétine)
 dans le cerveau de l'observateur

Commentaire et/ou schéma :

réponses typiques obtenues au cours de l'expérimentation

R

V

jaune

LR

LV

LR + LV

Ecran

jaune

dans l'espace où les faisceaux se rencontrent
 sur le décor

dans l'œil de l'observateur (sur la rétine)
 dans le cerveau de l'observateur

interprétation

aucune lumière diffusée pas d'œil
compétence technique inadaptée

composition simplifiée lumière diffusée par l'écran, entrant dans l'œil et couleur perçue

couples retenus

n° 20 : «espace» / «décor»

n° 5 : «œil» / «cerveau»

Figure 1. Question 2. b) «addition de lumière rouge et verte» : réponses typiques et sélection de couples

Il reste à vérifier si ces mêmes aspects de compréhension s'étendent ou non à des questions de types différents.

3.3. Une hypothèse sur les cohérences partielles : la constitution des familles de couples

Toutes les questions sont *a priori* construites pour vérifier le niveau de maîtrise de l'idée de «chaîne» d'information transportée par la lumière, y compris la prise en compte de l'œil, certaines questions vérifiant mieux que d'autres ce niveau de maîtrise. Ainsi, à la question portant sur l'éclairage de corps colorés avec des lumières colorées de composition connue (figure 2), l'observation au cours de la séquence a montré qu'une réponse correcte en termes de couleur (couple n° 11) s'appuie sur une structuration et une maîtrise de l'ensemble des éléments conceptuels à propos de la «chaîne». Au contraire, on a observé que les réponses fausses sont données sur la base de connaissances techniques inadéquates dans cette situation (couple n° 15) : les règles du mélange des couleurs évoquées dans ces réponses ne s'appliquent pas à l'addition de la couleur de la lumière à la couleur de la matière. Une telle argumentation qui privilégie l'association forte entre couleur et matière au détriment d'une analyse complète de l'interaction entre lumière et matière, peut être rapprochée du couple n° 20 (choix du «décor» ou «espace») et classée dans une même famille. Dans les deux cas, un point de vue que nous qualifions de «technicien», se traduit par des réponses manifestant à la fois des connaissances techniques et des difficultés persistantes dans une compréhension plus intégrée.

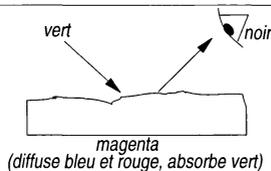
Question	<i>Si on place un filtre vert devant une source de lumière blanche, de quelle couleur paraîtra un objet magenta ?</i>		
réponses typiques des étudiants	magenta + vert = blanc	magenta + vert = marron	
interprétation	comme pour un mélange de lumières colorées	comme pour un mélange de peintures	soustraction par le filtre, soustraction par l'objet lumières diffusées (ou non) couleur perçue
	utilisation inadéquate de règles de mélange de couleurs		réponse correcte = raisonnement correct
catégorisation du couple	n° 15 : compétence technique inadaptée		n° 11 : maîtrise de la «chaîne»

Figure 2. Question 6 «couleur des corps» : réponses typiques et catégorisation des couples

Mais ces regroupements de couples, sous-tendus par l'hypothèse d'une même compréhension de la couleur par l'étudiant, ne vont pas toujours de soi. Certaines questions provoquent une véritable rupture dans la cohérence des réponses. Ainsi, si à propos de la question «addition de lumières rouge et verte», des étudiants semblent comprendre la couleur comme une réponse perceptive à de la lumière, d'autres questions devraient faire émerger chez eux cette même prise de conscience du rôle de l'œil et du système visuel. À la question «arc-en-ciel» déjà citée plus haut (*Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?*), la réponse serait alors : «*Non, certaines couleurs sont obtenues par un mélange de radiations. Par exemple, le mélange de radiations rouges et bleues qui donne le magenta n'est pas vu dans l'arc-en-ciel.*» Cette réponse reste très minoritaire, y compris dans les groupes qui ont massivement accepté le rôle du système visuel dans la question «addition de lumières rouge et verte». Ce fait suggère que, dans l'esprit des étudiants, la question «arc-en-ciel» est fortement associée au contexte du cours de physique et à la description du spectre des radiations électromagnétiques, où couleur et longueur d'onde sont facilement confondues, comme l'a montré l'enquête préliminaire. Une réponse qui fait intervenir l'œil à la question sur l'arc-en-ciel nécessite une compréhension très complète des phénomènes de couleur, et ne prend pas le même sens qu'un choix mentionnant l'œil dans la question «addition de lumières rouge et verte». On constate, pour cette question «arc-en-ciel», que les couples qui apparaissent avec des fréquences significatives sont ceux qui traduisent des compétences limitées à un seul domaine, celui de la physique.

Ces deux exemples illustrent bien ce que nous disions dans les principes généraux. La recherche de cohérences partielles, guidée par les observations préalables, nous a conduit à regrouper les 22 couples retenus (voir annexe 2) en quatre «familles» donnant chacune des indications de compétences *a priori* d'un type homogène, soit signant une compréhension spécifique à un domaine (physique, technique ou perception), soit relatives à la maîtrise de l'ensemble des éléments conceptuels («chaîne»). De plus, dans cet ensemble, deux sous-groupes ont été faits : d'une part les couples qui présentent des aspects «positifs» du point de vue des objectifs de la séquence et, d'autre part, ceux qui présentent des aspects «négatifs» ou limités. Les aspects «positifs» donnent ainsi des indications à la fois sur le niveau de compétences domaine par domaine (couples 1 à 2 : physique, couples 3 à 4 : technique, couples 5 à 7 : perception) et sur la maîtrise des éléments conceptuels relatifs à la «chaîne» (couples 8 à 12), tandis que les aspects «négatifs», de façon complémentaire, confirment la persistance des obstacles et les difficultés liées à un point de vue limité de «physicien» ou de «technicien».

4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Outre une observation détaillée de multiples épisodes du déroulement de la séquence, l'évaluation de notre séquence met en œuvre des éléments quantitatifs portant sur des comparaisons de groupes. Certains ont permis une évaluation interne par des comparaisons avant/après que nous ne développerons pas ici. Par ailleurs, notre souci a été de rechercher des **effets différentiels laissés dans le long terme** par la séquence par rapport à des enseignements traditionnels. Une évaluation externe, à l'aide de comparaisons entre groupe test et groupes témoins, a été menée un an après l'enseignement. Les groupes choisis sont équivalents par les cursus antérieurs des élèves, par leurs choix professionnels dans le domaine de l'architecture et par les intitulés des programmes de physique de ces classes. Si l'un des groupes témoin (C1) est strictement identique au groupe test sur l'ensemble des enseignements reçus (physique et enseignement professionnel), l'autre groupe témoin (C2) a bien reçu le même enseignement de physique, mais l'enseignement professionnel diffère : visant un diplôme de métier d'art, les étudiants du groupe (C2) sont plus centrés sur les techniques de réalisation que ne le sont les étudiants des deux autres groupes.

Pour cette évaluation quantitative, nous avons utilisé la technique de «profil conceptuel». Après avoir constitué des couples comme cela a été expliqué plus haut, leur taux d'apparition a été relevé. Pour un groupe d'étudiants, les taux d'apparition de chaque couple sont donnés en pourcentages de l'effectif du groupe (5% représente environ un individu, les effectifs des groupes variant de 14 à 18) et ceux d'une même famille sont rapprochés. On obtient ainsi un histogramme qui permet de visualiser le «profil conceptuel» de ce groupe.

Sur la figure 3, apparaissent les «profils conceptuels» des trois groupes pour les seuls couples «positifs». Les taux élevés d'occurrence des couples correspondants montrent que l'un des groupes témoin (C1) se révèle plus influencé par les aspects de la couleur relatifs à la physique en même temps qu'aux aspects visuels ou perceptifs. Au contraire les taux d'occurrence des mêmes couples sont faibles pour l'autre groupe témoin (C2), tandis que des taux d'occurrence élevés montrent que ce sont les aspects techniques qui ont été privilégiés. L'un des groupes manifeste un profil plus «physicien» tandis que l'autre apparaît plus «technicien». On peut penser que le profil plus «technicien» du groupe (C2) reflète l'importance de l'enseignement pratique dispensé en dehors de l'enseignement de physique. Cette différence de profil est confirmée par les couples correspondants à des aspects de réponses «négatifs», c'est-à-dire traduisant une compréhension impropre ou limitée des phénomènes de couleur.

En revanche, le groupe test manifeste des compétences équivalentes sur chaque domaine spécifique relatif à la couleur, chaque fois avec des taux aussi élevés que ceux des groupes témoins les plus compétents. En ce sens, le groupe test présente un profil plus «intégré» que les groupes témoins. De plus, c'est seulement dans le groupe test qu'un tiers des étudiants est capable de raisonner avec l'ensemble de la chaîne conceptuelle dans une situation complexe, manifestant sans aucun doute une compréhension dans le long terme. Ce résultat, modeste certes, montre que le choix d'intégration et de mise en cohérence des différents aspects de la couleur n'a rien fait perdre, sur aucun domaine spécifique, aux étudiants qui ont suivi la séquence. Il met en évidence le caractère opératoire de l'outil de raisonnement qu'est la chaîne d'analyse proposée sur un ensemble large de questions, y compris des questions relativement complexes.

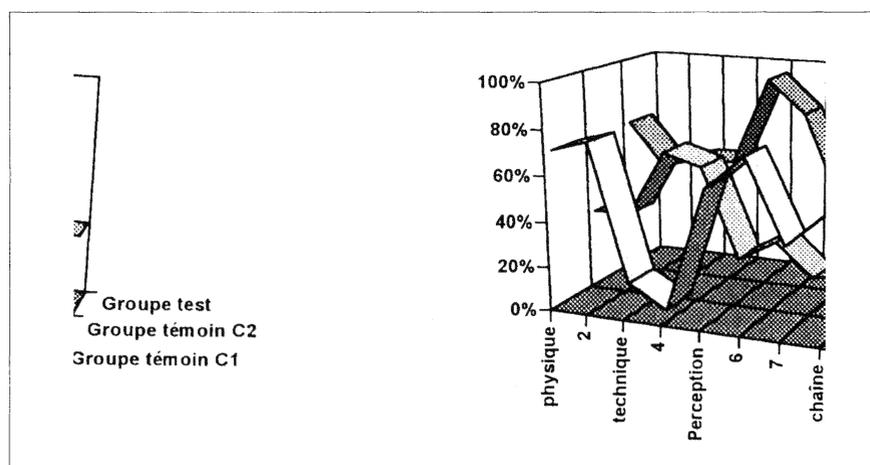


Figure 3. **Profils conceptuels des groupes de l'évaluation externe (aspects positifs de réponses).**

Par le regroupement des couples en familles, l'instrument d'évaluation donne pour une population donnée une vue synthétique des niveaux de maîtrise conceptuelle selon les domaines. Il fait également apparaître, pour chaque groupe, un profil bien typé, manifestant la cohérence d'un point de vue dominant sur la couleur. L'outil d'évaluation se révèle ainsi pertinent pour caractériser l'état conceptuel de groupes d'étudiants sur ce thème spécifique. Il peut être proposé pour une utilisation aussi bien avant qu'après un enseignement.

CONCLUSION

La construction de cet outil d'évaluation d'un état conceptuel sur la couleur fait suite à une double démarche : celle de l'élaboration d'une séquence et celle de son observation en situation de classe. La construction de la séquence elle-même s'est appuyée sur une définition rigoureuse du contenu conceptuel et sur une attention particulière portée aux idées et aux modes de raisonnement des étudiants. Devant les situations construites pour l'apprentissage, on a pu observer les étapes comme les difficultés persistantes des étudiants pour analyser les phénomènes de couleur. C'est sur cette observation fine en cours d'enseignement que s'est appuyé le choix des couples pertinents pour caractériser le point de vue adopté par l'étudiant devant un problème donné de couleur.

À travers les profils conceptuels de groupes d'étudiants, données qualitatives et données quantitatives se sont combinées pour fournir une vision plus globale de l'état des connaissances et des outils conceptuels disponibles.

L'instrument d'évaluation a permis de vérifier sur nos étudiants la plus grande efficacité d'une organisation conceptuelle en termes de chaîne proposée pour l'analyse physique de situations techniques se rapportant à la couleur, et d'en apprécier les effets sur le long terme. Il donne, d'autre part, la possibilité de dresser un état des lieux, avant ou après un enseignement sur la couleur, pour des groupes quelconques.

Plus généralement, la liste des indicateurs retenus et leurs justifications constituent un instrument pour la formation des enseignants sur un champ de connaissances peu défriché. Ce travail devrait également contribuer à préciser les objectifs et les limites d'un enseignement qui aborderait ce thème, comme c'est déjà le cas pour les nouveaux programmes de quatrième où la couleur sert d'outil pour introduire la diffusion de la lumière (Viennot, 1994 a).

Enfin le principe même de cette méthode d'évaluation, qui est de combiner analyse qualitative et analyse quantitative pour définir les observables pertinentes à propos d'un enseignement donné, pourrait sans doute utilement s'employer pour d'autres domaines conceptuels et contribuer à un meilleur contrôle de nos expérimentations didactiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1985). Classes de technicien supérieur. *Bulletin officiel*, n°18 du 2 mai 1985, p. 1425. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.
- BUSER P. & IMBERT M. (1987). *Vision*. Paris, Hermann.
- CHAUVET F. (1993). Conceptions et premiers essais d'une séquence sur la couleur. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 750, pp. 1-26.
- CHAUVET F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur de la couleur intégrant sciences, technique et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse, Université Denis Diderot-Paris 7 (LDPES).
- DRIVER R. (1993). Constructivist perspectives on learning science. In P.L. Lijnse (Ed.), *European Research in Science Education : Proceedings of the first PhD Summerschool*. Utrecht, CDB Press, pp. 65-74.
- GUESNE E. (1984). Children's ideas about light : les conceptions des enfants sur la lumière. In *New Trends in Physics Teaching*, vol. IV. Paris, UNESCO, pp. 179-192.
- KAMINSKI W. (1991). *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*. Thèse, Université Paris 7 (LDPES).
- LINDSAY P.H. & NORMAN D.A. (1980). *Traitement de l'information et comportement humain, une introduction à la psychologie*. Montréal, Vigot.
- NEWTON I. (1704). *Traité d'optique* (Optics, 1704), trad. P. Coste, 1722, fac-similé publié en 1955. Paris, Gauthier-Villars.
- TIBERGHIE A. (1983). Revue critique sur les recherches visant à élucider le sens de la notion de lumière chez les élèves de 10 à 16 ans. In G. Delacote & A. Tiberghien (Dir.), *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international d'été, La Londe les Maures*. Paris, CNRS, pp. 125-136.
- VIENNOT L. (1994a). Recherche en didactique et nouveaux programmes d'enseignement : convergences. Exemples du programme de physique de quatrième (grade 8) 1993, en France. *Didaskalia*, n° 3, pp. 119-128.
- VIENNOT L. (1994b). A multidimensional approach in characterising a conceptual «state» in students : the role played by questions. In *European Research in Science Education : Proceedings of the second PhD Summerschool*. Thessaloniki.

ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE D'ÉVALUATION FINALE

Question 1 : «arc-en-ciel»

Voit-on toutes les couleurs dans l'arc-en-ciel ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Question 2 : «addition de lumières rouge et verte»

Au cours d'un spectacle, on projette au même endroit d'un décor blanc un faisceau de lumière rouge et un faisceau de lumière verte.

a) Qu'observe-t-on, là où les faisceaux se superposent ?

du blanc	<input type="checkbox"/>	du rouge et du vert	<input type="checkbox"/>
du marron	<input type="checkbox"/>	je ne sais pas	<input type="checkbox"/>
du jaune	<input type="checkbox"/>	autre	<input type="checkbox"/>

b) Où se crée cette couleur ?

dans l'espace où les faisceaux se rencontrent

sur le décor

dans l'œil de l'observateur (sur la rétine)

dans le cerveau de l'observateur

Commentaire et/ou schéma :

Question 3 : «lasers»

Deux faisceaux laser, l'un rouge et l'autre vert, se croisent dans l'espace dans une zone Z. La couleur* de chaque faisceau est-elle la même avant et après avoir traversé la zone de croisement ?

* On emploie ici le terme couleur d'un faisceau pour désigner celle qu'on voit si on place un écran blanc coupant le faisceau.

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Question 4 : «diffusion et couleur»

Entrant dans une salle sombre, un spectateur peut-il faire la différence entre un décor rouge éclairé par une lumière blanche et un décor blanc éclairé en lumière rouge ?

oui non je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Question 5 : «filtres et pigments»

On superpose deux filtres avant l'objectif d'un projecteur de diapositive et on mélange deux pigments sur un support blanc. Le pigment 1 et le filtre 1 sont choisis de même couleur, ainsi que le filtre 2 et le pigment 2.

Observe-t-on les mêmes couleurs sur l'écran et sur la plage peinte ?

oui non ça dépend des couleurs choisies je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

Question 6 : «couleurs des corps»

Si on éclaire avec une source de lumière blanche un objet bicolore, il paraît magenta (cette couleur est saturée) et blanc.

a) Si on place un filtre bleu devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

b) Si on place un filtre vert devant cette source de lumière, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

c) Si on éclaire l'objet simultanément avec deux sources, l'une de lumière verte et l'autre de lumière rouge, de quelles couleurs paraîtra l'objet ?

Question 7 : «synthèses additive et soustractive»

Il existe deux procédés de synthèse des couleurs, l'un est souvent qualifié de «mélange additif» et l'autre de «mélange soustractif». Expliquez la différence entre les deux. Précisez les conditions d'observation en vous aidant éventuellement de schémas.

Question 8 : «contraste»

Une expérience d'ombre colorée est décrite ainsi : «à la lumière du jour on plaçait un objet devant un mur blanc, on éclairait le tout avec de la lumière rouge, l'ombre portée de l'objet sur le mur apparaissait verte» (ITTEN, *Art de la couleur*).

a) Avez-vous déjà observé le même phénomène ? oui non

b) Cette affirmation vous paraît : vraie fausse je ne sais pas

Justifiez votre réponse :

ANNEXE 2

Couples «aspect positif de la réponse / question»

et familles caractéristiques d'un type de compréhension :

physique : couples 1 à 2 ; technique : couples 3 à 4 ; perception : 5 à 7 ; chaîne : 8 à 12

Aspect de la réponse (résumé)	Question n°
1. Mention de la lumière	1. Arc-en-ciel
2. « <i>Même lumière</i> »	3. Laser
3. « <i>Jaune</i> »	2. a) Addition de lumières rouge et verte
4. Réponses correctes avec mention de la lumière en additif	7. Synthèses additive et soustractive
5. Mention de l'œil ou du cerveau	2. b) Addition de lumières rouge et verte
6. Affirmation vraie	8. Contraste
7. « <i>Phénomène visuel</i> »	8. Contraste
8. « <i>Même lumière</i> »	4. Diffusion et couleur
9. « <i>Même lumière</i> »	5. Filtres et pigments
10. Soustraction (réponse : bleu)	6. a) Couleurs des corps
11. Soustraction (réponse : noir)	6. b) Couleurs des corps
12. Soustraction (réponse : rouge)	6. c) Couleurs des corps

Couples «aspect négatif de la réponse / question»

13. compatible avec adhérence couleur-longueur d'onde	1. Arc-en-ciel
14. inversion procédés additif et soustractif (« <i>filtres soustractifs, donc procédé soustractif</i> »)	7. Synthèses additive et soustractive
15. addition couleur-lumière et couleur-matière	6. Couleurs des corps
16. addition de lumières comme matières (« <i>marron</i> »)	2. a) Addition de lumières rouge et verte
17. addition couleur-lumière et couleur-matière	4. Diffusion et couleur
18. pas de mention de lumière (« <i>palette de couleurs</i> »)	1. Arc-en-ciel
19. lumière vue dans l'espace (« <i>croisement jaune</i> »)	3. Laser
20. pas d'œil (« <i>décor/espace</i> »)	2. b) Addition de lumières rouge et verte
21. « <i>superposition de filtres = addition de faisceaux colorés</i> »	5. Filtres et pigments
22. « <i>faisceaux lumineux comme filtres</i> »	3. Laser

Les habitudes des enseignants et les intentions didactiques des nouveaux programmes d'électricité en classe de quatrième

Monique COUCHOURON

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

Laurence VIENNOT, Jean-Marie COURDILLE

Université Paris 7
Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Tour 24 - 2 Place Jussieu
75251 Paris cedex 05, Case 7021, France.

Résumé

La mise en place de nouveaux programmes nécessite, de la part des enseignants, une prise en compte des intentions des rédacteurs puis une traduction de celles-ci en actes pédagogiques. Nous nous intéressons ici à la perception que les enseignants ont des intentions didactiques contenues dans le nouveau programme d'électricité de la classe de quatrième en France. Des entretiens semi-directifs, conduits avec neuf enseignants, semblent montrer que leur expérience professionnelle, leurs habitudes, limitent leur perception des nouveautés malgré une bonne connaissance des difficultés que les modifications de programme visent à résoudre. Les formes particulières de cet effet de filtrage sont analysées. On observe à ce propos qu'il peut être utile d'associer des intentions didactiques nouvelles à un objet matériel lui-même nouveau qui leur serve de support.

Mots clés : *enseignants en sciences, développement curriculaire, didactique, circuits électriques, raisonnement commun.*

Abstract

The development of new academic programs must assure that the goals of the authors are taken into account by the teachers and moreover that they are followed up by pedagogical actions. This paper deals with the analysis of the teachers' perception of the didactic contents in the basic electricity program developed at the middle school level. Semi-directive interviews performed with nine teachers seem to indicate that the teachers' professional experience and their usual habits limit their perception of program modifications, despite their knowledge of the existing difficulties that the modifications are supposed to remedy. A discussion about how to help teachers better understand and implement the intentions of the curriculum's authors concludes the paper.

Key words : *science teachers, curricular development, didactics, electric circuits, common reasoning.*

Resumen

El desarrollo de nuevos programas académicos necesita que las intenciones de los redactores sean tomadas en cuenta por los enseñantes y además que ellas sean traducidas en actos pedagógicos. Nosotros nos interesamos aquí en la percepción que los enseñantes tienen de las intenciones pedagógicas contenidas en el nuevo programa de electricidad de la clase de cuarto en Francia. Entrevistas semi-directivas conducidas con nueve enseñantes, indican que sus experiencias profesionales, sus hábitos, limitan sus percepciones de las novedades a pesar de un buen conocimiento de las dificultades que las modificaciones del programa intentan resolver. Las formas particulares de este efecto de filtro son analizadas. Se observa a este propósito que puede ser útil asociar intenciones didácticas nuevas a un objeto material nuevo que les sirva de soporte.

Palabras claves : *enseñantes en ciencias, desarrollo curricular, didáctica, circuitos eléctricos, razonamiento común.*

INTRODUCTION

La classe de quatrième est, en France, depuis 1993, la première année d'enseignement de la physique en temps que discipline constituée. Le nouveau programme concerne l'optique et l'électricité (BOEN, 1992). Il porte la marque de points de vue consensuels et de résultats de la recherche en didactique développée depuis vingt ans. Il manifeste, en effet, une approche constructiviste au sens large (Driver, 1993), en ce sens que l'enchaînement des concepts et les stratégies pédagogiques suggérées

sont de nature à permettre une élaboration de ses propres connaissances par l'élève, appuyée à chaque étape par ce qui vient, en principe, d'être acquis, et par des activités expérimentales à la fois très guidées et très mobilisantes pour l'activité de raisonnement. Prédiction-vérification-débat, tel est le schéma d'épisodes pédagogiques auxquels les textes officiels incitent les professeurs, pour une démarche qui fait une large place aux difficultés déjà mises en lumière par la recherche. Ces convergences entre prise de position constructiviste et résultats de la recherche en didactique d'une part, orientation du programme de quatrième d'autre part, ont déjà été analysées pour la partie du programme concernant l'optique (Viennot, 1994). Elles constituent un fait remarquable car intervenant à l'échelle d'un pays. L'intérêt d'en étudier l'effet dans le système éducatif n'en est que plus manifeste.

Une première question se pose : comment les enseignants perçoivent-ils les intentions et les éclairages présents dans les textes ? De même que les élèves construisent leurs connaissances sur et avec leurs acquis antérieurs, on peut attendre que les enseignants interprètent les textes suggérant de nouvelles pratiques à partir de leurs expériences et de leurs convictions antérieures. Dans une étude, menée en parallèle avec la nôtre, C. Hirn (1995) tente de répondre à cette question à propos du programme d'optique de quatrième. S'appuyant sur les travaux de F.-V. Tochon (1989), elle rappelle le rôle déterminant des habitudes professionnelles des maîtres et en étudie dans le détail les effets de filtre.

L'étude présentée ici se propose le même but pour la partie concernant l'électricité. Nous nous appuyerons à la fois sur une analyse du contenu de la matière enseignée et sur celle des difficultés conceptuelles prévisibles. Ces dernières sont susceptibles de concerner, pour certaines d'entre elles au moins, les maîtres aussi bien que les élèves (Viennot & Kaminski, 1991). Il est utile d'articuler entre eux ces différents éléments d'analyse pour examiner comment les enseignants comprennent les textes officiels.

Après un bref rappel des résultats de recherche en didactique sur les difficultés usuelles à propos de l'électricité, et une analyse d'aspects du programme qui retiennent particulièrement notre attention de ce point de vue, nous donnons les résultats d'une enquête par entretiens semi-directifs auprès de neuf enseignants de collège, avant parution des manuels scolaires, à propos des textes du programme et des «commentaires» officiels.

Nous terminons en amorçant une discussion sur l'une des conditions à satisfaire dans la rédaction d'un programme pour que les enseignants en perçoivent au mieux les intentions didactiques.

1. DIFFICULTÉS CONCEPTUELLES PRÉVISIBLES EN ÉLECTRICITÉ ET ASPECTS MARQUANTS DU PROGRAMME DE QUATRIÈME

Les difficultés des apprenants concernant les circuits électriques ont fait l'objet de très nombreuses recherches depuis quinze ans. L'étude de J.-L. Closset (1983) fait apparaître une forme de raisonnement très commune depuis le niveau scolaire d'introduction du circuit électrique jusque chez les étudiants en fin d'études universitaires : le raisonnement séquentiel, qui s'oppose à l'analyse quasistatique du circuit électrique. Celle-ci néglige les temps de propagation de l'information électrique d'un bout à l'autre du circuit par rapport au temps caractéristique des évolutions étudiées. Elle met en œuvre des grandeurs dont les valeurs à chaque instant concernent l'**ensemble** du circuit et obéissent à des relations valables en permanence. Le raisonnement séquentiel, au contraire, semble fondé sur l'**histoire** de quelque chose – selon la question et le niveau scolaire, cela peut être l'intensité, la tension, l'électricité, la phase... – qui voyage le long du circuit en subissant une série d'aventures locales, sans rétroaction de l'aval sur l'amont.

De nombreuses recherches (Shipstone & al., 1988 ; Tiberghien, 1983) ont confirmé l'existence de ce type de raisonnement et son caractère d'obstacle à une vision systémique du circuit. Elles montrent la tendance à centrer le raisonnement sur une unique notion, souvent un hybride de l'intensité et de la tension. Elles soulignent la difficulté qu'il y a à distinguer le flux des charges constant le long de tout le circuit série, du flux unidirectionnel d'énergie qui va du générateur aux dipôles passifs (Johsua, 1983 ; Psillos et al., 1987).

Le générateur, dispositif de maintien du flux de charges en même temps que pourvoyeur d'énergie, est un carrefour de difficultés. Benseghir (1989, 1993) a particulièrement souligné qu'il était, historiquement comme actuellement, l'objet d'incompréhensions qu'on pouvait rattacher à un réinvestissement non maîtrisé de la notion de décharge. Celle-ci, liée à l'électrostatique, va de pair avec une vision du générateur comme réservoir de charges, alors qu'il serait plus juste de l'imaginer comme une pompe dans un circuit hydraulique à plat, ou un moteur qui transmet de l'énergie *via* une chaîne ou une courroie. Cette distinction entre, d'une part le cadre de raisonnement «électrostatique» avec réservoirs et décharge, et d'autre part la vision systémique, n'est donc nullement évidente. Elle est pourtant cruciale si l'on souhaite endiguer l'idée que le générateur est une source de courant à débit constant (Closset, 1983) et provoquer des raisonnements qui prennent véritablement en compte la nécessité de fermeture du circuit pour l'existence d'un courant permanent.

En quoi le nouveau programme se fait-il l'écho de ces analyses ? Ce n'est certainement pas la liste des concepts abordés qui, à elle seule, peut attirer l'attention : charges, décharges et étincelles, circuits, intensité, tension... : rien de très neuf. Comme pour la partie «optique» du programme, les «contenus», si l'on entend par là les têtes et les items des chapitres classiques, n'ont rien pour surprendre.

Plusieurs éléments éclairent de façon plus significative les intentions des rédacteurs. Ce sont :

- l'ordre d'introduction des notions,
- les compétences attendues à leur propos et les «activités-supports» suggérées, les unes et les autres explicitement mentionnées dans le programme.

Les «commentaires» qui accompagnent le programme indiquent les points importants, les obstacles éventuels, des propositions de stratégie et les limites des objectifs à atteindre. Ainsi, le programme est organisé en un premier bloc, centré sur l'électrostatique et les décharges, puis un second, centré sur le courant en circuit fermé, intensité et tension. Les commentaires précisent à propos du premier bloc (c'est nous qui relevons quelques expressions) :

*«...il est important de souligner le caractère **limité dans le temps** de ces décharges, qui est lié à la diminution des stocks de charge en présence»*

et à propos du second bloc :

*– «On associe la double condition de fermeture du circuit et de la présence du générateur à l'existence d'un courant **permanent**, par opposition au caractère éphémère de la décharge.»*

*– «Un circuit électrique est un ensemble d'éléments qui interagissent tous les uns sur les autres, en même temps. **Les lois** introduites concernant intensité et tension, notamment celles qui concernent un circuit série (conservation de l'intensité le long du circuit et additivité des tensions) **restent vraies à chaque instant**. Dans un circuit série, l'ordre des éléments n'a pas d'importance.»*

Dans ce domaine de l'électricité des circuits permanents, les compétences attendues sont les suivantes :

- *«montrer que le courant qui traverse la pile dépend du circuit...»*
- *«montrer expérimentalement que si l'on change l'ordre des éléments d'un circuit série, on ne change aucune des valeurs des grandeurs (tension aux bornes et intensité) qui les concernent...»*

Ces commentaires et spécifications de compétences engagent clairement la vision systémique du circuit : dire que l'ordre des éléments d'un circuit série n'intervient pas, c'est contredire le raisonnement séquentiel. De même, affirmer que le générateur ne débite pas un courant indifférent au circuit, c'est s'interdire un raisonnement local. Vient à l'appui de ce thème, l'activité-support mettant en œuvre un circuit hydraulique à plat avec pompe manuelle, transparent, où l'on voit se déplacer l'ensemble des bulles présentes dans le fluide. On peut espérer que ce dispositif favorise une compréhension du générateur comme une pompe dont l'effet dépend de l'ensemble du circuit.

L'adhérence fréquente entre intensité et tension est non moins explicitement visée à travers ce commentaire :

– « Ces deux **grandeurs** (intensité et tension) sont **différentes**, et ne constituent pas deux facettes plus ou moins équivalentes d'une même notion (« l'électricité » par exemple),

et cette compétence attendue :

– « reconnaître qu'il peut y avoir une tension importante entre deux points entre lesquels ne passe aucun courant (situations d'étincelles avant déclenchement, circuit ouvert...) et inversement qu'un dipôle peut être parcouru par un courant sans tension notable à ses bornes (fil de connexion, diode) ».

Le fil de connexion fait, de ce point de vue, l'objet d'une attention particulière puisqu'il constitue, fait nouveau, un item du programme.

Enfin, pour ne souligner que les éléments les plus marquants, de notre point de vue, l'idée même de loi physique fait l'objet d'une « compétence attendue » explicite :

– « montrer... qu'en changeant le circuit, par exemple en rajoutant une lampe en série, les valeurs des grandeurs changent, mais les lois demeurent ».

C'est essentiellement à propos des éléments relevés ici, sous la rubrique des difficultés prévisibles comme sous celles des intentions didactiques du programme, que nous souhaitons connaître la réaction des enseignants devant les textes. Dans quelle mesure la banalité du contenu, en termes de liste d'items de programme, fait-elle écran à la spécificité des objectifs ?

La lecture des compétences attendues et des activités-supports se fait-elle dans la transparence que les lignes précédentes suggèrent, ou bien fait-elle intervenir de puissants déterminants de ce qu'en retiennent les maîtres ? En particulier, comment leur connaissance des difficultés des élèves intervient-elle ? Leurs habitudes entraînent-elles un filtrage dans la

prise en compte de nouvelles situations didactiques, et dans l'affirmative, quelles en sont les modalités ?

2. L'ENQUÊTE

2.1. Conditions générales de l'enquête

Cette étude est limitée puisqu'elle ne concerne que neuf enseignants de collège. Ceux-ci ont été interrogés avant parution des manuels scolaires et intervention des stages de formation organisés pour les nouveaux programmes. Le faible effectif ne permet pas de satisfaire une quelconque prétention à «représenter» le corps enseignant. Il s'agit d'enseignants de collèges parisiens (4), de banlieues parisiennes (3) et provinciaux (2) en milieu urbain, non typés aux extrêmes de l'échelle sociale.

Ces enseignants sont volontaires et c'est là probablement le biais principal de l'échantillon.

2.2. Les entretiens

Il s'agit d'entretiens semi-directifs, d'une durée d'environ une heure, les enseignants ayant été priés de lire les textes auparavant.

Le guide d'entretien concernant le nouveau programme est joint en annexe. Une première partie d'ordre général, portant sur l'impression d'ensemble, est destinée à apprécier dans quelle mesure les enseignants sont sensibles à la présentation du programme et quels changements ils perçoivent positivement ou négativement.

Une seconde partie aborde quelques points particuliers ; elle est destinée à attirer sur eux l'attention des enseignants qui ne les ont pas évoqués dans la première partie, et à permettre à ceux qui les avaient remarqués d'en discuter plus à fond.

2.3. Méthode d'analyse

Après transcription des entretiens, nous les avons découpés en épisodes à partir d'une analyse de signification. La présentation des résultats qui suit donne une sélection des aspects retenus pour la caractérisation des épisodes. Pour chaque aspect, quelques exemples d'épisodes illustrant sont fournis, rapportés chacun à l'enseignant interrogé.

La fréquence d'occurrence d'épisodes de ce type est indiquée en termes de nombre d'enseignants concernés. La situation précise de l'épisode n'a pas été retenue comme critère pertinent ; on distingue simplement les deux parties de l'entretien concernant, pour la première, des repérages spontanés des différences et ressemblances entre l'ancien et le nouveau programme, pour la deuxième partie, des commentaires plus guidés. Nous n'allons pas jusqu'à dresser des « profils » d'enseignant. Dans cette analyse très limitée, il nous semble difficile de dépasser la mise en évidence de phénomènes susceptibles d'être largement représentés. Étant donné le biais de l'effectif, constitué de professeurs motivés puisque volontaires, nous serons amenés à insister surtout sur ce qui semble limiter leur perception des textes, en considérant qu'*a fortiori* des enseignants moins actifs professionnellement manifesteraient les mêmes limites.

3. RÉSULTATS

3.1. Première lecture : une centration sur les items considérés individuellement

Lorsqu'on examine les différences entre ancien et nouveau programmes remarquées spontanément par les enseignants, on observe, avant tout, qu'elles sont peu nombreuses. En effet, parmi les neuf professeurs interrogés, six disent voir peu ou pas de nouveautés, ou même ne perçoivent que des suppressions :

- « *ma première impression est d'abord une certaine similitude avec les anciens programmes d'électricité* » (E2)
- « *bon... tout ça c'est pas nouveau...* » (E5)
- « *moi, je n'ai pas trouvé de grosses différences par rapport à ce qu'on apprend actuellement* » (E9)
- « *... j'ai l'impression... que l'on revient en arrière quant au contenu... j'ai l'impression que le contenu est moins développé que précédemment* » (E3),

et trois seulement voient une certaine nouveauté :

- « *... différent par son approche...* » (E4)
- « *Ce programme qui paraît assez séduisant dans la logique de sa conception... dans sa conception, il y a de grosses différences* » (E7).

De plus, les ressemblances et différences remarquées spontanément portent plus volontiers sur les items et activités-supports que sur d'autres éléments essentiels relevés plus haut pour orienter la mise en œuvre didactique du programme : organisation d'ensemble et compétences attendues.

Ainsi l'item du programme concernant le fil de connexion est-il cité comme nouveauté par trois enseignants, alors que la compétence attendue : «*Montrer... qu'en changeant le circuit... les valeurs des grandeurs changent mais les lois demeurent*», dont la formulation est pourtant très nouvelle, n'est remarquée que par deux enseignants.

Les modifications repérées spontanément en termes d'items sont principalement, pour les nouveautés qui apparaissent, les phénomènes d'électrisation et de décharge électrique et, pour les disparitions, la structure de l'atome.

Électrisation et décharges sont remarquées pour les difficultés qu'elles risquent de susciter, qu'elles soient d'ordre expérimental (quatre enseignants) ou théorique (deux enseignants) :

– «*... je trouve que les expérimentations avec le pendule ne sont pas très probantes, c'est très aléatoire...*» (E2)

– «*C'est très difficile de faire ces expériences car j'ai souvent eu des problèmes*» (E4)

– «*L'attraction des petits bouts de papier ou d'une boule de sureau métallisée, ça pose problème... Dans le cas des papiers, peut-on parler réellement d'un déplacement d'électrons libres car ce sont des isolants ?*» (E3).

Lorsqu'elle est perçue positivement (quatre enseignants), cette partie du programme l'est essentiellement pour son caractère expérimental et ses liens avec la vie courante.

La suppression de la présentation de la structure de l'atome est, elle, massivement remarquée puisqu'elle retient l'attention de sept enseignants. Elle apparaît comme un obstacle à la compréhension des notions de charges positives et négatives :

– «*... mais ça va tout compliquer, alors on va dire que dans la matière il y a des charges, mais y a-t-il des charges positives ?*» (E5)

– «*on ne parle plus du tout de l'atome... par contre, on parle souvent des électrons, alors comment on va parler des électrons sans parler de l'atome ?*» (E1).

C'est donc, dans la rubrique «électrisation» comme dans celle de «l'atome», les notions de charges positives et négatives qui sont au centre des préoccupations des maîtres. Les difficultés pratiques ou théoriques de leur mise en évidence, l'intérêt d'illustrer pratiquement ces notions orientent le repérage des nouveautés du programme. Mais qu'en est-il de l'organisation globale du programme fondé sur une opposition entre décharges et courants permanents ?

Dans ce repérage spontané des nouveautés du programme, aucun enseignant n'a insisté sur l'opposition entre le caractère éphémère des

étincelles et décharges se produisant dans un circuit ouvert et la permanence du courant qui s'établit dans un circuit fermé comportant un générateur. Il est possible que cette centration sur la notion de charge traduise l'idée que de la charge au courant il n'y a qu'un pas, ainsi que le laissent entendre ces remarques :

– «*Oui, on leur dit que le courant électrique est un déplacement de charges... donc... bien, oui, ça permet d'introduire le mot charge, électron. Oui, c'est bien*» (E4).

Seuls deux enseignants soulèvent la difficulté :

– «*... étincelle... transfert brusque..., je sais pas trop... qu'est-ce qu'on en attend de ce point là ?... je vous dirai que le lien n'est pas évident pour les élèves de passer de cette notion de porteurs de charges différentes à un circuit, le passage est difficile*» (E2).

En bref, ce premier repérage des nouveautés du programme fait apparaître une centration des enseignants sur les charges à travers l'électrification, les phénomènes de décharges et l'atome, alors que l'architecture d'ensemble du programme, l'analyse du courant permanent et la difficulté de distinguer ce phénomène de celui de décharge retiennent peu l'attention. Ces concepts-pivots de l'ancien programme sont l'objet de comparaisons portant sur les intitulés d'items individuels, un peu comme s'il n'était pas possible d'envisager une architecture d'ensemble du programme, ni des objectifs de compétences différents de ceux dont les maîtres ont l'habitude.

Pourtant certaines des difficultés liées au courant permanent semblent bien connues des maîtres.

3.2. Conscience des difficultés

Les difficultés des élèves liées à la notion de circuit électrique et à la distinction intensité-tension sont évoquées par six enseignants. Ainsi, à propos de la conservation du courant le long du circuit série :

– «*des difficultés très classiques : le courant s'use, s'essouffle lorsqu'il passe dans un récepteur*»... «*le courant peut s'accumuler dans certains points du circuit, notamment dans les endroits où il a des difficultés pour passer*»... «*chez les petits (sixième), il n'était pas rare d'entendre que le courant partait des deux bornes pour se rejoindre dans la lampe ce qui provoquait la lumière*» (E7)

– «*... ils pensent qu'une lampe va manger les électrons. À la question : l'est-il le même partout ? il y en a qui disent oui, d'autres non. Quand on met une deuxième lampe en série avec la première, les élèves ont du mal à voir*

que I change. Le circuit dérivation pose aussi des problèmes : si on a une lampe et un courant de 0,5 Ampère, si on met une deuxième lampe en dérivation, ils disent que I est le même» (E4)

– «... ils pensent que lorsqu'on va changer les lampes c'est celle qui va être devant qui brille le plus, celle qui va être derrière qui brille le moins»... «on intervertit les lampes et à ce moment-là ils voient que c'est faux» (E9)

et pour ce qui concerne la confusion intensité-tension :

– «oui, pour les élèves il y a confusion entre courant et tension» (E4)

– «c'est quelque chose de difficile à saisir pour les enfants, il est vrai que pour certains la nullité d'une de ces deux grandeurs doit entraîner la nullité de l'autre» (E7)

– «ils ont beaucoup de difficultés pour comprendre par exemple lorsqu'on mesure entre deux points la tension, dans un circuit fermé et de constater que la tension est nulle... ils ont énormément de mal à comprendre» (E9).

Mais cette connaissance des problèmes ne contribue pas toujours à une bonne prise en compte des intentions des textes.

3.3. L'objet matériel, fixateur des habitudes

Nous avons déjà signalé, à propos des difficultés spontanément remarquées, combien les maîtres ont du mal à prendre en compte un enchaînement des concepts et des compétences attendues différents de ceux inscrits dans leurs habitudes. Nous reprenons ici la même question, à travers la manière dont est envisagé le thème du générateur. Ce dispositif est en effet, comme nous le rappelions plus haut, un carrefour de difficultés. La manière dont il est appréhendé signe en quelque sorte une vision du circuit électrique : lieu de décharge ou système d'éléments en interaction mutuelle.

Une «compétence attendue» explicite de façon radicale le second de ces points de vue : «montrer que le courant qui **traverse** la pile dépend du circuit», alors qu'il est plus habituel de parler du courant **débité** par la pile. Seuls deux enseignants remarquent cette différence, ce qui rejoint notre remarque antérieure sur la faible prise en compte des énoncés de compétences attendues. Parmi ces deux maîtres, un seul est sensible à l'ambition conceptuelle du programme :

– «Là, le programme est plus ambitieux puisqu'il insiste sur l'importance du circuit vis-à-vis du générateur» (E7).

L'autre en est, pour sa part, choqué :

– «... *courant qui traverse la pile, cette phrase me choque. Je dis : courant débité par la pile*» (E4).

Cette résistance à prendre en compte la nouveauté s'ancre, dans le cas particulier du générateur, dans une façon de concevoir l'analogie hydraulique. Celle-ci est, en effet, classiquement utilisée pour donner une représentation concrète de la notion de potentiel électrique à partir de différences d'altitude de l'eau. À la lecture du programme, un seul enseignant a remarqué que ce qui est proposé ici est une activité-support utilisant un dispositif expérimental «à plat» sans réservoir. Certains enseignants ont alors dit utiliser déjà cette analogie, tout en parlant de chute d'eau, de barrage... Après que leur attention ait été attirée sur ce point et une fois décrit l'appareil qu'ils ne connaissaient pas, la moitié d'entre eux en reconnaît finalement l'utilité, l'autre moitié trouve l'analogie un peu compliquée et insiste sur ses limites.

Cette première interprétation de l'analogie hydraulique dans les termes habituels de barrages et chutes d'eau et cette réticence à l'exploiter sous sa forme proposée, sans réservoir, peut s'expliquer par la pratique scolaire courante.

De nouveau, nous constatons que nos résultats sont cohérents avec l'hypothèse selon laquelle les enseignants lisent les textes du nouveau programme en se référant à ce qu'ils faisaient auparavant, plutôt qu'en se laissant guider par la logique interne de celui-ci. Cette référence semble leur masquer les objectifs de la nouvelle présentation et ses capacités à résoudre certaines difficultés pourtant bien connues d'eux.

Sur ce thème particulier du générateur, nous observons qu'un objet matériel donné entraîne avec lui, ici à propos d'une analogie avec un autre dispositif matériel (réservoirs et chutes d'eau), une certaine organisation conceptuelle. L'un comme l'autre de ces dispositifs semblent cristalliser les habitudes des enseignants.

3.4. Un appui à la perception d'une intention didactique : l'introduction d'un nouvel objet

On observe que l'exigence du programme de «*reconnaître qu'il peut y avoir une tension importante entre deux points entre lesquels ne passe aucun courant... et inversement qu'un dipôle peut être parcouru par un courant sans tension notable à ses bornes (fil de connexion, diode)*» est appréciée par quatre professeurs. À ce propos, on note l'attention suscitée par le fil de connexion : trois enseignants, comme on l'a vu plus haut, en ont

repéré spontanément la promotion comme item de programme. Plus remarquable encore est le fait que les intentions didactiques correspondantes aient été exprimées par l'ensemble des enseignants au cours de l'une ou l'autre phase de l'entretien :

– «oui, il existe des différences, introduction de dipôles, influence des fils de connexion...» (E3)

– «la façon dont on doit traiter les fils de connexion est elle aussi nouvelle» (E7)

– [après avoir mentionné le risque de confusion entre courant et tension] «... fera réfléchir davantage les élèves... très expérimental» (E4)

– «ça me paraît bien pour la distinction courant-tension, je crois que même les élèves de terminale...» (E5).

L'introduction d'un nouvel objet, en tant qu'intitulé d'item, pour traiter une difficulté connue par ailleurs provoque donc l'adhésion des enseignants. Ceux-ci redécouvrent le fil de connexion comme un support très utile pour mettre en lumière les comportements différents de l'intensité et de la tension. Inexistant dans les pratiques enseignantes antérieures, sinon pour la nécessité opératoire de fermeture du circuit, le fil de connexion comme nouvel objet d'enseignement est adopté à l'unanimité, assorti d'un objectif pédagogique bien spécifié. Dans ce cas l'habitude n'a pas fait écran à la nouveauté.

CONCLUSION

L'enseignant joue un rôle prépondérant entre les intentions des rédacteurs d'un programme et les acquis des élèves. Cela justifie que l'on essaie de comprendre les mécanismes qui risquent d'engendrer des distorsions entre attentes des rédacteurs et pratiques effectives des maîtres. Les premières réactions des enseignants avant toute lecture de manuels scolaires se font beaucoup en référence à leurs pratiques antérieures. En particulier, elles font apparaître une centration de leur attention sur les items considérés individuellement au détriment de l'organisation générale du programme et des compétences attendues. Ceci contribue à limiter leur perception des intentions didactiques relevées ici.

De plus, nous retrouvons en électricité un effet mis à jour par C. Hirn (1995). Celle-ci relève que les enseignants ont tendance à associer à un objet matériel des stratégies pédagogiques immuables. À propos du programme d'optique, elle observe qu'il est très difficile d'utiliser un dispositif classique (par exemple, les alignements d'épingles ou les expériences d'ombres sur écran) dans un but pédagogique qui ne l'est pas. C'est le cas ici pour le générateur dont les images classiques, associées à l'idée de réservoir, ont la vie dure.

Cependant, on observe que lorsqu'un nouvel objectif pédagogique est associé à la mise en scène d'un objet matériel qui n'était pas auparavant un thème d'enseignement, ici le fil de connexion, les enseignants s'en saisissent volontiers et fixent d'autant plus leur attention sur les difficultés visées. Alors pourquoi ne pas tenter, chaque fois que c'est possible, d'associer une intention didactique à un objet nouveau en tant qu'objet d'enseignement ? Il nous semble que cette direction mérite d'être explorée plus avant et en tout cas prise en considération par les rédacteurs de programme.

Nos résultats, certes limités par les effectifs concernés, illustrent donc au moins ceci : savoir que les habitudes déterminent la mise en œuvre de nouvelles stratégies chez les enseignants n'épuise pas le sujet du rôle que ceux-ci jouent comme transformateurs d'intentions didactiques. Ces transformations ne sont pas prévisibles dans le détail, car on ne peut pas connaître précisément, avant toute recherche, les éléments des habitudes qui vont se révéler déterminants, ni les formes et les effets du filtrage. Les acquis de cette première étude se compléteront d'une analyse, en cours, des manuels scolaires parus à l'occasion des nouveaux programmes (Dupuy, 1995).

Dans le domaine étudié ici comme dans tout autre où l'on se soucie de mettre en œuvre des stratégies didactiques bien spécifiées, une investigation détaillée des réactions des maîtres nous semble nécessaire, qui s'articule à la fois sur une analyse de contenu et sur celle des difficultés et raisonnements communs. L'effort d'explicitation et de formation, particulièrement indispensable au moment de la parution des nouveaux textes, pourrait alors s'appuyer sur des informations précises et gagner en efficacité.

BIBLIOGRAPHIE

- BENSEGHIR A. (1989). *Transition électrostatique-électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves*. Thèse, Université Paris 7.
- 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). Classes de quatrième et quatrième technologique. *Bulletin Officiel*, n° 31 du 30 juillet 1992, pp. 2086-2099 & pp. 2110-2112. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.
- CLOSSET J.-L. (1983). *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique*. Thèse, Université Paris 7.
- CLOSSET J.-L. (1983). Sequential reasoning in electricity. In G. Delacote & A. Tiberghien (Eds), *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international, La Londe les Maures*. Paris, CNRS, pp. 567-569.

- DRIVER R. (1993). Constructivist Perspectives on learning Science. European Research in Science Education. In P.L. Lijnse (Ed.), *Proceedings of the first Ph. D Summerschool*. Utrecht, CdB Press, pp. 65-74.
- DUPUY M. (1995). *Analyse des manuels de quatrième en électricité. Prise en compte des changements de programme*. Mémoire de DEA de Didactique des disciplines, Université Paris 7.
- HIRN C. (1995). Comment les enseignants de sciences physiques lisent-ils les intentions didactiques des nouveaux programmes d'optique en classe de quatrième ? *Didaskalia*, n° 6, pp. 39-54.
- JOHSUA S. (1983). «La métaphore du fluide» et le «raisonnement en courant». In G. Delacote & A. Tiberghien (Eds), *Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international, La Londe les Maures*. Paris, CNRS, pp. 321-330.
- PSILLOS D., KOUMARAS P. & VALLASTADES O. (1987). Pupils' representation of electric current before, during and after instruction on DC circuits. *Research in Science and Technological Education*, vol. 5, n° 2, pp. 185-199.
- SHIPSTONE D.M., RHÖNECK C.V., JUNG W., KÄRRQVIST C., DUPIN J.-J., JOHSUA S. & LICHT P. (1988). A study of students' understanding of electricity in five European countries. *International Journal of Science Education*, vol. 10, n° 3, pp. 303-316.
- TIBERGHIE A. (1983). Critical review of research concerning the meaning of of electric circuits for students aged 8 to 20 years. In *Summer Workshop «La Londe les Maures»*, pp. 1-18.
- TOCHON F.-V. (1989). À quoi pensent les enseignants quand ils planifient leurs cours ? *Revue Française de Pédagogie*, n° 6, pp. 23-33.
- VIENNOT L. (1994). Recherche en didactique et nouveaux programmes d'enseignement : convergences. Exemple du programme de physique de quatrième (grade 8) 1993, en France. *Didaskalia*, n° 3, pp. 119-128.
- VIENNOT L. & KAMINSKI W. (1991). Participation des maîtres aux modes de raisonnement des élèves. *Ensenanza de las Ciencias*, n° 9, pp. 3-9.

ANNEXE : GUIDE D'ENTRETIEN

L'entretien est composé de deux parties :

- une partie générale sur le programme d'électricité,
- une partie portant sur quelques points particuliers.

1. Généralités

11. Quelle est votre impression d'ensemble sur ce nouveau programme d'électricité ?
12. À propos des contenus de ce programme :
 121. Quelles différences voyez-vous par rapport au programme précédent ?
Dans le mode de travail avez-vous remarqué quelque chose de nouveau ?
 122. Y a-t-il dans ces contenus :
 - des notions difficiles à enseigner ?
 - des notions difficiles à comprendre ?
 123. Y a-t-il dans ces contenus :

- des choses intéressantes à enseigner ?
 - des choses intéressantes pour les élèves ?
13. À propos de la présentation du programme, il apparaît deux rubriques spécifiques :
- 131. La rubrique «compétences exigibles ou en cours d'apprentissage» va-t-elle modifier la façon dont vous allez organiser votre enseignement ? votre évaluation ? comment ?
 - 132. La rubrique «activités-supports» va-t-elle modifier la façon dont vous allez organiser votre enseignement ? Si oui, comment ?
Pratiquez-vous déjà l'exercice consistant à faire faire des prévisions par vos élèves ?

2. Quelques particularités du nouveau programme

21. Électrification, décharges, étincelles
- 211. Quel est l'intérêt d'une telle introduction ? Vous aidera-t-elle à faire comprendre la notion de courant électrique ?
 - 212. Que pensez-vous des activités-supports correspondantes ? Vous paraissent-elles faciles ou difficiles à comprendre par les élèves ? à exploiter pour la suite du cours ?
 - 213. Quels types d'exercices pourrez-vous proposer sur ce sujet ? Quels types de contrôles ?
22. Analogie avec un circuit hydraulique à plat
- 221. Quel intérêt, quels inconvénients éventuels voyez-vous à cette analogie ?
 - 222. Comment les connaissances des élèves leur permettent-elles de comprendre le fonctionnement du circuit hydraulique ? Parmi les divers éléments de ce montage, lesquels vous paraissent faciles ou difficiles à expliquer ?
23. Notion de circuit électrique
- 231. À propos du circuit série, avez-vous remarqué des différences entre l'ancien et le nouveau programme ?
 - 232. Quelles sont, selon vous, les difficultés rencontrées par les élèves à ce sujet ?
 - 233. Pour combattre ces difficultés, voyez-vous quelles activités théoriques ou pratiques proposer ? Le nouveau programme vous propose-t-il quelque chose de spécifique de ce point de vue ?
24. $I = 0 \stackrel{?}{\Rightarrow} V = 0, V = 0 \stackrel{?}{\Rightarrow} I = 0$
La nullité de l'une des grandeurs électriques, courant ou tension, pose-t-elle des problèmes particuliers aux élèves ? Lesquels ? La bonne compréhension des conséquences de cette nullité vous paraît-elle importante ? Aidera-t-elle les élèves à comprendre le rôle d'un court-circuit ? d'un fil de connexion ?
25. Points divers
Y a-t-il d'autres aspects du programme dont vous aimeriez parler ?

Place des nouvelles technologies dans l'enseignement de la physique-chimie

Marie-Christine MILOT

Ministère de l'Éducation nationale,
de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
Direction de l'information scientifique,
des technologies nouvelles et des bibliothèques
Bureau des technologies nouvelles pour l'enseignement
107 rue de Grenelle
75007 Paris, France.

Résumé

Après avoir replacé l'évolution de l'utilisation de l'ordinateur dans le contexte des programmes, deux exemples montrent des aspects pédagogiques différents des usages de l'outil informatique tel qu'il s'est intégré dans les pratiques des enseignants. Cette évolution se poursuit avec des produits beaucoup plus riches, en images en particulier, et des moyens de communications à grande échelle. Ces changements ont conduit à s'interroger sur les connaissances indispensables des élèves ainsi que sur les possibilités de transférer les expériences acquises au travers des formations des enseignants.

Mots clés : *informatique, acquisition, modélisation, simulation, formation.*

Abstract

After presenting the evolution of computer use in the context of the official curriculum, we give two examples showing the different pedagogical aspects of uses of the computer tool within teaching practices. This evolution continues with products which are richer in images and ways of communication at a large scale.

These changes lead to ask questions about pupils' essential knowledge and about the possibilities to transfer experiences acquired through teacher training.

Key words : *computer science, acquisition, modelization, simulation, teacher training.*

Resumen

Después de haber reubicado la evolución de la utilización del computador en el contexto de los programas, dos ejemplos muestran los diferentes aspectos pedagógicos del uso de la herramienta informática tal como está integrada en las prácticas de los enseñantes. Esta evolución se prosigue con productos mucho más ricos en imágenes en particular y en medios de comunicación a gran escala. Estos cambios han conducido a plantear preguntas sobre los conocimientos indispensables de los alumnos y las posibilidades de transferir las experiencias adquiridas a través de la formación de los enseñantes.

Palabras claves : *informática, adquisición, modelización, simulación, formación.*

1. UN PEU D'HISTOIRE

Il est tout d'abord nécessaire de préciser ce que l'on entend par nouvelles technologies. Il peut être simple d'y placer l'ordinateur et tout ce que l'on peut faire avec cet instrument et ses accessoires aussi bien logiciels que matériels. Ces pratiques évoluent avec le temps. Les usages des précurseurs des années 1980 deviennent courants. De nouveaux usages apparaissent, en lien avec l'évolution des machines et des logiciels : dans l'environnement des élèves, les images prennent une importance de plus en plus grande.

Les développements historiques ont fait l'objet d'un article (Ministère de l'Éducation nationale, 1994) lors du compte rendu d'une expérimentation importante animée par la Direction des Lycées et Collèges dans toutes les académies ; quelques éléments en sont rappelés ci-dessous. En effet, on ne peut comprendre les développements actuels sans résumer ces dix dernières années.

Dès les années 1980, on voit apparaître des mesures et graphiques automatiques dans de nombreux domaines. L'enseignement pouvait-il rester à l'écart de cette évolution ? Quels usages ces nouvelles technologies allaient-elles développer ? Le remplacement des expériences par des simulations allait-il modifier notre enseignement ? Il était nécessaire que des organismes se préoccupent de prospective : une discipline telle que la physique-chimie ne pouvait rester à l'écart de cette évolution, ne serait-ce que pour pouvoir l'orienter dans une direction correspondant à sa philosophie.

L'enseignement de la physique-chimie suit des orientations différentes suivant les pays. Ainsi en France, l'accent est mis depuis de longues années sur l'importance, pour l'assimilation des concepts, des expériences réalisées par les enfants eux-mêmes : les structures, les programmes, l'organisation des laboratoires le permettent. Cette orientation a marqué les débuts des recherches sur l'utilisation des nouvelles technologies en physique-chimie. Dès ces années, des groupes d'enseignants relevant d'organismes divers (bureau des innovations pédagogiques et des technologies nouvelles dépendant de la Direction des Lycées et Collèges, Centre National de Documentation Pédagogique, Institut National de Recherche Pédagogique) ont contribué à mettre au point des interfaces à usage pédagogique et des logiciels adaptés aux programmes d'enseignement des lycées. En effet, les possibilités techniques offertes par les interfaces industrielles étaient bien supérieures aux besoins des lycées et leurs prix prohibitifs. Dès le début, il s'est agi de considérer l'ordinateur comme un outil parmi d'autres au service de l'expérimentation, l'enseignant devant disposer de logiciels adaptés. Ce choix a probablement permis une extension rapide, les enseignants pouvant constater, lors de stages ou de démonstrations, qu'il s'agissait d'une activité de physicien ou de chimiste et que les connaissances nécessaires ne dépassaient pas celles de «l'utilisateur averti» d'un ordinateur.

En 1987, la Direction des Lycées et Collèges estime nécessaire de passer à un stade plus large d'expérimentation. Quelques académies en pointe entament parallèlement ce type d'expérimentation. La Direction des Lycées et Collèges équipe dans chaque académie un établissement en physique-chimie et un en biologie-géologie. Cet établissement, choisi sur proposition du Recteur de l'académie, a pour mission de tester en vraie grandeur les produits et de participer ainsi aux développements ultérieurs. Les industriels et éditeurs de logiciels sont associés dès le début à cette expérimentation, ainsi que les organismes cités plus haut et l'Inspection Générale de physique-chimie. Avec le temps, ce pôle est souvent devenu un pôle de développement dans l'académie, et les enseignants impliqués, des formateurs pour leurs collègues.

Cette expérimentation, ayant développé des pratiques tout à fait intéressantes, a abouti à une prise en compte de l'ordinateur en tant qu'outil d'Acquisition et de Traitement Informatique de Données Expérimentales (ATIDEX) dans les programmes actuels de physique-chimie.

De fait, en France, les programmes officiels accordent une large place au caractère expérimental de l'enseignement. Les principes directeurs de l'enseignement de la physique et de la chimie au collège et au lycée qui accompagnent les programmes de 1992-94 (BOEN, 1992) signalent parmi les objectifs généraux : «7- ... *Les activités expérimentales ont une place*

essentielle» et «10-... l'ordinateur sera l'outil privilégié pour la saisie et le traitement des données ainsi que pour la simulation. Il ne sera en aucun cas substitué à l'expérience directe dont il sera le serviteur». Ces deux observations résument l'état des possibilités de l'ordinateur développées dans l'enseignement aujourd'hui.

Un deuxième aspect a guidé les précurseurs (Ministère de l'Éducation nationale, 1994) : «*Les sciences physiques ont toujours été considérées, en second cycle, comme une matière un peu difficile. Leur caractère interdisciplinaire est certainement une des causes principales de cette situation : un physicien doit bien maîtriser certaines techniques mathématiques, mais aussi le langage dans lequel il s'exprime.*»

En 1940, dans un article intitulé «*Les fondements de la physique théorique*», A. Einstein (éd. 1990, pp. 77-96), définit ainsi la physique : «*Ce que nous appelons physique comprend ce groupe de sciences de la nature qui basent leurs concepts sur des mesures, et dont les concepts et les propositions se prêtent à être formulés mathématiquement.*» De fait, la physique et en grande partie la chimie font appel pour leur étude à de nombreux savoir-faire annexes et les élèves peuvent connaître des blocages plus importants à ce niveau qu'à celui du phénomène expérimental lui-même. Dans une séance de travaux pratiques, les objectifs expérimentaux sont parfois masqués par les difficultés des élèves devant les outils à utiliser. Il est même parfois difficile à l'enseignant de mettre l'accent sur le phénomène physique intéressant tant il a besoin de digressions utilitaristes.

Compte tenu des deux observations précédentes (caractère expérimental de l'enseignement et nécessité de «faire de la physique-chimie» seulement !), l'ordinateur a d'abord été privilégié en tant qu'outil d'Acquisition et de Traitement de Données Expérimentales (ATIDEX). Cet aspect est en cours de généralisation.

Les nombreuses autres possibilités de l'ordinateur en font plus qu'un simple appareil de mesures. Les logiciels de simulation, pour offrir des situations intéressantes, demandent des puissances de calcul qui sont maintenant accessibles sur les machines présentes dans les établissements scolaires.

Notre chance est peut-être d'arriver à associer l'expérience réelle, son étude quantitative liée aux outils de traitement actuels et maintenant une simulation permettant de montrer des phénomènes dans des situations beaucoup plus variées et plus proches de la réalité, sans qu'il soit pour autant nécessaire d'avoir recours à un outillage mathématique très élaboré.

2. DES EXEMPLES

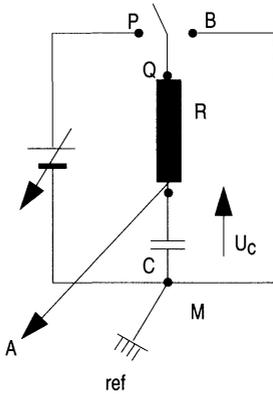
Les différents apports seront envisagés à propos d'exemples précis de concepts physiques enseignés en classe de lycée. L'accent sera mis sur l'utilisation par les élèves de cet outil.

Lorsque l'étude d'un phénomène suppose une représentation graphique, la construction du graphe demande un temps relativement important même pour un élève efficace et n'apporte pas grand chose à l'assimilation du concept. Un temps est nécessaire pour cet apprentissage mais il ne doit pas masquer l'essentiel. L'ordinateur permet de mieux cerner les objectifs d'une séance en remettant à leur juste place ce qui ne constitue qu'un auxiliaire. L'action concrète de l'élève sur son dispositif expérimental (basculer l'interrupteur pour décharger un condensateur, modifier la tension d'alimentation d'un dipôle, verser quelques gouttes de solution dans un dosage...) est immédiatement traduite dans la représentation graphique et donc observable et analysable.

Par ailleurs, si de nombreuses disciplines utilisent les représentations graphiques, les «consignes» ne sont pas les mêmes en sciences expérimentales, en sciences économiques et sociales ou en mathématiques et ces différences sont justifiées par l'usage qui en est fait. Ainsi, un «bon» logiciel de physique-chimie fournit directement des graphiques répondant aux exigences dans cette discipline : les mesures sont représentées par des points, les axes portent des graduations régulièrement espacées, les grandeurs portées en abscisse et ordonnée sont indiquées avec leurs unités ! L'enseignant pourra plus facilement convaincre l'élève, habitué à disposer de «bons» graphiques, d'en «faire autant à la main» ! Cette activité de représentation graphique liée au traitement de données acquises sur un dispositif expérimental est relativement courante actuellement : c'est un des premiers usages de l'ordinateur en physique-chimie.

2.1. L'acquisition de données, qui a été historiquement le premier domaine à être développé, est particulièrement utile pour l'étude des phénomènes transitoires qui, avec des outils plus classiques, nécessitent des montages un peu artificiels.

L'étude d'un condensateur est un exemple particulièrement intéressant de simplification et de recentrage sur le phénomène étudié.



Le phénomène essentiel à faire comprendre est la charge et la décharge du condensateur représenté par un système de deux plaques parallèles séparées par un isolant. Ce phénomène (un condensateur chargé est capable de faire passer un courant dans un conducteur ohmique) est décrit simplement par le montage schématisé ci-contre.

La réalisation expérimentale peut-elle être aussi simple ?

Figure 1 : Charge et décharge d'un condensateur

L'alimentation pour la charge est une simple pile. Les circuits de charge et de décharge sont clairement identifiés. La décharge se fait à travers le conducteur ohmique de résistance R ou éventuellement une bobine d'induction. La durée du phénomène étant de l'ordre du produit RC, l'évolution de la tension U_c est de l'ordre de quelques millisecondes.

Que brancher entre A et ref pour mesurer la tension U_c ? Une interface d'acquisition de données est adaptée à l'enregistrement de cette tension, sa visualisation et des traitements mathématiques variés.

L'autre possibilité consiste à utiliser un oscilloscope classique (l'oscilloscope à mémoire commence tout juste à être présent dans les établissements d'enseignement général). Pour cela le montage expérimental doit être modifié, puisque le phénomène de charge et décharge doit être répété pour que la visualisation soit possible (figure 2).

L'utilisation d'un signal carré fourni par un GBF ne peut que compliquer le montage en introduisant un paramètre parasite : la période du signal carré doit être adaptée au temps de charge pour permettre la visualisation du phénomène. Les deux circuits charge et décharge ne sont plus clairement identifiés. Pour un «apprenti» ces différences sont très importantes.

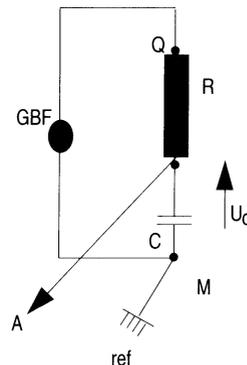
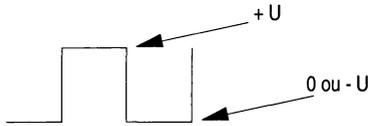


Figure 2 : Charge et décharge d'un condensateur, montage avec oscilloscope

L'analyse du signal carré est de plus perturbante. Le condensateur est-il successivement soumis à des tensions valant 0 et U, ou -U et +U ? Le GBF dispose-t-il d'un «offset» ou pas ?



Autrement dit, est-ce une succession de charges et décharges ou de charges de signes contraires ? Il est impossible d'envisager ces nuances lorsqu'on aborde ces notions pour la première fois avec des élèves. Cela ne se voit pas sur l'écran de l'oscilloscope mais gênera un élève qui réfléchit...

Figure 3 : Tension en créneaux ou signal carré

Si le schéma théorique est le même que le schéma du montage expérimental (premier cas), le lien entre l'expérience et la théorie est plus direct : le phénomène a une durée limitée, cela se voit sur un voltmètre placé entre ref et A si les valeurs sont telles que RC est assez grand ; une étude systématique peut être effectuée dans tous les cas !

Pour l'élève le fait de basculer l'interrupteur et d'observer en «temps réel» la courbe donnant U_c en fonction du temps, de pouvoir modifier R ou C et d'observer immédiatement les résultats est un aspect important.

L'étude peut être complétée en plaçant entre M et B une bobine d'induction afin de montrer l'existence d'oscillations électriques dans un circuit.

Cette étude peut être entreprise très tôt : les seuls concepts nécessaires sont les notions de charge électrique, d'intensité et de tension. Une telle expérience, qualitative, doit pouvoir même aider à l'assimilation de ces concepts.

Quels que soient le logiciel général et l'interface d'acquisition utilisés, en fonction du niveau des élèves, les possibilités de traitement sont très nombreuses : visualisation des variations de l'intensité en mesurant la tension aux bornes d'un conducteur ohmique, calcul des énergies mises en jeu dans ce circuit...

Il serait de plus souhaitable que les élèves aient le temps d'avoir de l'initiative et d'envisager de réaliser d'autres expériences afin de vérifier qu'ils ont bien compris : l'ordinateur devrait permettre une pratique expérimentale plus ouverte. L'option IESP (informatique et électronique en sciences physiques) permet d'envisager actuellement de tels développements.

2.2. L'acquisition de données peut être associée à la simulation. Dans ce domaine, les logiciels ne sont pas très nombreux mais un exemple intéressant concerne la chimie. Le logiciel Simultit (L&I) contient une grande banque de données permettant l'étude quantitative des solutions aqueuses. Les élèves doivent avoir conscience que le logiciel utilise une méthode de calcul pas à pas, basée sur les relations décrivant les solutions aqueuses (cette méthode est décrite dans la documentation). Il permet :

- d'introduire des données expérimentales,
- d'observer l'évolution d'un grand nombre de caractéristiques de la solution définie,
- de comparer les résultats expérimentaux et théoriques.

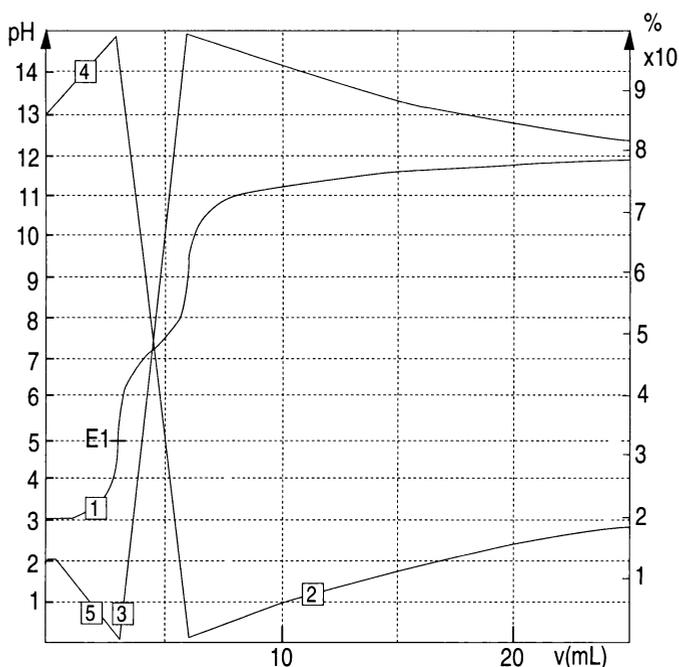


Figure 4 : Dosage de l'acide phosphorique par la soude

Le dosage de l'acide phosphorique du Coca-Cola (programme de spécialité de Terminale Scientifique TS) conduit à étudier une courbe d'évolution du pH : courbe (1) sur le graphe ci-dessus.

Le logiciel permet d'afficher sous forme de pourcentages, les concentrations des différentes espèces acides et basiques mises en jeu (courbes 2 à 5 ; échelle de droite des ordonnées). De tels calculs sont inaccessibles pour des élèves de ce niveau.

De nombreux renseignements peuvent être obtenus à partir de l'étude d'un tel graphique.

La mise en relation du premier point d'équivalence E_1 et de la courbe (5) rappelle qu'en ce point tout l'acide initial a disparu, ce qui justifie le calcul de la concentration à partir de la première équivalence.

Il est aussi possible de donner le graphe aux élèves et de leur demander d'identifier les courbes (2), (3), (4) et (5).

Un autre aspect de ce logiciel concerne l'étude plus générale des solutions aqueuses d'acide et de base. Les acides étudiés ont des pK_a de l'ordre de 3 à 4 et les bases des pK_a de l'ordre de 9 à 11 : pourquoi ce choix ? Il n'est pas seulement justifié par le coût et la facilité d'emploi. Les visualisations de courbes de pH dans des situations «hors normes» (pK_a et concentrations) apportent une réponse théorique : un débutant retiendra plus facilement des courbes dont les caractéristiques sont «caricaturales». Visualiser des situations différentes permet de ne pas se construire de modèles trop figés mais de reconnaître des cas prototypiques comme tels.

Cet aspect est intéressant car il permet de ne traiter complètement que des cas simples tout en montrant d'autres situations, ce qui évite les «généralisations abusives».

Complément indispensable de l'apprentissage expérimental réalisé par les élèves, la simulation peut aussi permettre de concrétiser des situations complètement hors du champ de l'expérience accessible ; le logiciel *Interactive Physics*, malheureusement non traduit actuellement, est une aide précieuse à la représentation des phénomènes, en particulier mécaniques, qui dépendent du référentiel choisi : on peut sortir du champ terrestre pour envisager des situations que l'esprit humain a bien du mal à imaginer et qui sont utiles pour comprendre en quoi les conditions courantes influencent les mouvements observés. Par exemple, un enfant lance verticalement une balle alors qu'il se déplace sur un tapis roulant horizontalement : quel est l'aspect de la trajectoire de la balle pour un observateur sur le tapis ? pour un observateur sur le sol fixe ? On imagine une séance de travaux pratiques consistant à filmer l'expérience sur le trottoir roulant du changement à Montparnasse : on peut «réaliser l'expérience» avec *Interactive Physics* ! Pour le mouvement des planètes, la classe n'aura pas le choix !

2.3. Multimédia et réseaux

Actuellement des produits de culture scientifique destinés à une diffusion grand public apparaissent. Une éducation à la lecture de ce type

de produits de vulgarisation semble nécessaire. Les différents moyens de perception (images fixes et vidéo, lecture de textes et écoute) sont rassemblés sur un même média, ce qui peut contribuer à développer une curiosité scientifique chez les élèves. Ces produits peuvent d'autre part apporter un éclairage nouveau dans des domaines du programme officiel.

Les journaux actuels proposent de plus en plus fréquemment des articles scientifiques souvent bien documentés. Un CDROM comme le «*Défi de l'Univers*» (Ubisoft) qui traite de la structure de la matière s'est beaucoup vendu (plus de 2 000 exemplaires) dès sa sortie en novembre 1995. Ces faits montrent qu'il y a une demande du public.

Nos élèves vont bientôt disposer de ce type de produit. Leur mode d'utilisation dans le cadre d'un établissement scolaire reste à construire. Mais il devient évident que le maître n'est plus la seule source de connaissances. Un de ses rôles pourra consister à aider les élèves à aborder ce type de produit : une introduction historique pourra s'appuyer sur le CDROM «*Galilée*» (Matra-multimédia-Arborescence). Il s'agit là de développer la curiosité des élèves et de les inciter à continuer cette «lecture» au centre de documentation. Ce type de pratique, encouragé par les programmes actuels, se développera sans doute si le temps nécessaire peut lui être consacré.

De même un travail sur documents en classe peut s'appuyer sur plusieurs sortes de documents, et en particulier sur ces produits. On peut citer deux exemples de banques de données facilitant la recherche d'informations :

– *Radiance* (Prodidact) en est un exemple concernant la radioactivité, utilisable en classes de Première Scientifique et Terminales Littéraire ou de Sciences Économiques et Sociales,

– *CD chimie* (Edusoft), à propos du tableau périodique des éléments, associe textes scientifiques, images fixes ou animées et sons.

Dans un domaine voisin, les grands musées scientifiques, Palais de la Découverte ou Cité des Sciences et de l'Industrie, organisent des expositions temporaires souvent très appréciées. Un des moyens d'en faire bénéficier le plus grand nombre, moyen utilisé pour des expositions artistiques (Cézanne ou Brancusi), consiste à numériser les informations. Le support de communication pourra, au choix, être le CDROM ou un réseau de type Internet. Dans ce cadre, Le Palais de la Découverte, en co-édition avec Quaternaire et Productions Laforêt, édite un catalogue interactif de l'exposition Aspirine. Compte tenu du programme de chimie de TS, on peut penser que cet outil sera très utile aux enseignants et à leurs élèves.

Cet aspect va se développer du fait de l'essor des supports CDROM et des réseaux. Un des premiers usages des réseaux en physique-chimie pourrait être un développement du travail coopératif avec la mise à disposition en ligne de ressources pédagogiques parmi lesquelles l'enseignant choisirait ce qui correspond à ses besoins.

Le réseau Internet a le mérite d'exister. Une des priorités des «autoroutes de l'information» consiste à faire en sorte que le secteur éducatif soit présent. Le Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche a ouvert un serveur¹ fournissant des informations générales, dont une liste concernant le réseau scolaire et permettant des accès aux serveurs académiques comme ceux de Bordeaux, Dijon et Toulouse. Ces deux derniers offrent, pour la physique-chimie, des documents pédagogiques téléchargeables. Celui de Dijon propose en plus des images dans le domaine de la mécanique et un logiciel pour l'étude des couleurs et les illusions d'optique.

L'académie de Toulouse² a ouvert dès octobre 1995 un serveur proposant, entre autres, un ensemble assez complet de documents sur les programmes de physique-chimie des classes de seconde à terminales. Ces documents avaient été élaborés par des enseignants de cette académie sous la responsabilité de leur Inspecteur Pédagogique Régional. La consultation de documents en ligne est encore à l'état de projet.

3. QUELQUES QUESTIONS À PROPOS DE CES DÉVELOPPEMENTS

Un enseignant plongé dans ces activités nouvelles a le sentiment d'enrichir son travail au profit des élèves. Un regard extérieur sur la façon dont est perçue cette évolution de la part des élèves semble souhaitable. Les travaux menés par les équipes de l'INRP (Beaufils, 1991), en particulier, apportent un éclairage plus global. De même, une étude (Weil-Barais, 1994) a permis de mettre en évidence l'apport des enseignants ayant eux-mêmes un rôle de formateur. Ces enseignants savent transmettre l'esprit de recherche et de curiosité scientifique qui les anime ; le fait que, pour convaincre leurs collègues, ils leur fournissent des outils «prêts à l'utilisation» modifie cet esprit. Une utilisation pour les élèves sans transposition de documents destinés à la formation «technique», nécessaire, des enseignants conduit à des pratiques pédagogiques où l'élève peut exécuter les actions demandées sans comprendre la démarche expérimentale et le phénomène physique étudié. Cette observation pose des questions en particulier quant

1 www.edutel.fr

2 www.ac-toulouse.fr

à la formation des enseignants. L'usage de l'ordinateur joue aussi peut-être le rôle de révélateur de pratiques pédagogiques. Chacun sait qu'il existe des documents élèves de type «presse-boutons» : ce type de document constitue-t-il une étape dans l'appropriation de l'outil ou un révélateur de démarches pédagogiques préexistantes ?

Ces questions sont importantes car, des réponses qu'on y apporte, dépend la stratégie de formation qu'il convient d'adopter. Des réflexions à ce sujet ont déjà eu lieu (Ministère de l'Éducation nationale, 1994). Un groupe de travail piloté par le bureau des technologies nouvelles pour l'enseignement se penche sur la question de l'utilisation de l'ordinateur en travaux pratiques de physique-chimie. Une publication fera bientôt le point sur cette question en proposant différentes démarches pédagogiques sur des thèmes identiques. Il est probable que les termes de la question évoluent, en particulier avec la généralisation de ce type de pratique.

Pour revenir sur la simulation, la réflexion a conduit de nombreux auteurs et en particulier D. Beaufils (1991, 1995) à insister sur la nécessité pour les élèves de connaître le principe de fonctionnement du modèle utilisé par le logiciel. En effet la simulation dont il est question consiste principalement à faire fonctionner un modèle régissant un phénomène physique afin de visualiser des grandeurs caractérisant le phénomène étudié dans des situations variées. Cet aspect est tout à fait important, y compris pour les enseignants ; il doit être intégré dans les programmes et pris en compte dans les formations. L'enseignant doit pouvoir disposer d'informations sur le modèle et ses limites. Il serait dangereux de «faire une confiance aveugle» aux résultats donnés par la machine. On sait que les méthodes numériques peuvent produire des résultats aberrants. Le point important reste que l'enseignant doit pouvoir disposer, à ce niveau d'enseignement, d'outils simples adaptés à ses besoins en physique et chimie.

4. CONCLUSION

L'ATIDEX est aujourd'hui présent comme instrument pédagogique irremplaçable dans la plupart des lycées, avec des équipements qui permettent de plus en plus une réelle pratique par les élèves. Ces développements ont servi de révélateur pour de nombreux aspects de l'enseignement expérimental et peuvent aider à préciser les objectifs de cet enseignement. Les nombreux échanges entre les différents organismes intéressés par ce sujet, les académies et les services du Ministère de l'Éducation nationale contribuent à assurer le suivi de cette évolution.

BIBLIOGRAPHIE

- BEAUFILS D. (1991). *Ordinateur outil de laboratoire dans l'enseignement des sciences physiques, propositions pour la construction d'activités, première analyse des difficultés et des compétences requises chez les élèves de lycée*. Thèse, Université Paris 7, LIREST.
- BEAUFILS D. (1995). *Propositions de contribution aux programmes des classes de lycée*. Paris, INRP.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Hors-série du 24 septembre 1992*. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.
- EINSTEIN A. (1990). *Conceptions scientifiques* (première édition 1940). Paris, Flammarion.
- GROUPE EVARISTE (1995). *Physique-chimie, physique et électronique*. Reims, CRDP.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). *La physique, la chimie, l'ordinateur*, volume 1, pp. 9-11. Reims, CRDP.
- UNION DES PHYSICIEENS (1994). *Actes des Sixièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, 20-22 mars 1994. Paris, UDP et INRP.
- WEIL-BARAIS A. (1994). *Étude de l'impact de l'utilisation d'outils informatiques par les élèves en sciences physiques*. Paris, Université Paris 7, LIREST.

On peut citer également :

BULLETINS DE L'UDP (Union des Physiciens, 44 Boulevard Saint-Michel, 75270 Paris cedex 06) ; parmi les plus récents numéros :

n° 754 (mai 1993) spécialement consacré à l'acquisition et au traitement de données.

n° 755 (juin 1993) : deux articles à propos de la modélisation ; un article à propos du traitement des incertitudes.

n° 758 (novembre 1993) : deux articles à propos de l'utilisation des images ; un article à propos du logiciel Cristal.

n° 759 (décembre 1993) : de nombreux articles correspondant à la mise en place de l'option Informatique et Électronique en Sciences Physiques.

n° 761 (février 1994) : de nombreux articles correspondant à la mise en place des nouveaux programmes de seconde (traitement du son...).

n° 762 (mars 1994) : un article à propos des capteurs CCD ; deux articles à propos des moteurs (nouveau programme de Première Scientifique).

n° 776 (juillet 1995) : un article à propos d'Internet ; un article à propos des couples acide base.

n° 778 (novembre 1995) : un dossier rassemblant les propositions de l'UDP à propos de «l'introduction d'outils informatiques et audiovisuels dans l'enseignement des sciences physiques au lycée» et de la «formation des maîtres à l'utilisation de moyens informatisés».

Un grand nombre de brochures sont publiées dans les académies (CRDP, MAFFEN ou centre de ressource). Elles font état des nombreux travaux réalisés dans les académies.

Questions posées par la conception et la réalisation d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie

Monique SCHWOB, François-Marie BLONDEL

Institut National de Recherche Pédagogique
Technologies Nouvelles et Éducation
91, rue Gabriel Péri
92120 Montrouge, France.

Résumé

La conception d'un logiciel éducatif suppose la mise en œuvre de connaissances relevant de plusieurs domaines : l'informatique, et plus particulièrement la représentation des connaissances et les interfaces homme-machine, la didactique, la psychologie cognitive, les sciences de l'éducation, pour ne citer que les principaux.

À l'occasion d'un projet portant sur la résolution de problèmes de chimie, la conception et la réalisation d'un environnement d'apprentissage interactif ont remis en avant quelques questions, connues pour la plupart, mais vues sous un angle différent. Dans ce texte, nous présentons certaines de ces questions, à la frontière entre la didactique et l'ergonomie cognitive, ainsi que quelques-unes des réponses possibles : quel espace de connaissances pour le problème de chimie ? Quelle est la nature de la complexité de ce problème pour les élèves ? Quel langage permet de représenter le système physico-chimique associé à une réaction ? Comment représenter l'aspect temporel et dynamique de la réaction ?

Mots clés : *chimie, environnement d'apprentissage, réaction chimique, représentation des connaissances, résolution de problèmes.*

Abstract

The design of educational software involves the construction of knowledge bases requiring input from several areas of research : computer science, more specifically knowledge representation, human-computer interaction, didactics, cognitive science and pedagogy to mention only the major ones.

This project of conceiving and implementing an interactive learning environment for problem solving in the field of chemistry gives the opportunity to put forward a few questions most of which have been asked before, but are considered here under a different angle. In this paper, we introduce some of the questions bordering didactics and cognitive ergonomics as well as a few of the possible answers. What is the knowledge space for a chemistry problem ? What is the complexity level of this problem for the students ? What languages enable us to represent the physico-chemical system associated to a reaction ? How can the temporal and dynamic aspect of the reaction be represented ?

Key words : *chemistry, learning environment, chemical reaction, knowledge representation, problem solving.*

Resumen

La realización de un programa informático educativo supone la implementación de conocimientos relativos a varios dominios : la informática, y particularmente la representación de conocimientos y las interfases hombre-máquina, la didáctica, la psicología cognitiva, las ciencias de la educación, por no citar que las principales.

En la ocasión de un proyecto que trata sobre la resolución de problemas en química, la concepción y realización de un medio de aprendizaje interactivo, llevé ante todo a la proposición de algunas preguntas, conocidas por la mayoría, pero vistas bajo un ángulo diferente. En este texto, presentamos algunas de esas preguntas, en la frontera entre la didáctica y la psicología cognitiva del trabajo, así como algunas de las respuestas posibles : ¿ Cuál espacio de conocimientos para el problema de química ? ¿Cuál es la naturaleza de la complejidad de este problema para los alumnos ? ¿ Qué lenguaje permite representar el sistema físico-químico asociado a una reacción ? ¿ Cómo representar el aspecto temporal y dinámico de la reacción ?

Palabras claves : *química, medio de aprendizaje, reacción química, representación de conocimientos, resolución de problemas.*

1. INTRODUCTION

La conception et la réalisation d'un environnement informatique destiné à l'apprentissage soulèvent des questions qui relèvent de plusieurs disciplines : informatique, didactique, sciences cognitives, sciences de l'éducation. Cette approche multidisciplinaire, souvent difficile à mettre en

pratique dans un projet, fait apparaître de nouveaux questionnements d'une discipline vers une autre (Bruillard & Vivet, 1994).

Le projet d'environnement interactif d'apprentissage avec ordinateur (EIAO) sur lequel nous travaillons, essaie de combiner au moins deux points de vue disciplinaires, l'un plus informatique, puisqu'il s'intéresse aux capacités des techniques actuelles de représentation et de manipulation des connaissances, et l'autre plus didactique, en ce sens qu'il se préoccupe de l'informatisation des instruments qui sont utilisables dans l'enseignement.

Des constatations d'ordre didactique sont à l'origine de ce projet. Les difficultés rencontrées par les élèves pour résoudre les problèmes de chimie quantitative ont fait l'objet de nombreuses analyses ; les difficultés de l'enseignement des concepts liés à ce sujet sont également connues.

Concevoir un environnement d'aide à la résolution de ces problèmes met d'abord en avant des questions de représentation des connaissances, d'interface homme-machine, d'adaptation à l'utilisateur. Réaliser un prototype, ou un produit, conduit aussi à effectuer de nombreux choix, à prendre un grand nombre de décisions, en général très locales, relatives à un aspect très particulier du logiciel. L'ensemble de ces décisions, qui fait partie de la phase de spécification dans le processus de développement d'un projet tel qu'on l'envisage habituellement en génie logiciel, est plus délicat à expliciter dans un projet de logiciel éducatif. Si une partie de ces choix peut s'appuyer sur des connaissances reconnues en didactique ou sur les savoir-faire des enseignants, il n'en reste pas moins qu'une autre partie reste un peu plus arbitraire, et par conséquent moins explicite.

Dans le domaine de la psychologie, Mendelsohn (1995), à propos du travail qui a conduit à MEMOLAB, insiste également sur la difficulté de concilier les quatre conceptions de la notion de modèle :

*«le modèle pour comprendre le fonctionnement cognitif des psychologues,
le modèle pour réguler la situation d'enseignement des pédagogues,
le modèle pour analyser les savoirs du didacticien,
le modèle calculable pour représenter les connaissances du chercheur en intelligence artificielle.»*

Dans un article sur les relations entre didactique des mathématiques et informatique, N. Balacheff (1994) propose le terme de *transposition informatique* pour désigner «*ce travail sur la connaissance qui en permet une représentation symbolique et la mise en œuvre de cette représentation par un dispositif informatique*». Il remarque à cette occasion que ce travail conduit à une explicitation de contenus d'enseignement restés implicites dans les pratiques, voire à la création de nouveaux objets, prenant pour exemple les environnements fondés sur la modélisation d'un «*agent rationnel mathématicien*».

Au-delà de la transposition informatique qui reste fondamentale, il nous semble que d'autres questions sont soulevées par la conception d'environnements informatiques d'apprentissage. Notre intention est d'évoquer ici, à partir du projet sur lequel nous travaillons, plusieurs interrogations nouvelles qui concernent la didactique de la chimie et qui ont émergé non seulement pendant la phase de conception de l'environnement mais aussi pendant celle de son développement.

Nous allons tenter d'expliquer en quoi la conception et la réalisation d'un logiciel éducatif peuvent mettre en avant, quelquefois de façon très pointue, des questions connues, ou moins connues, portant sur l'enseignement d'une discipline, sur les pratiques qui s'y rattachent, sur les savoirs et les savoir-faire réellement mis en jeu dans ces problèmes. Nous verrons à cette occasion que ces questions peuvent remettre en cause non seulement les choix initiaux du projet mais aussi, d'un point de vue plus didactique, les problèmes et la manière de les aborder indépendamment de tout environnement informatique.

2. ANALYSE DU DOMAINE : LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES DE CHIMIE QUANTITATIVE

2.1. Les programmes d'enseignement et la pratique enseignante

2.1.1. Le statut des problèmes de chimie quantitative

Nombre d'enseignants – et les programmes actuels de chimie de l'enseignement secondaire de lycée – affirment la primauté d'une approche expérimentale, voire qualitative de la chimie. Toutefois, les problèmes de chimie quantitative (ou «stœchiométriques»), plus souvent appelés «exercices» dans la pratique quotidienne des enseignants, sont un élément central de la coutume de l'enseignement. Il s'agit d'exercices qui s'appuient sur l'équation-bilan d'une réaction chimique et ont pour objet le calcul de la quantité d'un réactif ou d'un produit, connaissant la quantité d'un autre réactif ou produit de la réaction. L'usage répété de ces exercices apparaît comme un peu paradoxal, d'autant que leur résolution ne fait pas réellement l'objet d'un apprentissage.

Si l'on s'en tient aux programmes récemment publiés (BOEN, 1992), on relève un certain nombre de directives concernant ce sujet. Dans les compétences (exigibles ou non) en cours d'apprentissage, à propos de la «conservation des éléments au cours d'une réaction chimique», on trouve :

- «– Faire des bilans en raisonnant en quantité de matière (en moles)
- Utiliser la mole comme unité de quantité de matière et connaître son symbole (mol)
- Relier les quantités de matière aux masses et, dans le cas des gaz, aux volumes
- Équilibrer l'équation-bilan d'une réaction chimique en liaison avec la notion de mole»

assorti de ce commentaire :

«L'interprétation des réactions chimiques en moles sera effectuée sur les exemples de réactions étudiées dans la première partie. Il s'agit d'un apprentissage à ce niveau qui sera repris dans la troisième partie et deviendra une exigence seulement en classe de terminale scientifique.»

Cet objectif à moyen terme, qui n'est censé devenir une exigence qu'à la fin des études secondaires, est confirmé par un commentaire contenu dans le préambule des contenus de programmes proprement dits :

«Les exercices sur les raisonnements en quantités de matière (en moles) feront l'objet d'un apprentissage qui se continuera en classe de première et de terminale scientifique : l'objectif n'étant pas seulement d'acquérir une certaine dextérité sur la proportionnalité et sur le maniement de la calculatrice.»

Toutefois la pratique de ces exercices est relativement développée dès la classe de seconde. Les manuels scolaires en proposent de façon systématique. On trouve dans les manuels récents («nouveaux programmes») des fiches méthodologiques concernant l'utilisation de l'équation-bilan pour résoudre des exercices de chimie. On remarquera que cette tendance apparue dans une précédente édition des manuels en 1987 se généralise dans les éditions actuelles. Les éditions antérieures ne prenaient jamais en compte la nécessité d'enseigner une «méthode de résolution» de ce type d'exercices. Nous faisons l'hypothèse que cela correspond à l'identification d'un véritable problème d'enseignement de la part des enseignants, repris à leur compte par les auteurs de manuels. Ce problème est d'ailleurs encore d'actualité jusqu'à un niveau d'enseignement élevé (Mey et al., 1994). Cela confirme par ailleurs l'analyse (observation de classes, analyse de productions d'élèves, entretiens) que nous avons menée au début de ce travail.

2.1.2. La nature des problèmes de chimie quantitative

Ces problèmes, ou exercices, s'appuient sur une réaction chimique, le plus souvent unique et considérée comme totale (jusqu'à l'étude des

équilibres chimiques). Ces réactions peuvent avoir été vues en classe, soit expérimentalement soit de façon plus théorique pour illustrer certaines parties du cours. Dans d'autres cas elles sont inconnues des élèves, ainsi que, dans certains cas, les substances qu'elles mettent en jeu. On admet en général que des élèves en fin de seconde doivent «connaître» une vingtaine de substances chimiques, cette connaissance consistant à être capable d'identifier le nom, lui faire correspondre la formule (ou *vice versa*), de connaître l'état physique de la substance dans les conditions usuelles et une ou deux de ses propriétés physiques et chimiques essentielles. Par contre l'observation des pratiques et des manuels scolaires montre qu'un nombre beaucoup plus important de substances sont citées, décrites voire utilisées en travaux pratiques. Si les premiers exercices proposés portent sur des réactions qui ont, en général, été étudiées en classe ou en travaux pratiques, on remarque que très fréquemment les enseignants et les manuels proposent des exercices formellement équivalents, mais qui s'appuient sur des réactions différentes, souvent inconnues des élèves.

Les énoncés des exercices, tels qu'ils apparaissent dans les manuels, impliquent un grand nombre de connaissances implicites. Celles-ci peuvent porter sur la plupart des éléments nécessaires à la représentation du problème et à sa résolution : nature de certains corps mis en jeu dans la réaction, équation-bilan, conditions stœchiométriques ou non, conditions et caractéristiques physiques. Dans certains cas, lorsque ces problèmes sont utilisés à des fins d'évaluation, une partie de l'exercice peut consister à élucider ces implicites ou à mobiliser les connaissances nécessaires, considérées comme faisant partie de «la leçon». Dans la plupart des cas toutefois, il est probable que cette description très partielle de la situation physico-chimique nécessaire à la résolution de l'exercice est un obstacle majeur pour les élèves.

La résolution implique l'écriture d'une équation-bilan équilibrée (remarquons au passage que ce terme d'équation-bilan est propre à l'enseignement), et consiste à «faire fonctionner» cette équation. Les «données» de l'exercice, qui correspondent à une instanciation particulière de cette équation, sont une, ou deux valeurs initiales ou finales de grandeurs extensives : masse, volume, quantité de matière d'un ou plusieurs réactifs ou produits. La question posée consiste le plus souvent à calculer une quantité nécessaire d'un autre réactif ou une quantité de produit formé.

Les méthodes proposées par les enseignants et les manuels sont assez semblables dans leur principe, même si elles varient sensiblement dans leur présentation. Elles utilisent toujours la grandeur «quantité de matière» considérée comme centrale dans toutes ces résolutions. Elles s'appuient toutes sur l'expression d'une proportionnalité directement déduite de l'équation-bilan. On ne rencontre qu'exceptionnellement l'utilisation de

relations traduisant directement des lois de conservation de la masse, conservation que les élèves mobilisent toutefois, à bon escient ou non, même lorsqu'on ne les leur a pas enseignées.

Remarquons enfin que ces exercices quantitatifs sont, contrairement à l'enseignement de la physique, relativement atypiques dans l'enseignement de la chimie qui, à ce niveau, est surtout descriptif et qualitatif.

2.2. Le contexte didactique : un aperçu des recherches sur le domaine

2.2.1. De la résolution de problèmes...

Divers travaux témoignent de la permanence des préoccupations soulevées par la résolution des problèmes de chimie quantitative dans l'enseignement des pays occidentaux. Certains auteurs, dans le cadre général de travaux sur la résolution de problèmes, ont analysé de façon détaillée les difficultés des élèves au cours de la résolution des problèmes de stœchiométrie (Frazer, 1982 ; Frazer & Sleet, 1984 ; Frazer & Servant, 1987 ; Kramers-Pals et al., 1982). Ces analyses confirment les études que nous avons pu faire sur ce même sujet au début de notre travail (Blondel et al., 1992). D'autres travaux, anglo-saxons pour la plupart, proposent diverses méthodes de résolution ou des propositions d'enseignement. Reif (1983) en particulier insiste sur la nécessité de disposer de procédures générales de résolution, mais aussi d'une base de connaissances du domaine qui doit permettre de faciliter la mise en œuvre de ces procédures. Il met également l'accent sur les comportements et les difficultés des enseignants, et sur la relative inefficacité des procédures d'enseignement traditionnelles. Il propose d'enseigner explicitement des méthodes de résolution (comment décrire un problème, comment faire des choix, comment tester des solutions), au nombre desquelles on trouve des méthodes d'organisation et d'accès à de grandes bases de connaissances.

2.2.2. ... à la maîtrise des concepts

Dans les années 1990, une nouvelle approche des problèmes posés par cet enseignement s'est fait jour. Les titres de plusieurs articles – «*Concept Learning versus Problem Solving : Is There a Difference ?*» (Nurrenbern & Pickering, 1987), «*Concept Learning versus Problem Solving : revisited*» (Sawrey, 1990), «*Problem Solving and Requisite Knowledge of Chemistry*» (Lythcott, 1990), «*Concept Learning versus Problem Solving, There is a Difference*» (Nakhleh & Mitchel, 1993) – marquent bien cette prise de conscience résumée par Goffard (1993) : enseigner des algorithmes

de résolution ne suffit pas, les élèves savent éventuellement résoudre des problèmes de type algorithmique sans que pour autant les concepts de base de la chimie soient acquis.

Cette tendance est sans doute à rapprocher des très nombreux travaux qui, en particulier en France, se sont penchés sur les conceptions des élèves relatives à la réaction chimique et à d'autres concepts qui lui sont attachés : structure de la matière et ses transformations (Méheut, 1982, 1989 ; Méheut et al., 1985), état physique (Séré, 1985, 1986) et changement d'état, conservation au cours de transformations physiques ou chimiques (Séré & Tiberghien, 1989), la matière à l'état microscopique.

Dans une revue de ces travaux (Anderson, 1990), Anderson regroupe en cinq catégories les explications («*modèles de transformation*») des élèves concernant les transformations chimiques mais également les changements d'état et les notions de conservation (liées aux conceptions sur les transformations de la matière). Parmi ces cinq catégories (la «*disparition*», le «*déplacement*», la «*modification*», la «*transmutation*» et «*l'interaction chimique*»), seule la cinquième, très minoritaire chez les élèves de niveau secondaire est «chimiquement» acceptable pour interpréter des réactions chimiques. Les quatre premières s'appuient sur une description continue et statique de la matière et obligent les élèves à proposer des modèles interprétatifs où chaque substance change sous l'action d'agents extérieurs.

Plus récemment, deux études (Stavridou, 1990 ; Solomonidou, 1991) ont montré que la construction et le fonctionnement du concept de réaction chimique dépendent de la construction du concept scientifique de substance qui ne serait pas acquis même à la fin de l'enseignement secondaire. L'une des conséquences de cette lacune est que cela «*empêche les élèves d'établir des correspondances satisfaisantes entre les entités du niveau manipulatoire (substance) et celles du niveau atomique (molécule)*» (Solomonidou & Stavridou, 1994).

Laugier (Laugier & Dumon, 1994), comme Gabel précédemment (Gabel, 1993), distingue trois niveaux pour enseigner la réaction chimique (macroscopique, microscopique et symbolique). L'enseignement traditionnel se situe essentiellement au niveau symbolique, l'évaluation par la résolution de problèmes renforçant cette approche. Il fait l'hypothèse qu'un enseignement qui mettrait l'accent sur le niveau microscopique (la représentation particulière ne pouvant s'enseigner que par rapport à une phénoménologie précise avec le symbolisme et le langage correspondant), permettrait à l'élève de progresser simultanément sur les trois niveaux.

On notera enfin que certains concepts, indispensables à la compréhension de la réaction chimique au niveau symbolique, n'ont fait

l'objet que de peu d'études théoriques. Seul le concept d'élément chimique a été étudié par Martinand (Martinand & Viovy, 1979 ; Martinand, 1986) après son introduction dans l'enseignement du collège mais, à notre connaissance, aucune recherche spécifique au niveau de l'enseignement des lycées n'a été menée sur ce sujet. Tous les enseignants savent pourtant que c'est un concept très complexe ; l'observation des manuels scolaires montre à quel point cette notion y est présentée de façon plus ou moins floue et interfère avec des concepts connexes (molécule, conservation...) et les niveaux de description macroscopique et microscopique de la réaction chimique et de l'équation-bilan.

Hatab remarque d'ailleurs (Hatab, 1995) que ce concept n'apparaît pas dans l'enseignement de certains pays (anglo-saxons en particulier) qui assimilent, au niveau de l'enseignement secondaire (et peut-être universitaire), la notion d'élément à celle de corps pur. L'enseignement français revendique la distinction entre les deux concepts, sans que pour autant les programmes officiels soient très explicites sur ce sujet.

Quant aux difficultés du concept de quantité de matière, elles sont souvent évoquées (Bernard, 1978 ; Gourmelon, 1978 ; Chaussin, 1983 ; Sabana, 1993 ; Gorin, 1994 ; Krishnan & Howe, 1994) mais, à notre connaissance, n'ont pas fait l'objet de recherches didactiques approfondies.

L'ensemble de ces travaux et leur évolution montre bien la diversité des approches et la complexité des concepts susceptibles d'être mobilisés au cours de la résolution d'un problème de chimie quantitative classique.

Notre propre travail a partiellement suivi cette évolution : notre point de vue initial était principalement axé sur la résolution de problèmes et le diagnostic des erreurs de l'élève. Le travail de réflexion qui a accompagné l'élaboration de l'environnement d'apprentissage, et en particulier de l'interface, nous a amenés à prendre en compte de façon beaucoup plus significative les problèmes didactiques des représentations et des concepts inhérents au domaine considéré. Toutefois, comme on aura pu le constater par la revue des recherches ci-dessus, beaucoup des concepts fondamentaux de la réaction chimique n'ont pas fait l'objet de recherches didactiques approfondies au niveau d'enseignement qui nous intéresse. Nous verrons que certaines recherches seraient indispensables à la poursuite de notre travail. En revanche, nous allons essayer de montrer en quoi la modélisation informatique que nous avons été amenés à faire peut apporter un éclairage nouveau à certains de ces problèmes didactiques.

3. UN LOGICIEL D'AIDE À LA RÉOLUTION DE PROBLÈMES EN CHIMIE

Nous avons fait l'hypothèse que les possibilités de formalisation de la résolution de problèmes avec les connaissances actuelles de l'informatique, et en particulier les méthodes de représentation des connaissances empruntées à l'intelligence artificielle, ainsi que les possibilités de conception d'interfaces, pouvaient faciliter la création d'environnements ouverts, dans lesquels l'élève s'exerce à résoudre tout en bénéficiant d'un guidage discret¹.

Les questions initiales étaient les suivantes : quel genre d'outils logiciels proposer aux élèves pour résoudre ou pour les aider à résoudre ? Plus précisément, au-delà de la résolution au sens strict, quels outils leur proposer pour définir la situation, représenter le problème, explorer cette situation, rechercher des solutions, rédiger le résultat de cette recherche ?

Nous avons délibérément choisi de ne pas utiliser une base d'exercices pour accompagner le logiciel. L'élève et le résolveur sont donc au départ dans une situation équivalente : chacun commence dans le même état et avec les mêmes informations sur le problème posé. La différence réside dans les connaissances générales dont dispose le logiciel, voisines de celles que l'on enseigne, et non sur des connaissances spécifiques à l'exercice considéré. Nous faisons l'hypothèse que ce choix favorise l'interaction : l'élève ne peut pas attendre du logiciel qu'il finisse le travail à sa place, ce qui est toujours le cas dans les logiciels trop explicitement « pédagogiques » ou dans de nombreux tuteurs. De plus, le recours à une base d'exercices introduit un biais dans l'analyse de l'énoncé ; en effet, dans cette situation, le logiciel peut disposer d'informations « cachées » sur l'énoncé. Quant à analyser automatiquement le texte des énoncés pour en tirer une représentation du problème, le travail de Tisseau sur la modélisation des énoncés en thermodynamique a montré les réelles difficultés de cette approche (Tisseau, 1990).

3.1. La version actuelle de l'environnement d'apprentissage

Le prototype que nous avons élaboré (dénommé SCHNAPS dans la suite) porte sur un environnement complet qui doit fournir à l'élève un cadre de travail adapté à diverses situations d'enseignement et divers niveaux.

¹ Le guidage discret (*coaching*) est employé pour désigner les logiciels d'apprentissage ouverts qui prennent l'initiative d'apporter une aide ou un conseil à l'utilisateur au cours de son travail.

Cet environnement comporte des données de référence, des outils de manipulation et de résolution et des fonctions de diagnostic ; des fonctions d'aide et de conseil sont en cours d'élaboration.

Le travail de l'élève dans cet environnement comporte deux phases distinctes : une phase de description de la situation physico-chimique, et une phase de résolution.

3.1.1. Phase de description de la situation physico-chimique

La première phase consiste à définir la situation physico-chimique à partir de l'énoncé du problème (connu par l'élève mais inconnu du système). Cette étape conduit l'élève à l'écriture d'une équation-bilan qu'il doit ensuite équilibrer. Le passage à la deuxième phase (de résolution) ne peut se faire, dans l'état actuel du logiciel, que si l'équation est équilibrée.

Cette définition de la situation physico-chimique porte essentiellement sur la description des corps et de la réaction chimique et se fait par l'intermédiaire de menus. On se rend compte à cette occasion que très peu de données interviennent pour la résolution quantitative elle-même : l'état physique de chacun des corps (qui n'est d'ailleurs pas toujours nécessaire), les quantités de matière fixées dans l'énoncé (ou leurs équivalents), et, éventuellement, les conditions de température et de pression. La formule des corps est nécessaire pour l'équilibrage de la réaction et le calcul des masses molaires ; elle n'est même plus utile pour calculer les quantités à partir du moment où les nombres stœchiométriques² sont connus. Quelques informations supplémentaires (nombres d'oxydation) seraient nécessaires pour équilibrer certaines réactions d'oxydoréduction.

Le choix d'un environnement ouvert, où la seule connaissance que le logiciel a du problème provient de la description qu'en fait l'élève, nous a conduits à contrôler la vraisemblance chimique des déclarations faites par l'élève, en particulier sur les corps et sur les réactions. Nous avons pour cela constitué une base de données destinée à aider l'élève dans l'écriture de la réaction et à contrôler les informations qu'il introduit. Cette base contient des informations sur quelque 600 corps et 400 réactions. L'ampleur relative de cette base de données, nécessaire pour couvrir à peu près l'ensemble des substances et des réactions susceptibles d'être évoquées dans l'enseignement, est très révélatrice des pratiques des enseignants.

La représentation interne de la situation (le problème) comprend d'une part des structures, analogues à des objets, qui décrivent les caractéristiques des corps et les aspects physiques de la réaction, et d'autre part les

² L'utilisation de l'expression « nombre stœchiométrique » est recommandée de préférence à « coefficient stœchiométrique » systématiquement employée dans l'enseignement (AFNOR, 1976, 1979).

relations générales (relations entre grandeurs physiques et relations de conservation), relations instanciées pour chacun des objets présents dans le problème.

Pour répondre à certaines questions portant sur le volume total de gaz produit ou pour calculer la concentration initiale ou finale d'un ion, il est nécessaire de préciser le «système» qui décrit ces conditions physiques, c'est-à-dire dans quelle phase (solide, liquide ou gaz) ou dans quel état (en solution ou non) se trouve chaque substance ou espèce chimique. Dans SCHNAPS, le «système physico-chimique» est une structure de données qui comprend, pour chaque état, la liste des corps qui s'y rattachent, ce qui permet de définir de façon précise les grandeurs associées à chacun de ces états, comme le volume total de gaz avant la réaction ou le volume de la solution après la réaction. Cette représentation interne permet de prendre en compte les valeurs de la température, de la pression ou du volume, si l'on n'est pas dans les conditions normales de température et de pression (CNTP). La première version de SCHNAPS, développée avec une interface en mode texte, n'avait pas permis de résoudre correctement la question de la représentation externe de ce système ; ceci est en cours dans la nouvelle version qui possède une interface de type graphique.

3.1.2. Phase de résolution

La deuxième phase du travail de l'élève consiste alors à résoudre le problème, à l'image de ce qu'il ferait sur une feuille de papier. L'interface de recherche et de rédaction comprend des outils pour que l'élève puisse introduire les données quantitatives initiales, nommer les grandeurs instanciées, calculer toutes les grandeurs dérivées avec une syntaxe proche de celle des calculettes, unités en plus, et déclarer la stœchiométrie.

Un résolveur interne calcule alors toutes les grandeurs calculables dans le problème : masses, quantités, volumes, concentrations. Cette résolution par le système s'effectue en deux temps : (1) l'analyse des données initiales (provenant de l'énoncé fourni par l'élève) qui permet de déterminer les conditions stœchiométriques ou non, et par conséquent le corps qui va fixer les quantités des autres corps de la réaction, (2) la propagation de ces valeurs initiales dans le réseau de relations instanciées.

À première vue, le nombre de relations générales qui permettent de résoudre le problème est assez réduit.

Pour les relations entre composés différents, et si, conformément aux habitudes des enseignants, on ne fait pas intervenir de relation de conservation de la masse (Lavoisier), il n'y en a qu'une, la relation entre quantités de matière :

$$\frac{\text{quantit } 1}{\text{nombre stœchiométrique 1}} = \frac{\text{quantit } 2}{\text{nombre stœchiométrique 2}}$$

qui se réécrit dans une version simplifiée dans le cas des gaz :

$$\frac{\text{volume 1}}{\text{nombre stœchiométrique 1}} = \frac{\text{volume 2}}{\text{nombre stœchiométrique 2}}$$

Les relations «de définition» entre grandeurs qui ne portent que sur le même corps chimique sont peu nombreuses :

$$\text{quantité} = \text{masse}/\text{masse molaire}$$

$$\text{quantité} = \text{volume}/\text{volume molaire}^3$$

$$\text{quantité} = \text{concentration} \times \text{volume-solution}$$

Les relations qui indiquent la conservation au sens physique :

$$X_{\text{initial}} - X_{\text{consommé}} = X_{\text{final}} \quad X_{\text{initial}} + X_{\text{produit}} = X_{\text{final}}$$

ne sont pas les mêmes pour les réactifs et pour les produits représentant l'une des trois grandeurs qui peuvent fixer la quantité d'un corps : quantité, masse et volume.

Enfin, il faut y ajouter les relations qui concernent tous les corps qui sont dans la même phase : définition de la masse totale, du volume total, avec les cas particuliers des solutions et les conséquences sur les concentrations finales.

3.1.3. Le diagnostic et l'aide

Un module de diagnostic analyse toutes les actions de l'élève par comparaison avec une base de formules comportant à la fois toutes les formes des relations correctes décrites ci-dessus et certaines formes des erreurs les plus fréquentes ou les plus significatives. La constitution de cette base de formules, justes ou erronées, a été effectuée à partir d'une étude de résolutions effectuées sur papier. L'analyse des expressions algébriques écrites par l'élève se décompose en une reconnaissance des opérandes de l'expression, suivie d'un appariement avec la base de formules. Des heuristiques de choix permettent de sélectionner les meilleures hypothèses de reconnaissance des formules ou des opérandes.

Des aides portant sur les concepts, sur les différentes représentations du problème et sur les méthodes de résolution sont en cours de réalisation. Elles sont associées aux différentes actions possibles ou effectives dans l'environnement. Ces aides devraient soit répondre aux demandes formulées par l'élève, soit apparaître à l'initiative du système en fonction des résultats du diagnostic.

3 Pour un gaz, dans les mêmes conditions de température et de pression.

3.2. Expérimentation et perspectives

Nous n'avons pas cherché à élaborer directement un produit à visée «pédagogique», c'est-à-dire immédiatement utilisable dans les conditions habituelles de l'enseignement. Mais, à chaque étape de son développement, nous avons expérimenté notre prototype dans des situations contrôlées (en classe ou en utilisation individuelle), et ce d'autant plus facilement que l'ensemble fonctionne sur les micro-ordinateurs les plus courants. Des outils ont été élaborés afin de permettre de conserver et de «rejouer» les «traces» du travail des élèves au cours de ces expérimentations (Schwob, 1991).

TRACÉ de la résolution de l'élève : L1

Équation de la réaction :

$$2 \text{KClO}_3 \longrightarrow 3 \text{O}_2 + 2 \text{KCl}$$

Rédaction de la solution :

Soit $m\text{KClO}_3$ la masse de KClO_3 avant la réaction
 Soit $v\text{O}_2$ le volume de O_2 après la réaction
 Soit $m\text{KCl}$ la masse de KCl après la réaction
 L'énoncé demande la masse finale du chlorure de potassium.
 $n\text{KClO}_3 = m\text{KClO}_3 / M\text{KClO}_3$
 $n\text{KClO}_3 / n\text{KCl} = 1$
 $n\text{KClO}_3 = n\text{KCl}$
 Soit $M\text{KClO}_3$ la masse molaire de KClO_3 : 122.5 g/mol
 L'énoncé fournit la masse initiale du chlorate de potassium qui vaut 2.000 g
 $n\text{KClO}_3 = m\text{KClO}_3 / M\text{KClO}_3 \Rightarrow n\text{KClO}_3 = 1.632\text{E}-2 \text{ mol}$
 $1.632\text{E}-2 \text{ mol} = n\text{KCl}$
 $m\text{KCl} = 1.632\text{E}-2 \text{ mol} * M\text{KCl}$
 Soit $M\text{KCl}$ la masse molaire de KCl : 74.55 g/mol
 $m\text{KCl} = n\text{KCl} * M\text{KCl} \Rightarrow m\text{KCl} = 1.217 \text{ g}$
 - - volume de dioxygène dégagé :
 $n\text{KClO}_3 / n\text{O}_2 = 2/3$
 $n\text{O}_2 = (1.632\text{E}-2 * 2) / 3 \Rightarrow n\text{O}_2 = 1.088\text{E}-2$
 $v\text{O}_2 = n\text{O}_2 * V\text{O}_2$
 Soit $V\text{O}_2$ le volume molaire : 22.40 L/mol
 $v\text{O}_2 = 1.088\text{E}-2 * 22.40 \Rightarrow v\text{O}_2 = 0.2437$

Figure 1 : Exemple de rédaction

Cette démarche nous a permis de vérifier régulièrement la pertinence de nos choix et l'adéquation des réalisations.

L'adoption de ce point de vue expérimental entraîne un certain nombre de conséquences. En particulier, l'interface de recherche et de rédaction de la solution a été conçue sous une forme très ouverte et non directive, ceci pour recueillir des informations pertinentes sur les comportements et les

limites des élèves devant de telles interfaces, ainsi que sur les capacités des systèmes actuels à analyser une rédaction assez «libre». Il est possible que, dans la version définitive du produit, certaines des caractéristiques de cette interface soient modifiées.

Sur le plan méthodologique, la démarche que nous avons adoptée est incrémentale pour ne pas étudier toutes les questions à la fois. Les principales étapes ont été les suivantes.

1. Étudier les difficultés des élèves (littérature, examen des copies...).
2. Concevoir une première représentation interne et un résolveur, et réaliser les outils de définition et de résolution.
3. Expérimenter ces outils et les améliorer.
4. Concevoir une représentation des résolutions effectuées avec le logiciel et réaliser les outils d'analyse de ces résolutions (diagnostic).
5. Concevoir et réaliser une aide appropriée.

Cette méthode de recherche sur les logiciels éducatifs a été adoptée par d'autres équipes : E. Delozanne a conçu et expérimenté une maquette (HYPERELISE) pour étudier les explications et l'apprentissage de méthodes en intégration (Delozanne, 1992) ; les travaux du projet APLUSIX qui portent sur plusieurs aspects des environnements d'apprentissage de l'algèbre ont conduit depuis 1987 à plusieurs versions successives sans proposer une solution complète dès le départ (Nicaud, 1994).

Le prototype d'environnement SCHNAPS est actuellement en cours de refonte pour prendre en compte les possibilités de structuration et d'interfaçage graphique offertes par les systèmes d'exploitation récents (Windows) et apporter certaines améliorations suggérées par les expérimentations passées.

4. QUELQUES QUESTIONS POSÉES À LA DIDACTIQUE

La conception et la réalisation de cet environnement nous ont conduits à une analyse inhabituelle de ces résolutions de problèmes de chimie et ont fait émerger plusieurs questions au carrefour des disciplines représentées dans le champ de l'EIAO. Ce sont quelques-unes de ces questions que nous souhaitons évoquer et discuter dans la suite de cet article. Nous parlerons successivement des connaissances nécessaires à l'analyse de l'énoncé, de la complexité des problèmes posés, de la représentation du système chimique, et de la représentation du bilan de la réaction.

Les deux premières questions sont centrées sur les contenus des connaissances et les contextes dans lesquels elles sont transmises, et concernent directement le didacticien. Les deux dernières concernent les relations entre la représentation formelle (interne au système, nécessaire pour la résolution et le choix de l'interaction) et la représentation externe, la seule qui soit visible pour l'élève utilisateur. Elles relèvent de la modélisation informatique et de l'interaction homme-machine mais posent également des problèmes didactiques.

4.1. Quel «espace de connaissances» pour les problèmes de chimie ?

Nous avons vu que les problèmes de chimie concernés par notre travail ne nécessitent, sur le plan strict de la résolution, qu'un très petit nombre de connaissances procédurales. On pourrait même imaginer les réduire à un schéma symbolique très rudimentaire, qui pourrait pourtant servir à résoudre quantitativement la plupart des exercices classiques :

Un corps A réagit avec un corps B, il se forme un corps C et un corps D.

Le fait (rassurant !) que ni les enseignants ni les manuels ne proposent ce type de formalisme confirme que les problèmes de chimie ne prennent leur sens que dans un contexte chimique beaucoup plus complexe. Même si les connaissances correspondantes ne sont pas exigées des élèves (c'est évident !), la question du rôle que joue ce contexte pour l'activité de résolution qui leur est demandée n'est pas indifférente.

Nous avons déjà signalé que la description de la situation expérimentale proposée par les énoncés traditionnels se réduit en général à une liste plus ou moins incomplète des substances qui interviennent dans la réaction et à un verbe qui résume cette «action» (réagit avec, brûle, précipite, il se forme...), quand elle n'est pas limitée à l'écriture directe de l'équation-bilan correspondante. Les élèves ne trouvent donc pas ce contexte, c'est-à-dire la connaissance chimique nécessaire à une bonne représentation du système chimique, dans les énoncés d'exercices.

L'importance relative de la base de données de substances et de réactions que nous avons été amenés à construire (600 substances et 400 réactions relevées presque exclusivement dans les manuels de l'enseignement secondaire classique) nous semble un bon révélateur de l'ampleur de «l'espace de connaissances» auquel l'élève est susceptible de se trouver confronté.

Dans une première approche, cette base de données était destinée à contrôler la vraisemblance des déclarations faites par l'élève et à répondre

à la demande des enseignants de ne pas laisser les élèves travailler sur des données sans signification chimique ou erronées. Il s'est avéré ensuite que la création de cette base nous a obligés à préciser «l'espace de connaissances chimiques» du problème et à nous interroger sur celui de l'élève. Nous faisons l'hypothèse que cette base de données peut participer à la construction de cette représentation du problème par la mise à disposition de l'élève de certaines des connaissances qui lui manquent. Il ne s'agit toutefois que d'une formalisation très simple, voire simpliste. Il apparaît très rapidement que ces limites ne peuvent être dépassées sans un travail de recherche fondamentale sur ce sujet.

Nous avons déjà évoqué le statut ambigu des problèmes de chimie quantitative dans l'enseignement. Les contraintes de ce que nous pourrions appeler la «mise en logiciel» ou, selon l'expression de N. Balacheff, la «*transposition informatique*» nous permettent de préciser certaines causes de cette ambiguïté.

Notre hypothèse est qu'elle traduit la spécificité de la connaissance chimique caractérisée par la primauté et la diversité du «fait chimique» : diversité des substances, diversité des réactions entre ces substances, diversité des conditions expérimentales, diversité des résultats obtenus. Le concept de substance ne peut prendre son sens qu'au travers d'une multitude d'instanciations, correspondant à des substances réelles, pouvant être décrites, observées, manipulées. De la même façon, le concept de réaction chimique ne peut être détaché des exemples concrets qui ont servi à le construire.

Si l'on n'intègre pas ces données empiriques dans leur diversité et leur pluralité – Bachelard intitule un de ses ouvrages *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne* (Bachelard, 1932) –, si l'on tend vers une «chimie sans substance», fait-on encore de la chimie ?

Faut-il, et si oui comment peut-on, donner du **sens chimique** à ces exercices de chimie quantitative ? Dans quelle mesure une grande dispersion des réactions qui servent de support à ces exercices est-elle un obstacle, ou au contraire une aide à la construction d'une représentation cohérente du système et à la formation des concepts dans un premier temps, à la construction d'une stratégie générale de résolution plus ou moins indépendante du contexte dans un deuxième temps ?

4.2. Comment réduire la complexité du problème ?

La modélisation informatique nous a amenés à recenser explicitement l'ensemble des relations, des expressions algébriques et des valeurs des différentes grandeurs susceptibles d'être mises en œuvre au cours de la

résolution d'un problème. Cette analyse, rendue indispensable pour l'efficacité du diagnostic, a révélé une complexité de l'espace de problème souvent masquée par les stratégies mises en œuvre par les enseignants.

Nous avons vu, dans la description du logiciel faite précédemment, que le nombre de relations générales mises en jeu pour la résolution proprement dite du problème n'était pas très élevé. Si l'on mesure la complexité du problème simplement par ce nombre de relations, elle peut paraître faible. Elle est en fait beaucoup plus importante si l'on considère toutes les instances de ces relations.

Prenons pour exemple la relation générale entre quantité de matière (quantité1/nombre stœchiométrique1 = quantité2/nombre stœchiométrique2) applicable à tous les couples de corps de la réaction en prenant les quantités «qui réagissent». Pour un problème simple ne faisant intervenir que quatre composés non gazeux, et si l'on tient compte de toutes les instanciations et de toutes les réécritures algébriques possibles, cette seule relation peut s'écrire de 192 manières différentes ! En pratique, les habitudes d'écriture font que la moitié seulement de ces expressions peut apparaître dans une résolution.

On voit sur cet exemple simple que la taille de l'espace de problème, mesurée par le nombre d'expressions correctes susceptibles d'être utilisées par les élèves, est déjà relativement très importante. Une nouvelle difficulté surgit lorsqu'on s'intéresse aux «valeurs» que peuvent prendre les grandeurs du problème, ces valeurs pouvant être différentes ou égales.

On obtient en principe une valeur différente pour chaque instance des grandeurs calculables. À un corps on associe, suivant son état, de sept à treize valeurs différentes, en considérant, pour la plupart des substances, les valeurs initiale, finale, et consommée (réactif) ou produite (produit). Cet ensemble de valeurs différentes est indispensable à la description complète du problème. Quant au problème des valeurs égales, nous avons déjà eu l'occasion de le mettre en évidence (Blondel et al., 1994). La coutume enseignante fait que les exercices proposés aux élèves utilisent souvent des valeurs simples comme données initiales (10 g, 20 cm³...) ou des valeurs qui donnent des résultats simples (11,2 L d'un gaz ce qui représente exactement 1/2 mol à 0°C). Le résultat de cette pratique, issue de l'habitude du calcul mental et de la volonté de simplifier les calculs, est que l'on obtient pour un problème donné un certain nombre de valeurs égales (2 mol, 2 L, coefficient 2...) pour des grandeurs différentes. Il est évident que cela complique considérablement le diagnostic, qu'il soit automatique ou traditionnel.

Ces difficultés apparaissent très clairement au cours de la mise au point d'un diagnostic automatique efficace. Nous faisons en outre l'hypothèse

que ces difficultés, qui émergent en raison des contraintes de la modélisation informatique, peuvent donner des indications pertinentes sur les difficultés des élèves, et que notre analyse peut donc constituer une approche originale de ces difficultés.

Or ces paramètres (taille et complexité de l'espace de problème) ne sont, en général, pas pris en compte par les enseignants qui présentent aux élèves des stratégies « gagnantes » de résolution, c'est-à-dire des stratégies « d'expert » : l'expert connaît déjà le plan et le sous-ensemble de bonnes relations qui le mèneront à la solution. Si l'on considère cet expert ou un élève qui sait résoudre, la complexité du problème – au sens de la résolution de problèmes (Laurière, 1986), mesurée en termes du nombre d'opérations pour aboutir à la solution – est relativement réduite : il suffit d'appliquer les « bonnes » relations dans l'ordre.

Si par contre on considère un élève qui ne sait pas résoudre, nous faisons l'hypothèse, suggérée par l'analyse précédente, que cela signifie qu'il peut appliquer n'importe quelles relations dans n'importe quel ordre. La complexité du problème, vue par l'élève, est alors immense : nombre de relations possibles (qui ne sont en fait que des instanciations différentes de quelques relations générales, ou des réécritures algébriques de ces mêmes expressions), nombre de valeurs numériques différentes, et pour augmenter sa confusion, nombre de valeurs égales correspondant à des grandeurs différentes. Nous pensons en effet que même ce dernier point, pourtant destiné *a priori* à simplifier la résolution, complique parfois la tâche de l'élève. La simplification supposée de telles pratiques a de moins en moins de raison d'être à une époque où, calculatrices aidant, les élèves n'ont que peu d'automatismes de calcul mental.

D'autre part, il apparaît clairement que la complexité que nous venons de mettre en évidence se situe sur trois registres très différents (chimique, algébrique et numérique), registres que les élèves ne sont, en général, pas en mesure de dissocier. Notre étude plaide, nous semble-t-il, en faveur d'une redéfinition de l'articulation entre les caractères algébrique et numérique d'une part et le caractère chimique de la résolution d'autre part. Un environnement comme SCHNAPS permettrait de minimiser la composante numérique et algébrique de la résolution (et peut-être la charge cognitive correspondante), pour que l'activité de modélisation de la situation soit prépondérante dans le travail demandé à l'élève. Nous l'avons déjà observé au cours de nos expérimentations par l'aide indirecte que certaines fonctions du logiciel apportent aux élèves sur le plan numérique ou algébrique.

Toutefois, pour aller plus loin, il faudrait pouvoir disposer de résultats de recherches et d'analyses sur cette articulation et les outils dont on peut

disposer dans les trois registres. En outre, dans quelle mesure est-on capable de faire cette séparation ? De quels instruments dispose-t-on pour exprimer les relations dans des termes autres que ceux de l'algèbre ou du langage «naturel» des textes de chimie ? Nous avons envisagé d'employer les graphes pour représenter la résolution, à l'instar de ce qui a pu être proposé dans d'autres domaines : programmation en Lisp (Reiser et al., 1989) ou géométrie (Anderson et al., 1985 ; Bernat, 1994). À notre connaissance, aucune étude n'a été menée sur les outils graphiques de représentation des relations entre grandeurs en chimie.

4.3. Quel langage de représentation pour le système physico-chimique ?

L'activité de résolution de problèmes s'appuie sur l'énoncé soumis aux élèves et utilise le langage symbolique de l'équation qui représente le bilan de la réaction ; le reste des informations étant décrit dans le langage «naturel» de la chimie (Carretto & Viovy, 1994). Mais cette description habituelle (celle des manuels scolaires) est, le plus souvent, insuffisante pour résoudre complètement le problème.

Nous avons déjà dit à l'occasion de la description de l'environnement SCHNAPS que pour répondre à certaines questions (le volume total de gaz produit, concentration initiale ou finale d'un ion), il était nécessaire de préciser le «système» qui décrit ces conditions physiques. Cet aspect de la représentation avait déjà été souligné par Cabrol lors de la réalisation d'un premier résolveur (Cabrol et al., 1987). Il ne s'agit pas uniquement de représenter le réacteur chimique vu comme un récipient ou plus généralement une enceinte physique dans laquelle se déroule la réaction, quand elle existe, mais plutôt de représenter une abstraction importante pour comprendre les transformations qui s'opèrent. Certaines erreurs bien connues, comme le fait de «négliger la masse» de certains gaz (Séré & Tiberghien, 1989) ou des erreurs de calculs de concentration de mélanges, sont à rapprocher de ces difficultés de représentation du système chimique dans son ensemble.

Les éléments nécessaires à cette description (données sur certaines espèces ou relations de définition) ne sont que rarement explicitement présents dans les énoncés de problèmes ; on compte plutôt sur le «bon sens» des élèves. Mais ces relations peuvent-elles être «de bon sens» lorsque les élèves ne se sont pas construits une représentation pertinente du système physico-chimique ?

Alors qu'en physique, que ce soit en mécanique ou en thermodynamique par exemple, la notion de système, la description de ce système, les

conditions initiales, les paramètres qui le régissent sont des priorités de la plupart des activités de résolution de problèmes, il ne semble pas qu'il en soit toujours de même en chimie. Or on s'aperçoit que cette description est indispensable pour construire un résolveur informatique. Nous faisons l'hypothèse que cette difficulté, soulevée au cours de la mise au point de l'environnement, peut donner des indices sur les difficultés rencontrées par les élèves. La description incomplète du système et les implicites qui lui sont attachés ne participent-ils pas à la difficulté de construction d'une représentation globale déjà évoquée précédemment ?

Ceci pose deux types de questions au moment de la conception : comment montrer à l'élève de manière claire les différents «états» de tous les corps simultanément ? Comment lui donner la possibilité d'introduire ces informations de manière simple ? Comment l'élève va-t-il indiquer que deux espèces sont, ou ne sont pas, dans la même solution avant la réaction, c'est-à-dire avant que toutes les espèces soient mélangées dans le même récipient ? De façon plus générale, comment peut-on symboliser les différents systèmes qui se succèdent : les substances avant le mélange, le mélange ou la mise au contact «juste avant» la réaction, la (les) phase(s) après la réaction ?

On constate à ce propos qu'il y a peu d'outils disponibles pour représenter cet aspect de la réaction. Les symboles graphiques utilisés dans les manuels ou par les enseignants pour représenter le matériel de laboratoire et certaines réactions effectuées au laboratoire sont insuffisants pour décrire ce système. On ne trouve dans les manuels aucune représentation de l'aspect physique de la réaction, sous forme graphique ou symbolique, et l'implicite des énoncés d'exercices est, à ce sujet, quasiment total.

Il reste donc à inventer un langage symbolique et graphique qui permette de représenter le plus clairement possible le système physico-chimique dans son ensemble et qui permette aux élèves d'appréhender cette notion. On le voit, il ne s'agit pas à strictement parler d'une question de didactique ; toutefois, l'élaboration d'un tel langage de représentation ne peut se faire qu'en s'appuyant sur des données fournies par des analyses approfondies de ces langages, de la façon dont les élèves les reçoivent et des interactions avec la machine qu'ils autorisent.

4.4. Comment représenter l'aspect temporel et dynamique de la réaction chimique ?

Dans les problèmes de chimie quantitative classiques, il est nécessaire de séparer deux états distincts mais qui ne sont pas toujours clairement

identifiés, un état **avant** et un état **après**. Sans même parler de l'aspect cinétique (initiation, déroulement, terminaison) inutile dans le cadre de la résolution d'exercices qui nous intéresse (mais sur lequel on pourrait réfléchir en terme de représentation du système chimique évoqué précédemment), on ne prend pas réellement en compte cet aspect temporel de la réaction. L'état **après** devrait décrire ce qui a réagi **et** ce qui n'a pas réagi. Or l'équation-bilan ne concerne que ce qui a réagi, elle ne cherche pas à représenter ce qui n'a pas réagi pour lequel on manque d'éléments de représentation !

Ce sont les exigences de la modélisation informatique en vue de l'élaboration du solveur qui ont imposé une représentation interne complète du système. Or une telle représentation doit distinguer la valeur des grandeurs avant et après la réaction, mais aussi les valeurs qui correspondent à ce qui réagit ou qui a réagi (les quantités « consommées » de réactif et les quantités « produites » de produits) et les valeurs qui correspondent à ce qui n'a pas réagi (les quantités finales de réactif par exemple). Dans une représentation complète, chaque grandeur associée à un corps (exemple : la masse de Fe_2O_3) possède trois valeurs différentes : une valeur à l'état initial (avant la réaction), une valeur correspondant à ce qui réagit (consommée ou produite) et une valeur à l'état final.

L'équation-bilan ne rend pas compte de cet aspect. Les nombres stœchiométriques indiquent uniquement la conservation et cette distinction quasi « temporelle » (avant, après, pendant) n'apparaît pratiquement jamais de façon rigoureuse et systématique dans les « méthodes de résolution » proposées par les enseignants ou les manuels.

Il importe donc de proposer des modes de représentation graphique ou symbolique qui permettraient d'illustrer ces différents « instants » de la réaction, et qui pourraient aider les élèves à structurer de façon temporelle et dynamique les différentes valeurs du problème.

Certains enseignants proposent une représentation sous la forme d'un tableau, idée reprise par ceux qui utilisent régulièrement les tableaux avec leurs élèves. Chaque colonne du tableau correspond à une substance, chaque ligne à un instant (le plus souvent limité à **avant**, **après**). Nous ferons remarquer que l'usage du tableau n'est pas complètement satisfaisant. Il met en évidence l'excès d'un réactif par rapport à un autre mais il ne montre pas ce qui a réagi. Il nous semble en outre qu'il s'agit plutôt d'une représentation dans le registre numérique évoqué plus haut dans cet article, que d'une approche de la représentation chimique.

La représentation des étapes de la résolution sous forme d'un tableau a d'autre part été développée dans un environnement de résolution de problèmes de thermodynamique (Veillette et al., 1993), mais cette représentation ne peut se substituer à celle de l'évolution du phénomène.

Ceci ramène à la question de la représentation des quantités de substances, que ce soit sous forme de quantités de matière, de masse ou de volume. Comment peut-on représenter l'évolution temporelle de ces quantités ? Quelques idées de représentations graphiques peuvent être reprises de certains manuels et dans quelques logiciels. Avec Morinet-Lambert, nous avons fait une première tentative qui combine des graphiques dynamiques et des symboles de la vie courante ; il resterait à compléter et à valider ces représentations (Morinet-Lambert, 1994).

On rejoint les analyses et les interrogations concernant le niveau de description (macroscopique/microscopique, réaliste/symbolique) souhaitable. Le problème n'est pas toujours bien géré dans les manuels où l'on passe très souvent d'un niveau de description à l'autre sans que la nécessité en soit évidente. C'est également l'une des difficultés majeures de la représentation symbolique d'une réaction chimique par une équation-bilan qui peut s'interpréter à l'échelle macroscopique ou microscopique. Les logiciels actuels offrent des possibilités de représentations graphiques et dynamiques importantes, mais seules des recherches didactiques approfondies nous permettront de les utiliser de façon pertinente.

5. CONCLUSION

Nous avons, dans cet article, soulevé un certain nombre de questions qui se situent au carrefour des disciplines impliquées dans l'élaboration d'un environnement d'apprentissage. Nous voudrions conclure par quelques remarques d'ordre méthodologique et didactique.

Notre méthodologie de développement ne s'est pas appuyée sur une conception « *a priori* » dans la mesure où il n'existait pas un corpus de travaux de recherche didactique suffisant sur ce sujet. Nous avons donc utilisé une démarche progressive, en développant et en s'appuyant sur des modèles successifs. Cette démarche a permis d'intégrer aux différentes étapes du développement des résultats de recherche de diverses disciplines.

Un élément important de cette démarche de conception est la possibilité d'expérimenter, dans des conditions d'enseignement contrôlées, des prototypes à divers états de développement. La réalisation d'un environnement EIAO peut alors devenir un outil puissant d'expérimentation et de mise à l'épreuve de certains modèles d'enseignement.

Par ailleurs, cette démarche permet de mettre en avant des problèmes pédagogiques et didactiques quelquefois connus, mais vus ici sous un angle original et différent des analyses traditionnelles. Les questions soulevées sont d'ordre épistémologique et nous paraissent susceptibles d'apporter un nouvel éclairage à l'enseignement traditionnel de la résolution

de problèmes de chimie. Les contraintes de la «*transposition informatique*» mettent en relief, de façon plus explicite que dans certaines recherches didactiques, la spécificité de la chimie comme discipline, par rapport à la physique en particulier : extrême diversité des substances, des réactions entre substances, des conditions de ces réactions, de leurs résultats... C'est la prise en compte de cette diversité qui caractérise la chimie. Réciproquement, la formalisation trop poussée des problèmes de chimie, leur réduction aux connaissances procédurales, d'ailleurs peu nombreuses, nécessaires à leur résolution les videraient de toute signification chimique : on ne peut pas faire de chimie «sans substance». Notre travail a contribué à faire émerger quelques aspects de cette différence forte entre la physique et la chimie. Ce point de vue mériterait d'être approfondi par des recherches didactiques, et ses conséquences au niveau de l'apprentissage, de la chimie en particulier, devraient être envisagées.

Sur un autre plan, les questions de représentation des systèmes et des réactions chimiques, centrales du point de vue didactique, peuvent bénéficier des derniers développements des outils logiciels actuels : les possibilités de représentations graphique et dynamique ouvrent de nouveaux espaces de réflexion sur ces problèmes.

Nous avons déjà avancé, à propos de quelques exemples, l'hypothèse que certaines des difficultés rencontrées à l'occasion de modélisations informatiques pouvaient donner des indices pertinents sur les difficultés des élèves dans des situations d'enseignement variées. Le diagnostic des difficultés des élèves, aspect important pour la conception des environnements d'apprentissage, prend alors toute sa signification. Cela conduit à envisager différemment l'enseignement de la résolution de problèmes et permet d'adapter les guidages et les aides pédagogiques de façon plus pertinente. Cependant des travaux sont encore nécessaires pour compléter nos connaissances sur le contenu et la forme des explications pédagogiques propres à ce domaine.

Cette conception d'environnement peut être considérée comme une étape vers de nouveaux outils d'aide à la résolution. On pourrait proposer – et des prototypes existent déjà – une «calculatrice chimique» qui intégrerait des connaissances élémentaires, des capacités de calcul avec unités et des facilités d'écriture algébrique. Quelles connaissances chimiques devraient y être incluses ? Dans quelle mesure un tel outil permettrait-il de séparer connaissances algébriques et connaissances chimiques ? Que deviendraient alors l'activité de modélisation de la situation et celle de résolution de problèmes ? Quels outils peut-on alors proposer pour faciliter l'activité de modélisation de la situation et de transformation de cette situation ? Autant de questions que la conception d'environnements comme SCHNAPS permet de préfigurer.

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR (1976). *Chimie-analyse, normes fondamentales*. Recueil de normes françaises, AFNOR.
- AFNOR (1979). *Grandeurs et unités, le système international d'unités, les symboles des grandeurs et des unités*. Recueil de normes françaises, AFNOR.
- ANDERSON B. (1990). Pupils' Conceptions of Matter and its Transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, n° 18, pp. 53-85.
- ANDERSON J.R., BOYLE C.F. & YOST G. (1985). The Geometry Tutor. In *Proceedings of the 9th IJCAI*. Los Altos, Morgan-Kaufman, pp. 1-7.
- BACHELARD G. (1932). *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne* (2^e édition 1973). Paris, Vrin.
- BALACHEFF N. (1994). Didactique et Intelligence Artificielle. In N. Balacheff & M. Vivet (Eds), *Didactique et Intelligence Artificielle*. Grenoble, La Pensée Sauvage, pp. 9-42.
- BERNAT P. (1994). *Conception et réalisation d'un environnement interactif d'aide à la résolution de problèmes. CHYPRE : un exemple pour l'enseignement de la géométrie*. Thèse, Université Henri Poincaré - Nancy I.
- BERNARD M. (1978). Quantités matière et notions connexes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 600, pp. 497-505.
- BLONDEL F.-M., SCHWOB M., TARIZZO M. & CHALLANDE D. (1992). *Environnement d'apprentissage de la résolution de problèmes de chimie*, Rapport 92-4-08. Paris, INRP.
- BLONDEL F.-M., SCHWOB M. & TARIZZO M. (1994). Capacités et limites du diagnostic des activités de l'élève dans un logiciel de résolution de problèmes. In *Actes des Sixièmes Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*. Paris, INRP-UDP, pp.73-78.
- BRUILLARD E. & VIVET M. (1994). Concevoir des EIAO pour des situations scolaires : Approche méthodologique. In N. Balacheff & M. Vivet (Eds), *Didactique et Intelligence Artificielle*. Grenoble, La Pensée Sauvage, pp. 275-302.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Numéro Hors-Série du 24 septembre 1992*. Paris, Ministère de l'Éducation nationale.
- CABROL D., CACHET C. & CORNELIUS R. (1987). A problem-solving partner using Prolog. In R. Lewis & E.D. Tagg (Eds), *A Computer for Each Student*. Elsevier Science Publishers (North-Holland), pp. 159-166.
- CARRETTO J. & VIOVY R. (1994). Relevé de quelques obstacles épistémologiques dans l'apprentissage du concept de réaction chimique. *Aster*, n° 18, pp. 75-95.
- CHAUSSIN C. (1983). À propos de la mole. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 654, pp. 1066-1068.
- DELOZANNE E. (1992). *Explications en EIAO : Études à partir d'ELISE, un logiciel pour s'entraîner à une méthode de calcul des primitives*. Thèse, Université du Maine.
- FRAZER M.J. (1982). Nyholm lecture : Solving chemical problem. Reprinted from *Chemical Society Reviews*, vol. 11, n° 2, pp.171-190.
- FRAZER M.J. & SLEET R.J. (1984). A study of students' attempts to solve chemical problems. *European Journal of Science Education*, vol. 6, n° 2, pp. 141-152.
- FRAZER M.J. & SERVANT D.M. (1987). Aspect of stoichiometry : where do the students go wrong ? *Education in Chemistry*, pp. 73-75.
- GABEL D.L. (1993). Use of the Particle Nature of Matter in Developing Conceptual Understanding. *Journal of Chemical Education*, vol. 70, n° 3, pp. 193-194.

- GOFFARD M. (1993). Réflexions post-bac. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 759, pp. 1593-1604.
- GORING. (1994). Mole and Chemical Account : A Discussion of the Fundamental Measurements of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 71, n° 2, pp. 114-116.
- GOURMELON P. (1978). À propos du concept de quantité de matière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 606, pp. 1359-1366.
- HATAB G.(1995). Réflexions sur la notion d'élément en chimie. *Revue de l'ADASTA*, Supplément pédagogique, Clermont-Ferrand, pp. 5-10.
- KRAMERS-PALS H., LAMBRECHTS J. & WOLFF P.J. (1982). Recurrent difficulties : solving quantitative problems. *Journal of Chemical Education*, vol. 59, n° 6, pp. 509-513.
- KRISHNAN S. & HOWE A. (1994). The Mole Concept : Developing an Instrument to Access Conceptual Understanding. *Journal of Chemical Education*, vol. 71, n° 8, pp. 653-655.
- LAUGIER A. & DUMON A. (1994). Les obstacles à la conceptualisation de la réaction chimique en classe de seconde, interprétation microscopique modèle-langage. In *Actes du quatrième séminaire national de la recherche en didactique des sciences physiques*. Amiens, CURSEP et IUFM de Picardie, pp. 37-48.
- LAURIÈRE J.-L. (1986). *Intelligence artificielle : Résolution de problèmes par l'homme et la machine*. Paris, Eyrolles.
- LYTHCOTT J. (1990). Problem Solving and Requisite Knowledge of Chemistry. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n° 3, pp. 248-252.
- MARTINAND J.-L. & VIOVY R. (1979). La notion d'élément chimique en classe de cinquième : difficultés, ressources et propositions. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 613, pp. 875-878.
- MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang.
- MÉHEUT M. (1982). *Combustions et réactions chimiques dans un enseignement destiné à des élèves de sixième*. Thèse, Université Paris 7.
- MÉHEUT M. (1989). Des représentations des élèves au concept de réaction chimique : premières étapes. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 997-1012.
- MÉHEUT M., SALTIEL É. & TIBERGHEN A. (1985). Pupils' (11-12 years old) conceptions on combustion. *European Journal of Science Education*, n° 7, pp. 83-93.
- MENDELSON P. (1995). EIAO et psychologie cognitive. *Sciences et Techniques Educatives*, vol. 2, n°1, pp. 9-29.
- MEY M., BALAS A. & PLOUIN D. (1994). Essai sur la maîtrise de l'équation-bilan à l'entrée à l'Université. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 766, pp. 1131-1150.
- MORINET-LAMBERT J. (1994). Use of Graphics in Computer-aided Learning. In S. Vosniadou, E. de Corte & H. Mandl (Eds), *Technology-Based Learning Environments - Psychological and Educational Foundations*. NATO ASI Series F: Computer and System Sciences, Springer-Verlag, pp. 268-275.
- NAKHLEH M. & MITCHEL R. (1993). Concept Learning versus Problem Solving : There is a Difference. *Journal of Chemical Education*, vol. 70, n° 3, pp. 190-194.
- NICAUD J.-F. (1994). *Modélisation du raisonnement algébrique humain et conception d'environnements informatiques pour l'enseignement de l'algèbre*. Rapport LRI n° 890, Université d'Orsay.
- NURRENBERN S. & PICKERING M. (1987). Concept Learning versus Problem Solving : Is There a Difference ? *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 6, pp. 508-510.
- PICKERING M. (1990). Further Studies on Concept Learning versus Problem Solving. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n° 3, pp. 254-255.

- REIF F. (1983). How can chemists teach problem solving ? *Journal of Chemical Education*, vol. 60, n° 11, pp. 948-953.
- REISER B.J., RANNEY M., LOVETT M.C. & KIMBERG D.Y. (1989). Facilitating students's reasoning with causal explanations and visual representations. In Bierman, Breuker & Sandberg (Eds), *Proceedings of the 4th International Conference on Artificial Intelligence and Education*, 24-26 may 1989. Amsterdam, IOS, pp. 228-235.
- SABANA J. (1993). Relative Atomic Mass and the Mole : A Concrete Analogy to Help Students Understand These Abstract Concepts. *Journal of Chemical Education*, vol. 70, n° 3, pp. 233-236.
- SAWREY B.A. (1990). Concept Learning versus Problem Solving. *Journal of Chemical Education*, vol. 67, n° 3, pp. 253-254.
- SCHWOB M. (1991). *Des «résolutions-papiers» aux «résolutions-machines»*. Mémoire DEA de didactique des disciplines, Université Paris 7 - LIREST.
- SÉRÉ M.-G. (1985). The Gaseous State. In R. Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Eds), *Children's ideas in Science*. Milton Keynes, Open University Press, pp. 105-123.
- SÉRÉ M.-G. (1986). Children's conceptions on the gaseous state prior to teaching. *European Journal of Science Education*, vol. 8, pp. 413-425.
- SÉRÉ M.-G. & TIBERGHIE A. (1989). La formation des concepts décrivant les états de la matière au collège. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 911-930.
- SOLOMONIDOU C. & STAVRIDOU H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, n° 18, pp. 75-95.
- SOLOMONIDOU C. (1991). *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du collège*. Thèse, Université Paris 7.
- STAVRIDOU H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire, Étude des conceptions des élèves*. Thèse, Université Paris 7.
- TISSEAU J.-M. (1990). *Modélisation à partir d'un énoncé informel : le système MODELIS. Application à des exercices de thermodynamique*. Thèse, Université Paris 6.
- VEILLETTE M., MARCOS B., THÉRIEN L., BOURGET F. & LAPOINTE J. (1993). Système tutoriel intelligent pour la résolution de problèmes en thermodynamique. *Didaskalia*, n° 1, pp. 85-100.

Un modèle pour la compréhension des propriétés des liquides

L. BORGHI, A. DE AMBROSIS,
C. INVERNIZZI, P. MASCHERETTI

Département de Physique «A. Volta»
Università di Pavia
Via Bassi, 6
27100 Pavia, Italie.

Résumé

Cet article présente une proposition didactique visant à favoriser la compréhension des concepts physiques relatifs à l'hydrostatique et en particulier au principe de Pascal. La proposition, qui est insérée dans un contexte d'hypertexte, se fonde sur l'utilisation d'un modèle qui rend compte des propriétés fondamentales d'un liquide, comme son action sur les parois du récipient qui le contient ou la transmission isotrope des forces qui s'exercent sur lui. Les affinements successifs du modèle permettent d'aboutir à la définition de la pression dans les liquides.

Mots clés : *pression, hydrostatique, expériences, simulation, hypertexte.*

Abstract

In this paper a proposal aimed at favouring the understanding of fundamentals of hydrostatics, with particular attention to the Pascal principle, is presented. The instruction material was developed in a hypertextual environment and based on a model which explains static properties of liquids. Particular attention is given to the isotropic transmission of forces inside a liquid and to its action on the walls of the container. The model, with appropriate adjustments, can lead to define pressure.

Key words : *pressure, hydrostatics, experiments, simulation, hypertext.*

Resumen

Este artículo presenta una proposición didáctica aspirando favorecer la comprensión de los conceptos físicos relativos a la hidrostática y en particular al principio de Pascal. La proposición, que es enmarcada en un contexto de hypertexto, se fundamenta en la utilización de un modelo que rinde cuenta de las propiedades fundamentales de un líquido, como su acción sobre las paredes de un recipiente que lo contiene o la transmisión isótropa de las fuerzas que se ejercen sobre él. Los afinamientos progresivos del modelo permiten conducir a la definición de presión en los líquidos.

Palabras claves : *presión, hidrostática, experiencias, simulación, hypertexto.*

INTRODUCTION

Nous avons présenté dans un précédent article le schéma général d'un environnement multimédia visant l'étude des propriétés physiques des fluides au repos, réalisé avec une approche hypertextuelle (Borghi & al., 1993). Les différentes voies que cet environnement permet de suivre ont comme points de repère les travaux de Boyle sur la compression et la dilatation de l'air à température constante. Ceci implique donc des problèmes connexes mettant en jeu différents concepts de base, comme ceux de pression (dans des liquides et des gaz), de transmission de forces dans ces fluides, d'effet de la gravité sur les conditions de pression par exemple.

L'hypertexte est structuré en plusieurs sections consacrées aux différents points de vue selon lesquels le sujet principal peut être considéré. Une de ces sections, intitulée «Faut-il plus de physique ?» a été conçue pour aider à éclaircir et approfondir les concepts physiques nécessaires pour suivre un parcours significatif et cohérent quel que soit le niveau d'investigation choisi par l'utilisateur. Parmi ces concepts, l'action d'un liquide sur les parois du récipient qui le contient et la transmission isotrope à l'intérieur du liquide des forces qui s'exercent sur lui ont une importance fondamentale. Ces concepts sont tous les deux essentiels pour la définition de la pression. Notre proposition peut aider à résoudre quelques-uns des problèmes relatifs à leur compréhension, signalés dans la littérature comme constituant de considérables difficultés pour des étudiants à différents niveaux de scolarité (Séré, 1982 ; Engel-Clough & Driver, 1985 ; Ruggiero & al., 1985 ; Rollnick & Rutherford, 1990, 1993 ; de Berg, 1992 ; Kariotoglou & al., 1993). Ces difficultés sont, à notre avis, une conséquence du fait que la pression n'est pas un concept primaire, mais joue un rôle d'organisateur

cognitif extraordinairement utile à la description d'un grand nombre de phénoménologies des fluides. C'est pourquoi il doit être introduit explicitement dans un parcours didactique, et il faut mettre en évidence sa fonction dans les différentes circonstances où un fluide peut être étudié. De ce point de vue, dans le cas des conditions statiques de l'étude d'un fluide, il y a essentiellement trois problèmes. Nous les énumérons dans l'ordre de l'histoire de la pensée scientifique, essentiellement pour les liquides :

- l'analyse de l'action qu'un fluide exerce sur un objet qui y est plongé (principe d'Archimède) ;

- l'étude des conséquences du poids sur le fluide même (principe de Stévin) ;

- la description du comportement d'un fluide soumis à des forces extérieures, en faisant abstraction de son poids (principe de Pascal).

Ce dernier problème met en jeu les caractéristiques les plus intrinsèques du comportement d'un fluide, c'est pourquoi nous avons établi une hiérarchie en fonction de la simplicité des situations, qui est opposée à l'évolution historique.

En effet, dans l'hypertexte, nous utilisons des modèles qui, en suggérant une représentation du liquide à l'échelle microscopique, permettent d'en expliquer les comportements phénoménologiques connexes avec le principe de Pascal. Différents exemples de ces phénoménologies sont analysées en intégrant deux approches : l'une liée à l'observation et à l'expérimental, l'autre liée au représentatif et à l'informatique. La première utilise des dispositifs simples visant à reproduire des phénomènes significatifs du comportement statique des liquides comprimés ; l'autre, basée sur des animations et des simulations, reprend l'analyse des phénomènes en introduisant les éléments conceptuels (par exemple la représentation des forces avec des vecteurs) qui tendent vers une description formalisée du monde physique.

Dans la suite, nous nous bornons à illustrer le modèle du liquide et à préciser son utilisation pour arriver à la définition de pression dans les liquides, ainsi qu'aux caractéristiques qui rendent ce concept suffisamment opératoire sur les points correspondant aux difficultés de compréhension signalées dans la littérature. Les limites de validité de ce modèle seront mises en évidence, avec la nécessité de le modifier foncièrement pour rendre compte de la pression dans les gaz.

LE MODÈLE

Parmi les propriétés microscopiques responsables du comportement statique d'un liquide, comme chacun sait, la plus importante est le fait que l'interaction entre ses molécules permet des glissements des unes par rapport aux autres. Cela se traduit macroscopiquement par l'impossibilité de contraintes de cisaillement dans un liquide. Cette propriété différencie profondément le comportement des liquides de celui des solides. En effet, dans ces derniers, les interactions qui donnent lieu à l'ordonnement de la structure réticulaire sont aussi responsables de la possibilité de transmettre des contraintes de cisaillement. Cet ensemble de considérations permet de proposer, pour un liquide en conditions statiques, un modèle constitué de petites sphères au contact entre elles, et entre lesquelles seules des forces perpendiculaires aux surfaces des points de contact sont exercées, ce qui suppose qu'entre les petites sphères il n'y a pas de frottement de glissement. Si les petites sphères sont contenues dans un récipient, et que l'on suppose l'absence de frottement entre les sphères et les parois, elles exercent aussi sur le récipient des forces normales aux surfaces aux points de contact (Bisi & Mascheretti, 1988).

Le modèle est construit graduellement en partant d'une situation très simple et en introduisant petit à petit des caractéristiques qui accroissent son pouvoir descriptif. Ce développement se fait aussi bien par le moyen d'animations que par le moyen d'objets réels, avec des situations bidimensionnelles, où les petites sphères sont remplacées par des disques.

Une première animation présente trois disques rigides (indiqués par A, B, C) ; sur l'un d'entre eux (A) est appliquée une force (figure 1).

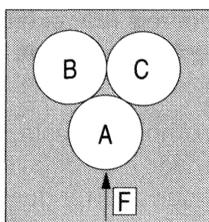


Figure 1 : **Modèle à trois disques rigides (animation)**

On met en évidence que A ne pousse B et C que le long des lignes joignant les centres en provoquant l'éloignement entre B et C, entre lesquels il n'y a pas de liaisons. Cela est dû au fait que la force sur A donne naissance à deux forces appliquées à B et à C qui ont une direction différente de la première (naturellement, leur intensité peut être déduite grâce aux règles de décomposition des forces).

Si les deux disques B et C ne peuvent pas s'éloigner parce qu'ils sont à l'intérieur d'un récipient, ils poussent sur les parois en exerçant des forces ayant une direction normale à celles-ci (figure 2).

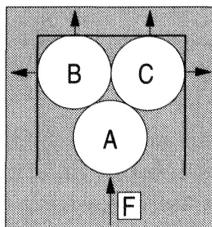


Figure 2 : **Disques rigides dans un récipient à parois rectangulaires**

En augmentant la force sur A, les forces exercées sur les parois augmentent en proportion. L'animation permet de se rendre compte du fait que, en changeant la disposition des parois, on change aussi l'orientation des forces que les disques exercent sur ces parois (figure 3).

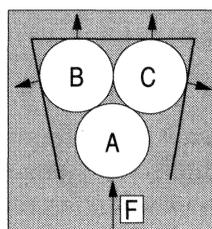


Figure 3 : **Récipient à parois obliques**

Du fait de la poussée sur A et de l'inclinaison des parois latérales, chaque disque pousse autant contre son voisin que contre les parois. Dans ce cas également, en augmentant la force sur A, les forces sur les parois augmentent en proportion.

On propose d'observer concrètement le comportement des disques des animations en utilisant le simple dispositif illustré dans la figure 4, où les disques sont constitués par trois pions d'un jeu de «dames».

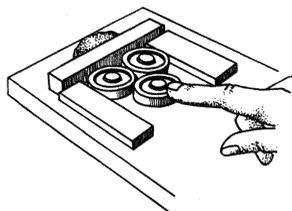


Figure 4 : **Dispositif avec trois pions d'un jeu de dames**

La petite planche du fond est fixée au plan d'appui avec de la pâte à modeler, tandis que les deux petites planches latérales peuvent être libres de se déplacer quand les disques poussent sur elles, ou bien être fixées avec de la pâte à modeler.

Tout en étant très simple, le modèle, sous cette première forme, peut déjà suggérer une explication des propriétés fondamentales d'un liquide :

– dans le cas où les parois latérales sont libres, le liquide «répond» à des actions extérieures en se déplaçant dans des directions indépendantes de celle de la force appliquée de l'extérieur ;

– dans le cas où toutes les parois sont fixées, le modèle rappelle le comportement d'un liquide qui, soumis à une force extérieure quand il est renfermé dans un récipient, transmet des forces aux parois.

Ces deux caractéristiques d'un liquide soit sont difficiles à interpréter, soit ne sont tout simplement pas prises en compte par les étudiants.

Le modèle à trois disques est trop simple pour rendre compte du comportement d'un liquide et, plus particulièrement, pour expliquer le fait que les forces appliquées de l'extérieur se transmettent aux parois à travers le liquide sans changement d'intensité.

Pour retrouver cet aspect il faut recourir à un nombre plus élevé de disques et à des configurations désordonnées. C'est pourquoi une animation propose tout d'abord la situation où un certain nombre de disques sont confinés dans un «couloir» aux parois rigides, de forme semi-circulaire, fermé à une extrémité et assez étroit (figure 5).

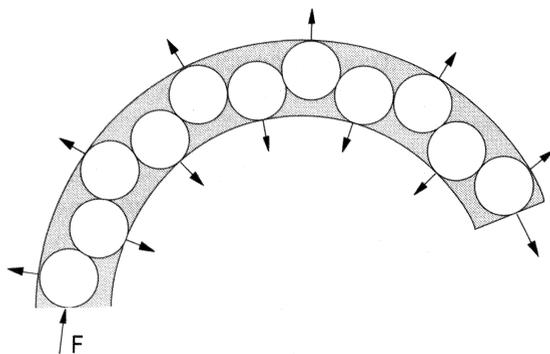


Figure 5 : Ensemble de disques enfermés dans un récipient rigide semi-circulaire

On constate facilement que, dans ce cas, en appuyant sur le premier disque, on obtient une configuration stable dans laquelle chaque disque exerce une force normale à la paroi qu'il touche et dans le même temps une force sur son voisin. Cet exemple montre nettement comment une action extérieure provoque une distribution de forces dont les directions sont indépendantes de celle de la force extérieure tandis qu'elles dépendent de la géométrie du système : c'est une caractéristique du comportement des liquides que la littérature signale comme difficile à comprendre par les étudiants (Engel-Clough & Driver, 1985 ; Kariotoglou et al., 1993).

Pour approfondir l'analyse sur l'intensité des forces, il est utile de considérer des récipients à parois pleines et un nombre de disques de plus en plus grand. C'est pourquoi nous proposons d'abord le dispositif illustré à la figure 6.

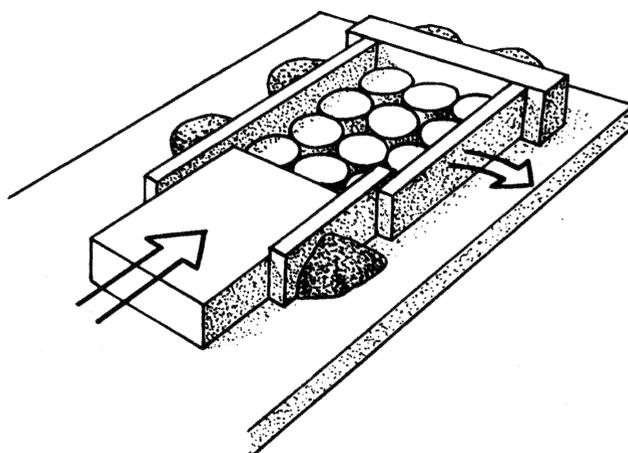


Figure 6 : **Dispositif mettant en évidence l'action des disques comprimés sur une paroi mobile**

Un certain nombre de pions du jeu de dames sont enfermés dans un récipient où elles peuvent être poussées par une sorte de piston. En poussant sur le piston, on génère des forces sur les pions au contact du piston qui sont transmises aux parois : une portion de paroi est mobile et, sous la poussée latérale des pions, elle se déplace en les laissant sortir.

Une animation visualise la distribution des forces exercées par les pions sur les parois avec environ cinquante disques contenus dans un récipient à trois parois orthogonales. Initialement la disposition des disques est ordonnée (figure 7).

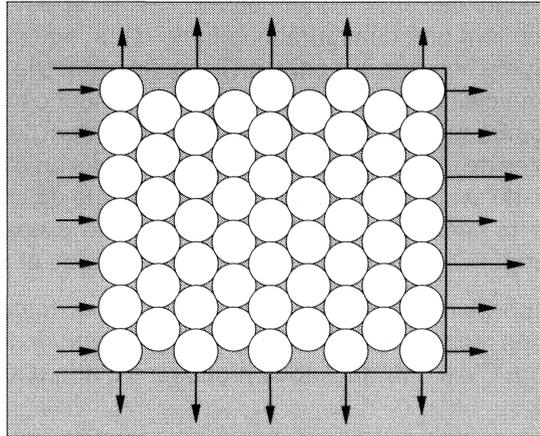


Figure 7 : **Disques disposés de façon ordonnée**

Aux disques du premier rang sont appliquées des forces égales qui se transmettent aux parois du récipient.

L'animation met en évidence que les forces exercées sur les parois de chaque disque n'ont pas toutes la même intensité, mais varient de façon régulière : il y a une nette différence entre les parois latérales et celle du fond. Cela est dû à l'ordre de disposition des disques (chacun d'eux est entouré de six disques disposés aux sommets d'un hexagone régulier). Du fait de cette disposition, les directions le long desquelles les forces se transmettent sont en nombre limité et parfaitement déterminables.

Si les disques remplissent au contraire le récipient d'une façon désordonnée (comme le montre l'animation dont une illustration est présentée à la figure 8), la position de chaque disque par rapport à ses premiers voisins est fortuite, et on a donc un changement de direction des forces qui se transmettent d'un disque à l'autre. Ces disques au contact d'une paroi sont maintenant poussés contre elle par des forces d'intensité et de direction distribuées au hasard : les différences entre les forces exercées sur les parois par les disques diminuent ainsi que les différences liées à la configuration des parois.

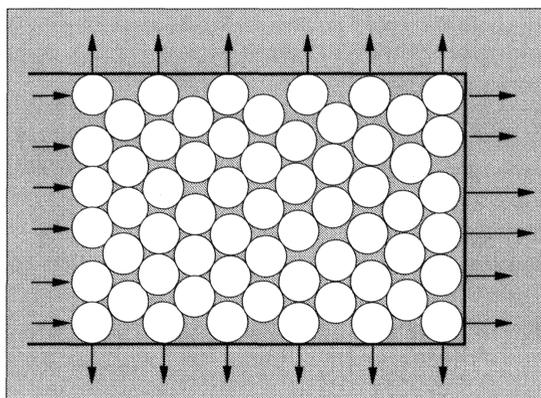


Figure 8 : **Disques disposés de façon désordonnée**

Le fait qu'une augmentation du nombre de disques conduit à des situations de plus grand désordre est mis en évidence, concrètement, en utilisant une poignée de plombs de chasse disposés de façon à couvrir complètement une surface, bornée par des parois aux contours rectangulaires.

La figure 9a montre la photo d'une épreuve effectuée avec environ 2500 billes de plomb.

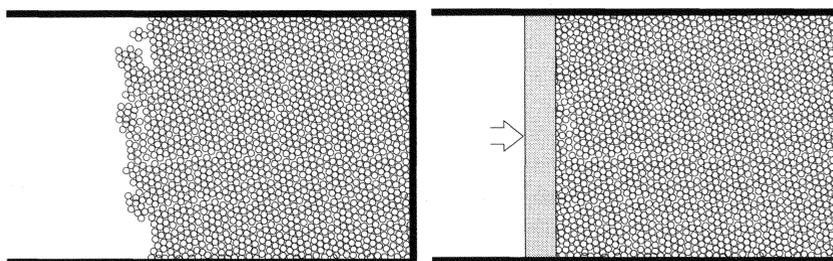


Figure 9a

Figure 9b

Figure 9 : **a) Modèle avec un nombre élevé de billes de plomb**
b) Les billes sont comprimées par un piston

En travaillant directement avec ce modèle concret, il est facile de remarquer qu'il est pratiquement impossible d'ordonner les billes de plomb de façon à ce qu'autour de chacune d'elles la disposition des voisines soit exactement la même.

Dans cette situation, pour comprimer le système, il faut utiliser une paroi mobile qui fonctionne comme un piston, comme le montre la figure 9b.

Pour que la configuration reste pleine il est nécessaire de pousser les billes avec un plan rigide parallèle à celui sur lequel elles sont disposées, de façon à former une seule couche.

Il faut faire réfléchir les étudiants sur le fait que, dans le cas d'un grand nombre de billes, les forces sont toujours perpendiculaires aux parois puisque la situation géométrique de chaque bille à l'égard de la paroi ne change pas par rapport aux situations déjà considérées. Au contraire, la variation d'intensité de ces forces de bille à bille devient inappréciable et ne dépend pas de l'orientation des parois, puisque la présence d'un grand nombre de billes dans des configurations désordonnées élimine chaque «mémoire» de la direction selon laquelle les forces extérieures agissent.

La présentation de l'échantillon avec un nombre élevé de billes s'accompagne d'animations présentant des nombres de billes toujours croissants, animations conçues pour mettre en évidence le fait que, en maintenant constante la force qui agit sur le piston fermant le récipient, la distribution des intensités des forces qui agissent sur les autres parois se rapproche de l'uniformité avec l'augmentation du nombre de billes et du désordre de leur configuration.

À ce stade, la représentation du comportement d'un liquide par le modèle peut être formalisée en introduisant le concept de pression, autant comme paramètre relatif à l'action du liquide sur les parois que comme grandeur caractéristique de l'intérieur du liquide.

C'est pourquoi l'étudiant est invité à considérer la force qui agit sur des surfaces de même dimension en diverses zones sur les différentes parois. L'animation met en évidence, de façon cohérente avec le modèle proposé, que l'intensité de cette force est indépendante de l'orientation de la surface considérée (figure 10).

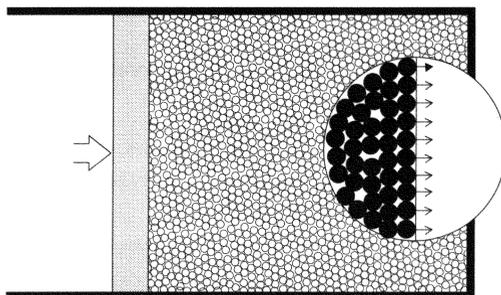


Figure 10 : **Uniformité de l'intensité des forces sur des portions égales de parois différentes**

Ce résultat devrait suggérer qu'on a atteint l'uniformité dans la façon dont le liquide pousse sur les parois ; nous considérons que c'est le moment de proposer la définition de la pression comme rapport entre l'intensité de la force que le liquide exerce sur une certaine surface et l'extension de cette surface.

L'articulation des diverses animations prévoit la possibilité de passer de la situation relative aux parois à celle relative aux zones intérieures du liquide. On fait observer d'abord que les billes en contact avec la paroi poussent sur celle-ci (figure 11a), parce qu'elles-mêmes sont poussées par la couche constituée par les billes immédiatement voisines (figure 11b) et ainsi de suite pour les couches suivantes. Quand il y a désordre, les couches ne sont pas rectilignes, mais peuvent être encore définies comme on le voit à la figure 9. Il est donc naturel de penser que, sur une surface à l'intérieur du liquide, parallèle à une zone de paroi et de même dimension (figure 11c), une force égale à celle exercée sur la zone correspondante de paroi est exercée par les billes les plus internes (les billes des couches comprises entre cette surface et la paroi transmettent à cette dernière les forces qui viennent des billes plus internes).

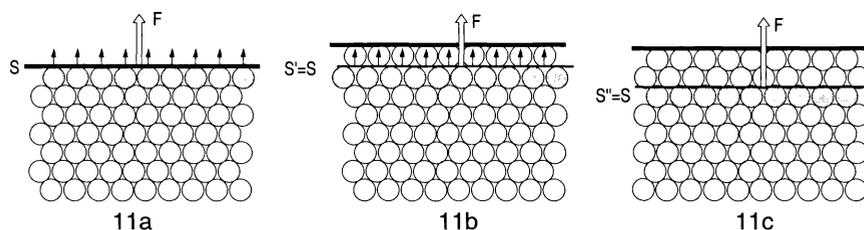


Figure 11 : Forces qui agissent sur des couches de plus en plus internes

Le rapport entre l'intensité de cette force et la dimension de la surface considérée est égal à la pression exercée sur la paroi. En réalité, les billes au contact de la paroi peuvent pousser dessus du fait que la paroi même (grâce à sa rigidité) exerce des forces de réaction de même intensité et de sens opposé.

Chaque couche de sphères peut donc être considérée en équilibre sous l'action de forces opposées et de même intensité exercées par les couches contiguës : on détermine ainsi un état de compression dont la pression dans le liquide est le paramètre descriptif (cela vaut quelle que soit l'orientation de la couche considérée à l'intérieur du liquide (figure 12).

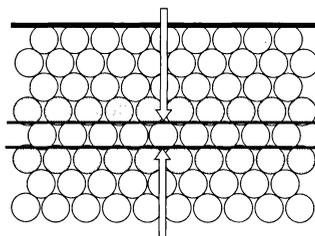


Figure 12 : L'état de compression d'une couche

En ce qui concerne la valeur de ce paramètre, il peut être déterminé comme le rapport entre l'intensité de la force qui agit sur un seul côté de la couche et la dimension de sa surface. Il a donc la même valeur que la pression sur la paroi. Dans ce dernier cas, tout en étant un paramètre caractéristique de chaque point du liquide, la pression peut être déterminée si l'on connaît les actions extérieures et la dimension des surfaces sur lesquelles elles sont appliquées. Cela est vrai pour le domaine des phénoménologies qui se réfèrent au seul principe de Pascal : dans ce domaine la pression est la même en chaque point du liquide.

CONCLUSION

Notre modèle rend compte des phénoménologies strictement hydrostatiques d'un liquide, c'est-à-dire concernant les propriétés des molécules considérées comme des objets rigides capables seulement de se repousser. Dans ce domaine, ce modèle peut être proposé comme un instrument utile pour aider les étudiants à dépasser leurs difficultés dans la compréhension du principe de Pascal, difficultés mises en évidence par de nombreuses recherches. Ces difficultés, à notre avis, proviennent du fait que les étudiants ne réussissent pas à se faire une idée correcte de la distribution des forces à l'intérieur d'un liquide, et donc à fonder la définition de la pression sur une représentation adéquate.

La manière de traiter ce sujet dans les manuels de l'école secondaire, sur ce point ainsi que sur le choix des situations expérimentales, laisse souvent à désirer (Kariotoglou & al., 1990 ; Matthews, 1992). Par exemple, dans de nombreux manuels, l'observation de deux seringues reliées par un tuyau plein d'eau de telle façon qu'en appuyant sur une seringue on éjecte le piston de l'autre, est utilisée pour montrer la possibilité de transmettre des forces à distance avec la compression d'un liquide. Cette expérience, tout en se plaçant dans le contexte du principe de Pascal, et donc dans une logique de distribution des forces transmises par le liquide dans toutes les directions, suggère en réalité l'idée d'une transmission dans une seule

direction (le long du tuyau) ; elle ne contribue donc pas à développer l'idée d'isotropie. Cette expérience comme point de repère peut aller jusqu'à favoriser des représentations mentales en contradiction avec le principe de Pascal.

Le modèle que nous proposons peut pallier partiellement à cet inconvénient en montrant, même dans des situations où la géométrie du récipient privilégie une direction (comme par exemple la figure 5), que les forces qui agissent entre deux disques et contre les parois n'ont pas de directions privilégiées. Par exemple, pour retrouver le comportement mis en évidence par le modèle, les expériences avec les seringues citées ci-dessus pourraient être enrichies en insérant, dans le tuyau de liaison entre les seringues, un morceau de tuyau en caoutchouc extensible qui, en s'élargissant lors de la mise en compression du système, visualise les poussées latérales du liquide sur les parois.

Un autre aspect du comportement des liquides qui ne reçoit pas assez d'attention dans les manuels, et qui au contraire dans notre modèle est introduit dès ses phases initiales, est la corrélation entre la fluidité d'un liquide et sa capacité d'entrer dans un état de compression uniforme du fait de la présence des parois (par exemple, les disques B et C du modèle présenté à la figure 1 suggèrent le comportement d'un fluide, dans le cas où, comme dans la figure 2, ils sont en interaction avec les parois et entrent dans un état de compression).

Même si elle n'a pas été décrite ici, l'activité expérimentale est une partie fondamentale de notre proposition didactique globale. De cette activité, on peut tirer à la fois une confirmation de la validité du modèle et des indications sur ses limites.

Comme n'importe quel modèle, que ce soit avec les billes, ou avec les disques rigides avec contact sans frottement, il a des limites de validité bien précises. Il ne rend compte que des propriétés des molécules comme objets rigides capables seulement de se repousser. Par exemple, les caractéristiques de compressibilité et la propagation d'ondes élastiques dans un liquide sont en dehors du domaine d'application du modèle présenté ; il pourrait être affiné en remplaçant les disques et les billes rigides par des disques et billes, par exemple, en caoutchouc lisse ou mieux avec des anneaux flexibles (des anneaux élastiques pourraient faire penser à la prépondérance du vide dans la matière, même celle condensée).

Ce modèle ne peut rendre compte de propriétés du liquide qui dépendent d'autres caractéristiques et d'autres types d'interaction entre les molécules. Par exemple, les interactions attractives entre les molécules, qui font naître en surface les phénomènes liés à la tension superficielle, sont en dehors des possibilités représentatives du modèle ; dans ce cas, il faudrait utiliser un modèle complètement différent.

Un autre exemple de la limite de validité du modèle décrit est le fait qu'il ne prévoit pas l'agitation thermique des molécules, et donc ne peut expliquer des phénomènes comme la diffusion, le mouvement brownien, l'évaporation, la solidification...

Ces limites et les propositions qui peuvent se développer pour étendre l'interprétation à des phénoménologies différentes de celles de l'hydrostatique sont systématiquement traitées dans d'autres parties de notre proposition hypertextuelle (toujours dans le domaine «Faut-il plus de physique ?») : l'accès à ces parties se fait par mots-clés («boutons») qui permettent d'avoir accès à des parties de l'hypertexte dont le contenu correspond aux mots-clés.

Par exemple, les mots-clés comme «solide» ou «gaz» permettent d'avoir accès à des parties où est mis en évidence comment le modèle doit être modifié pour rendre compte du comportement des systèmes considérés : en particulier pour le gaz, le modèle doit subir une modification fondamentale pour rendre compte de l'aspect dynamique de la pression comme transfert de quantité de mouvement. La possibilité de confrontation entre les propriétés des différents états d'agrégation peut être d'une remarquable efficacité didactique, comme ceci est suggéré dans la littérature (Arons, 1995).

Une caractéristique significative du modèle (et de ses modifications) est qu'il est présenté à la fois de manière concrète et au moyen de simulations. La première forme vise à proposer à l'étudiant, d'une façon simplifiée et dans un contexte familier, le phénomène en cours d'étude. La deuxième est conçue pour accompagner le modèle lui-même avec les éléments formels qui n'appartiennent pas directement au cadre perceptif des grandeurs physiques en jeu, par exemple la représentation, avec les vecteurs, des forces qui s'exercent au sein du liquide et sur les parois qui le contiennent. La première forme vise à suggérer des interprétations qualitatives. La deuxième forme visant à favoriser l'acquisition de moyens de représentations spécifiques du langage scientifique, permet d'avoir accès au niveau de la formalisation.

BIBLIOGRAPHIE

- BISI C. & MASCHERETTI P. (1988). *Natura*. Bergamo, Minerva Italica.
- BORGHI L., DE AMBROSIS A., FALOMO L. & MASCHERETTI P. (1993). Environments multimédias pour l'étude de la physique. *Didaskalia*, n° 2, pp. 40-59.
- DE BERG K.C. (1992). Students' thinking in relation to pressure-volume changes of a fixed amount of air : the semi-quantitative context. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 3, pp. 295-303.
- ENGEL-CLOUGH E. & DRIVER R. (1985). What do children understand about pressure in fluids. *Journal of Research in Technological Education*, vol. 3, n° 2, pp. 133-143.

- KARIOTOGLOU P., KOUMARAS P. & PSILLOS D. (1993). A constructivist approach for teaching fluid phenomena. *Physics Education*, n° 28, pp. 164-169.
- MATTHEWS M. (1992). Teaching about air pressure : a role for history and philosophy in science teaching. In S. Hills (Ed.), *The history and philosophy of science in science education, vol. II*. Kingston-Ontario, Queen's University, pp. 121-133.
- ROLLNICK M. & RUTHERFORD M. (1990). African primary school teachers - what ideas do they hold on air and air pressure ? *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 1, pp. 101-113.
- ROLLNICK M. & RUTHERFORD M. (1993). The use of a conceptual change model and mixed language strategy for remediating misconception on air pressure. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 4, pp. 363-381.
- RUGGIERO S., CARTELLI A., DUPRÉ F. & VICENTINI M. (1985). Weight, gravity and air pressure : Mental representations by Italian middle school pupils. *European Journal of Science Education*, vol. 2, pp. 181-194.
- SÉRÉ M.-G. (1982). A study of some frameworks used by pupils aged 11 to 13 years in the interpretation of air pressure. *European Journal of Science Education*, vol. 2, pp. 299-309.

Remerciements

Les auteurs remercient Andrée Tiberghien pour ses commentaires et la révision du texte de cet article.

L'introduction des didacticiels «génétique» dans l'enseignement de premier cycle universitaire

Conditions d'utilisation, résultats d'observations et d'enquêtes

Christine RICHARD-MOLARD

Département de Biologie
Université Paris 11, Bât. 336
Avenue Clémenceau
91405 Orsay cedex, France.

Résumé

Le travail présenté ici concerne l'introduction de didacticiels de génétique fondamentale dans l'enseignement de premier cycle universitaire scientifique. Nous rapportons l'analyse des résultats d'enquêtes réalisées auprès d'étudiants et d'enseignants de deux universités françaises utilisatrices des didacticiels. Ces résultats nous ont conduits à la définition des conditions nécessaires à une utilisation satisfaisante des didacticiels. Ces enquêtes font apparaître les caractéristiques de ce nouvel outil de travail. Les observations que nous avons faites lors de l'utilisation des didacticiels révèlent des éléments nouveaux dans ce type d'enseignement ; on assiste en particulier à une redéfinition des rôles respectifs des étudiants et des enseignants.

Mots clés : *génétique fondamentale, didacticiels, objectifs, enquêtes, conditions d'utilisation.*

Abstract

The work presented here concerns the introduction of several tutorials for genetics in biology teaching during the two first years of sciences at the university level. Several surveys were carried out among the students and the teachers of two French universities using the tutorials. The analysis of results led us to define better conditions of use for didactic software. The survey makes evident characteristics of this new work tool. While we were using the tutorials, new elements appeared in this type of teaching such as a redefinition of the respective functions of the students and of the teachers.

Key words : *fundamental genetics, tutorials, aims, surveys, conditions of use.*

Resumen

El presente trabajo concierne la introducción de un tutorial para genética fundamental en la enseñanza del primer ciclo universitario científico. Nosotros presentamos el análisis de los resultados de investigaciones realizadas con estudiantes y enseñantes de dos universidades francesas que utilizan tutoriales. Estos resultados nos conducen a la definición de las condiciones necesarias a una utilización satisfaciente de los tutoriales. Estas investigaciones muestran las características de esta nueva herramienta de trabajo. Las observaciones realizadas en el momento de la utilización de los tutoriales revelan elementos nuevos en este tipo de enseñanza ; se asiste en particular a una redefinición de los roles específicos de los estudiantes y de los enseñantes.

Palabras claves : *genética fundamental, tutoriales, objetivos, investigaciones, condiciones de utilización.*

Ce sont les différences importantes constatées entre les étudiants, au niveau des connaissances de base et des rythmes d'apprentissage, qui nous ont incités à créer des didacticiels de génétique. Nous présentons ici des didacticiels entièrement conçus et réalisés par une équipe d'enseignants-chercheurs en génétique (Richard-Molard et al., 1990), ainsi que les conditions de leur utilisation dans un enseignement de premier cycle universitaire (DEUG des Sciences de la Vie). Une nouvelle version des didacticiels vient d'être réalisée. Elle tient compte des évaluations basées sur plusieurs années d'utilisation ainsi que de l'évolution des matériels et logiciels de création.

Le premier objectif de ce travail a été de fournir aux étudiants un outil favorisant, à leur rythme et selon leurs besoins, l'apprentissage des notions de base et des méthodes de la génétique au moment où celle-ci est abordée dans l'enseignement supérieur (Rossignol, 1992).

Le deuxième objectif a été d'offrir aux enseignants une aide dans la gestion de groupes d'étudiants dont les niveaux de connaissance et les rythmes d'assimilation sont différents.

L'intégration des didacticiels aux activités d'enseignement a été pensée au cours de leur conception, puis effectivement réalisée après la mise au point des conditions d'utilisation. Nous avons souhaité éviter deux tentations qui sont « *de cesser de réfléchir en termes d'objectifs de formation pour se laisser aller au plaisir de la technique* », et de « *remplacer une mauvaise pédagogie par une bonne technique : c'est une conséquence directe de la précédente, l'enfermement dans le niveau de réflexion technique* » (Gautier, 1988).

Nous présenterons :

– l'innovation elle-même :

- * les objectifs, les contenus et la structure des didacticiels,
- * le contexte d'enseignement et les conditions d'utilisation adoptées à la suite de différents essais et des enquêtes réalisées auprès des étudiants,

– les données qui fournissent des indications sur la validité des stratégies et des objectifs choisis :

- * les résultats d'une enquête auprès des étudiants après l'utilisation des didacticiels,
- * les observations que nous avons pu faire en séance d'enseignement avec les didacticiels.

1. PRÉSENTATION DES DIDACTICIELS

1.1. Objectifs

Nous proposons aux étudiants grâce à ces différents didacticiels :

- de mieux percevoir leurs difficultés dans l'acquisition et la maîtrise des bases de la génétique,
- de résoudre ces difficultés à temps,
- d'avancer à leur propre rythme.

Ces didacticiels ont été conçus pour une utilisation en complément et à la suite d'un enseignement portant sur les conséquences génétiques de la méiose. Ils proposent des tests de connaissance et des exercices de niveau progressif.

1.2. Contenus

Une première série de didacticiels porte sur **la méiose et la transmission d'un gène**. Elle met à l'épreuve et consolide les connaissances de base des étudiants.

Une deuxième série insiste sur **la démarche du généticien et l'approche expérimentale**. Elle exerce de façon progressive à l'interprétation de résultats expérimentaux, aux prédictions de résultats et au jugement de propositions justificatives inspirées de copies d'étudiants. Les didacticiels de cette deuxième série ont pour objectif l'apprentissage d'un savoir-faire méthodologique (apprentissage des démarches déductive et prédictive).

Ces didacticiels font appel à différents modèles d'étude qui sont : l'algue unicellulaire **Chlamydomonas**, le champignon ascomycète **Sordaria**, le **Maïs** et la mouche du vinaigre la **Drosophile**.

Le didacticiel «Divisions cellulaires, métaphases»

Les notions sur lesquelles portent les sollicitations concernent les niveaux de ploïdie, l'homologie des chromosomes, l'identité des chromatides issues de la répllication de l'ADN, la structure à deux chromatides de tout chromosome métaphasique.

Cet exercice doit permettre aux étudiants de maîtriser le concept de reproduction conforme de l'information cellulaire à la mitose d'une part, et les concepts de réduction de ploïdie et de brassage interchromosomique à la méiose d'autre part. Le brassage intrachromosomique (crossing-over) est introduit dans le didacticiel «Sordaria», en même temps que la notion de distance génétique. Les concepts abordés dans ce premier didacticiel font partie des connaissances de base qui doivent être assimilées avant tout enseignement de génétique.

Le didacticiel «Chlamydomonas» : choix d'un organisme à cycle haplophasique pour l'étude de la transmission d'un gène

Ce didacticiel incite les étudiants à appréhender la ségrégation 2 : 2 d'un couple d'allèles comme la conséquence directe du déroulement de la méiose. On demande à l'étudiant de faire des prédictions en termes de phénotype et de génotype au niveau des produits de méiose regroupés par méiose, puis de généraliser en passant au niveau des produits «en vrac» d'un grand nombre de méioses.

Le didacticiel «Maïs» : étude génétique à différents niveaux de ploïdie (deuxième série)

Ce didacticiel offre aux étudiants la possibilité de réaliser que les conséquences génétiques de la méiose sont les mêmes chez les organismes à cycle haplophasique et chez les organismes à cycle diplophasique, et que les différences constatées s'expliquent par le niveau d'observation (niveau de ploïdie). Le concept de liaison génétique est abordé et les étudiants se familiarisent avec l'écriture des génotypes haploïdes et diploïdes dans le cas de deux gènes.

Le didacticiel «Sordaria» : organisme à cycle haplophasique et à tétrades ordonnées, transmission de plusieurs gènes

Ce didacticiel constitue une initiation à la démarche du généticien, puisque l'étudiant y est guidé pour mettre en œuvre les différents éléments de cette démarche : interprétation de résultats expérimentaux, prédictions, intégration de conclusions ponctuelles pour comprendre le déterminisme génétique d'un caractère et formuler de nouvelles hypothèses en référence aux lois de la génétique. Des calculs de distance génétique sont demandés aux étudiants et l'étude de la ségrégation de plusieurs gènes contrôlant un même caractère est abordée. L'existence de souches mutées pour deux gènes ou pour un gène ayant un même phénotype permet de souligner la différence entre un phénotype et un génotype, et d'insister sur l'importance qualitative et quantitative de ce que l'on appelle la ségrégation 2 : 2.

Le didacticiel «Drosophile» : cycle diplophasique, hérédité liée au sexe

Il s'agit d'un exercice de synthèse entraînant les étudiants à une réflexion critique. À partir de différents résultats de croisements, les étudiants mettent en jeu une démarche déductive. Celle-ci les conduit à conclure soit à une hérédité liée au sexe du caractère étudié, soit à l'absence d'une telle hérédité, soit enfin, à une impossibilité de choisir entre ces deux situations par insuffisance de données génétiques. La réflexion critique des étudiants s'exerce au cours de la confrontation de leurs propres explications à une série d'explications (justes ou fausses) proposées par le didacticiel.

Pour que le travail avec les didacticiels soit le plus efficace possible, nous incitons les étudiants à réfléchir avec «du papier et un crayon». C'est le cas, en particulier, pour la deuxième partie du didacticiel «Sordaria» où il est nécessaire de franchir différentes étapes pour pouvoir répondre aux questions. Pour le didacticiel «Drosophile», où les étudiants ont à confronter leurs explications à celles proposées par le didacticiel, s'ils ne notent pas les différentes étapes de leur raisonnement, l'exercice n'est pas profitable.

1.3. Structure des didacticiels

Chaque didacticiel consiste en un exercice guidé et commenté. La conception des didacticiels s'est appuyée sur les réponses des étudiants à des questionnaires simulant le déroulement des exercices. Les réponses incorrectes ont été analysées puis classées par type d'erreur. C'est à partir de cette analyse que les commentaires explicatifs, qui sont fournis au cours du déroulement des didacticiels, ont été élaborés pour souligner les notions ou concepts mal assimilés, les erreurs de raisonnement, etc. La reconnaissance des réponses des étudiants et la pertinence des commentaires explicatifs ont été améliorées de deux manières : par l'analyse des fichiers d'enregistrement des réponses fournies au cours du déroulement des didacticiels, et au cours des discussions que nous avons eues avec les étudiants.

1.3.1. Exemples de réponses incorrectes

Pour le didacticiel «Divisions cellulaires, métaphases»

Certains étudiants ne savent pas reconnaître une figure de mitose. D'autres n'ont pas réalisé que :

- pour toute métaphase les chromosomes possèdent toujours deux chromatides,
- l'appariement des chromosomes se fait entre les chromosomes homologues à la première division de la méiose (méiose I),
- le nombre de chromosomes n'est plus que de moitié en deuxième division de la méiose (méiose II),
- on ne retrouve pas de chromosomes homologues en métaphase de deuxième division de la méiose (méiose II).

Pour le didacticiel «Chlamydomonas»

On indique aux étudiants que le caractère étudié est sous le contrôle d'un couple d'allèles et que le croisement est réalisé entre deux souches, l'une possédant l'allèle sauvage a^+ , l'autre l'allèle mutant correspondant a .

Question :

- *Donnez le nombre d'exemplaires de chaque allèle a et a^+ en prophase de première division de la méiose et justifiez votre réponse.*

Une réponse correcte possible :

- il y a deux exemplaires de chaque allèle, car il y a eu duplication des chromosomes.

L'objectif de la question est que les étudiants établissent la relation entre la réplication de l'ADN en interphase avant la méiose, la duplication des chromosomes et le doublement des allèles de chaque gène en prophase de première division de méiose.

Voici deux exemples de réponses fausses :

- «*c'est deux car il y a 2N chromosomes*» (le nombre est exact mais la justification ne l'est pas).

Dans ce cas, **la question peut avoir été lue autrement** : le nombre de chaque allèle a été compris comme le nombre d'allèles différents ;

- «*il y en a un de chaque*».

Pour cette réponse, il y a eu oubli de la synthèse d'ADN en interphase et de la duplication des chromosomes qui s'ensuit.

Pour le didacticiel «Mais»

Voir au paragraphe 1.3.2. les réponses R4 et R5 à la question Q2.

Pour le didacticiel «Sordaria»

Question :

- *À partir des résultats du croisement souche mutante A par souche sauvage (sur un grand nombre d'asques observés, six types d'asques à spores ordonnées sont identifiés), on émet l'hypothèse suivante : la souche A est mutée au niveau d'un seul gène contrôlant la pigmentation des spores. Citez les résultats qui confirment cette hypothèse.*

Une réponse correcte possible :

- il n'y a que des phénotypes de spores de type parental, en égale quantité et dans chaque asque.

L'objectif de cette question est que les étudiants fassent un tri parmi les données afin de n'utiliser que celles qui sont nécessaires pour répondre à la question posée.

Certains étudiants mentionnent un résultat qui n'est pas fourni : ils répondent qu'il y a autant de chaque type d'asque, alors que l'effectif de chaque type d'asque n'est pas fourni. **D'autres étudiants citent un résultat inutile ici** : l'ordre des spores dans l'asque. **D'autres encore oublient de mentionner un résultat important** : l'égalité de quantité de chaque type de spore dans chaque asque.

Autre question, après l'analyse de trois croisements (souche mutante par souche sauvage) réalisés à partir de trois souches mutantes de même phénotype et le calcul de distance génétique (gène-centromère) :

- *Déterminez le nombre de gènes impliqués dans la synthèse du pigment.*

Une des réponses correctes possibles :

- il y a au moins trois gènes, car les distances gène-centromère calculées pour le gène muté de chaque souche mutante sont différentes.

L'objectif de la question est que les étudiants mettent en relation plusieurs informations génétiques qu'ils ont déduites précédemment des différents résultats fournis (le nombre de gènes mutés pour chaque souche mutante, les distances génétiques gène-centromère calculées pour chaque gène).

Certains redonnent une réponse déjà fournie précédemment : ils répètent l'interprétation déjà donnée pour chaque croisement sans utiliser le calcul des distances génétiques. **D'autres donnent un nombre de gènes exact mais une justification erronée** : ils répondent trois gènes car il y a trois souches mutantes (le nombre de gènes est correct, mais la justification que les étudiants fournissent ne l'est pas). **D'autres encore fournissent des réponses où le nombre de gènes et la justification sont faux** :

- *«la réponse est un gène car il n'y a qu'un caractère étudié»,*
- *ou bien «un gène car les trois souches mutantes ont la même couleur de spore»,*
- *ou bien «deux gènes car le locus du gène est différent pour chacun des croisements» ;*

pour cette dernière réponse, les étudiants concluent implicitement qu'il n'y a pas de gène dans le cas où la distance génétique calculée est égale à 0 cM.

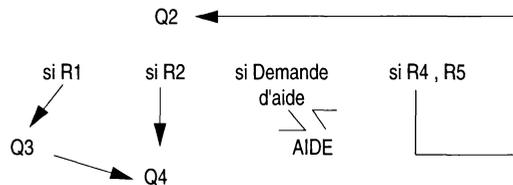
1.3.2. Exemples de cheminements diversifiés

En cours d'exercice, l'apprenant peut être aiguillé vers une **aide** (rappel d'informations, rappels de résultats déjà obtenus, proposition d'une autre formulation de la question...), ou vers des questions supplémentaires. Un **lexique** est consultable à tout moment. Ainsi, des **cheminements diversifiés** sont créés pour une adaptation optimum à l'état des connaissances de l'apprenant.

Pour le didacticiel «Divisions cellulaires, métaphases»

Le didacticiel «Divisions cellulaires, métaphases» se présente sous la forme d'un questionnaire à quatre choix (mitose, méiose I, méiose II, impossible) en réponse à des figures censées représenter les chromosomes lors des divisions d'une cellule à $2n = 4$ (dans les figures de méiose, nous faisons abstraction des crossing-over). **Les figures à interpréter sont tirées, d'une manière aléatoire, parmi des familles de figures similaires mais non identiques. Ceci permet de solliciter les étudiants au moins deux fois sur un même thème (à un moment quelconque du déroulement du didacticiel), afin de limiter les réponses justes dues au hasard. À chaque réponse, qu'elle soit juste ou fausse, est associé un commentaire explicatif. Plus l'étudiant fait d'erreurs, plus il aura de figures à interpréter (de 11 à 20). Si l'étudiant refait l'exercice, il ne reverra pas les figures dans le même ordre (tirage aléatoire des figures), ni nécessairement les mêmes figures.**

Pour le didacticiel «Maïs»



Question Q2 :

- *Quelle information concernant le génotype du pied de maïs vous apporte l'existence de grains de pollen se colorant en bleu ou en brun en présence de lugol ? Justifiez votre réponse.*

L'objectif de cette question est que les étudiants réalisent que la caractéristique générale (pour un caractère donné) d'un génotype – l'homozygotie ou l'hétérozygotie – se détermine sans faire l'analyse d'effectifs et donc sans connaître le nombre de gènes qui rend compte des différences observées.

Si réponse R1 (une des réponses correctes possibles) :

- comme il y a deux types de gamètes, il y a au moins un gène contrôlant le caractère coloration.

Commentaire de la réponse : *oui.*

La question Q3 est alors envoyée :

- *Cependant, l'existence de plus d'un type de grain de pollen permet de préciser une caractéristique du génotype du pied de maïs qui est indépendante du nombre de gènes. Donnez cette caractéristique.*

Si réponse R2 (trois exemples de réponses correctes) :

- le génotype du pied de maïs est hétérozygote
- le génotype du pied de maïs n'est pas homozygote
- le génotype du pied de maïs n'est pas de souche pure,

la question Q4 est envoyée à l'étudiant :

- *Le dénombrement des différents types de gamètes conduit au résultat suivant : 495 gamètes se colorent en bleu et 525 se colorent en brun.*

Indiquez le nombre de gènes ou de couples d'allèles contrôlant ici la coloration des gamètes. Justifiez.

Si demande d'aide, voici le commentaire d'aide qui est envoyé :

- *L'existence de plus d'un type de grain de pollen permet de préciser une caractéristique du génotype du pied de maïs qui est indépendante du nombre de gènes ou de couples d'allèles en jeu.*

Si réponse R4 (un exemple de réponse incorrecte) :

- il y a un gène,

le commentaire de la réponse est le suivant :

- *Non. Sans les effectifs des deux types de grains de pollen, vous ne pouvez pas conclure quant au nombre de gènes ou de couples d'allèles contrôlant le caractère alternatif dans ce croisement.*

Une nouvelle réponse à Q2 est alors demandée à l'étudiant.

Si réponse R5 (deux exemples de réponses incorrectes) :

- on ne peut pas conclure car il manque des informations ;
- on ne sait rien sur le génotype en l'absence des effectifs.

Commentaire de la réponse :

- *S'il est impossible de donner avec précision le génotype du pied de maïs, l'existence de plus d'un type de grain de pollen apporte cependant une information importante.*

Une nouvelle réponse à Q2 est alors demandée à l'étudiant.

1.3.3. Exemples de bilans

Des **bilans** du travail réalisé par les étudiants sont proposés à la fin de chaque didacticiel pour donner une indication du niveau acquis, pour souligner les incohérences détectées au cours du déroulement de l'exercice et, si nécessaire, pour fournir des indications sur le travail à effectuer afin d'atteindre le niveau requis.

Nous avons choisi de ne pas noter le travail des étudiants.

Pour le didacticiel «Divisions cellulaires, métaphases»

Bilan

Ce didacticiel est terminé, il vous faudra réussir cet exercice avant de passer aux suivants... Voyons plus précisément les types de figures avec lesquelles vous avez eu des difficultés.

Dans un premier temps, vous n'avez pas su voir, sur une figure, qu'il était **impossible** que ce soit une **métaphase** puisque les chromosomes n'avaient qu'**une seule chromatide**. Par la suite c'était correct.

(Les schémas de figures impossibles non reconnues sont affichées à l'écran)

ATTENTION !

Vous n'avez pas reconnu comme **Métaphase de Méiose II** une des figures suivantes, pourtant, dans un cas précédent, il n'y a pas eu d'erreur :

(Les schémas de méiose II sont affichés à l'écran)

Vous avez eu des problèmes avec deux des figures suivantes ; vous n'avez pas réussi à vous corriger sur une autre figure du même type, notez bien que ces 4 figures sont équivalentes 2 à 2 :

**(2 figures impossibles : appariements illégitimes en méiose I
et 2 figures possibles : appariements légitimes en méiose I
sont affichées à l'écran)**

Pour le didacticiel «Sordaria»

Bilan

Ce didacticiel est terminé, voici le bilan que nous pouvons faire de votre travail.

À l'issue des premiers croisements, vous n'avez pas su exploiter les distances gène-centromère (significativement différentes) pour postuler l'existence de trois gènes contrôlant la pigmentation des spores. Cependant, vous avez réussi à donner une des réponses possibles à la question relative au quatrième croisement : souche mutante D par sauvage, ce qui montre que, dans ce cas, vous avez été capable d'exploiter les distances gène-centromère.

2. L'INTRODUCTION DES DIDACTICIELS DANS L'ENSEIGNEMENT : CONTEXTE ET CONDITIONS D'UTILISATION

2.1. À l'université d'Orsay

À Orsay, l'enseignement de la génétique au DEUG des Sciences de la Vie se fait en deuxième année, au cours d'un module semestriel. Les prérequis (matériel génétique : nature, réplication et expression ; gène : structure et fonction ; divisions cellulaires : mitose, méiose) sont enseignés en première année de DEUG.

Le module de deuxième année est effectué sous la forme d'un enseignement dit intégré : l'ensemble des connaissances théoriques et pratiques est apporté aux étudiants (par groupes de 24) au cours de séances non différenciées en travaux dirigés, travaux pratiques et cours. Dans le module, 23 heures sont consacrées à la génétique fondamentale et 4 heures 1/4 à l'utilisation des didacticiels de génétique (soit 18 % du temps réservé à la génétique fondamentale).

La durée moyenne d'utilisation des différents didacticiels est de trente minutes pour chacun des deux didacticiels de la première série, une heure pour chacun des trois didacticiels de la deuxième série.

Après avoir testé différentes conditions d'utilisation depuis 1986, nous sommes parvenus aux conditions actuelles qui satisfont les enseignants :

- le didacticiel est utilisé en alternance avec l'enseignement théorique et pratique ;
- le délai entre les différentes parties du cours et l'utilisation des didacticiels est de huit à dix jours ; ce délai, ni trop long ni trop court, semble un bon compromis, car il donne aux étudiants le temps de travailler les notions introduites en cours et permet de limiter leur oubli ;
- la durée des séances avec les didacticiels ne dépasse pas 1 h 15 à 1 h 30. Au-delà, le travail des étudiants est moins efficace ; en effet, ces séances sont fatigantes, car les étudiants sont sollicités d'une manière continue.

Cet enseignement concerne chaque année environ 400 étudiants qui travaillent en binôme et qui sont répartis en groupes de 24 étudiants. Chaque groupe d'étudiants est sous la responsabilité d'un enseignant.

L'existence d'un libre-service permet aux étudiants de venir travailler en binôme ou en individuel, soit pour terminer un didacticiel, soit pour le refaire. Pendant ces séances, le lexique est particulièrement consulté. Ce libre-service est plus spécialement fréquenté pendant les périodes précédant les contrôles écrits et les examens.

2.2. À l'université de Marseille

En 1991-1992 à Marseille, le didacticiel a été utilisé dès la première année du DEUG des Sciences de la Vie, trois mois après le cours.

La durée des séances avec les didacticiels est de deux heures. Les étudiants travaillent en binôme et sont répartis en groupes de 35 étudiants, sous la responsabilité de deux enseignants. Seul un petit nombre de micro-ordinateurs est disponible en libre-service.

Le nombre d'étudiants concernés chaque année est d'environ 300.

À la suite des résultats de l'enquête réalisée auprès des étudiants par une collègue de Marseille¹ (voir paragraphe 3.1.), de nouvelles conditions d'utilisation du didacticiel ont été définies pour l'année 1992-1993 :

- le didacticiel est utilisé juste après le cours et la durée des séances avec les didacticiels est d'une heure ;
- les groupes d'étudiants sont dédoublés ; 17 étudiants travaillent en salle d'informatique en présence d'un enseignant.

3. L'OPINION DES ÉTUDIANTS : RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE RÉALISÉE AUPRÈS DES ÉTUDIANTS DE L'UNIVERSITÉ DE MARSEILLE

Une enquête anonyme a été réalisée en 1991-1992 auprès de cent dix étudiants de Marseille.

Tous les étudiants étaient présents à l'ensemble des séances.

L'âge moyen des étudiants de première année est de 19 ans et demi (de 18 à 24 ans). 63 % des étudiants sont de sexe féminin et 37 % de sexe masculin. 14 % sont des redoublants.

3.1. Résultats de l'enquête

D'une manière globale, l'analyse des questionnaires montre que :

– **67 % des étudiants trouvent cette nouvelle manière de travailler intéressante**, 15 % trouvent cette formule éternante, 10 % sont sans opinion et 8 % la trouvent ennuyeuse ;

– **70 % des étudiants souhaitent que l'utilisation des didacticiels soit poursuivie**, 22 % n'ont pas d'opinion et 8 % veulent arrêter.

1 CHARMOT D., enseignant-chercheur en génétique, Laboratoire de génétique et de biologie cellulaire, Campus de Luminy, 13288 Marseille cedex 9.

À propos de l'utilisation d'un micro-ordinateur

39 % n'ont jamais utilisé de micro-ordinateur (il s'agit d'étudiants de première année qui n'ont pas encore eu d'enseignement en informatique ni de rapport de stage à faire dans le cadre de leurs études).

37 % trouvent que la lecture à l'écran est plus difficile que sur le papier.

À propos de la consultation du lexique

92 % des étudiants ont eu recours au lexique, dont 76 % un peu et 16 % souvent.

À propos des didacticiels comme bon instrument de compréhension ou bon instrument de mémorisation

56 % des étudiants trouvent que ces didacticiels sont un bon instrument de compréhension.

28% trouvent qu'ils sont un bon instrument de mémorisation.

À propos du sentiment d'avoir éclairci certains points du cours

- peut-être (37%)
- non (17%)
- oui (46%).

Dans ce cas, il est demandé d'indiquer **les points sur lesquels les didacticiels ont été profitables.**

Voici ce qui est le plus souvent cité :

- les définitions des termes utilisés grâce à un lexique accessible à tout moment,
- la variété des exemples,
- la clarté des commentaires,
- l'étude :
 - des différentes phases de la méiose d'un point de vue génétique,
 - du cycle du Sordaria avec la formation des différents types d'asques,
 - des différents niveaux d'observation (diploïde et haploïde),
 - des conditions d'observation d'une hérédité liée au sexe.

À propos des avantages et des inconvénients des didacticiels

Les avantages liés à l'outil informatique :

- la prise en compte immédiate et positive des erreurs, sans sanction (ils ne sont pas notés),
- une réflexion personnelle stimulée,
- les bilans personnalisés,
- le travail à son propre rythme,

- les rappels de connaissances oubliées,
- la possibilité de faire le point de ses connaissances,
- l'apprentissage de la précision des termes et de la concision des réponses.

Les avantages liés aux conditions d'utilisation :

- le travail en binôme : *«en expliquant à l'autre, on voit si on a vraiment compris, de nouvelles questions auxquelles on n'avait pas pensé apparaissent»*,
- le travail en groupe avec une aide à proximité : *«en séances de TD ça va souvent trop vite»*.

Les inconvénients :

- les réponses des étudiants ne sont pas toujours reconnues (dans ce cas l'étudiant reçoit un message *«désolé, mais votre réponse n'a pas été prévue»*, parfois assorti d'une incitation à relire la question et/ou de recommandations pour une nouvelle formulation de la réponse),
- les explications sont parfois trop longues,
- la nomenclature génétique est contraignante,
- le cas de binôme où il y a une trop grande différence de niveau d'assimilation des connaissances entre les deux étudiants : *«cela ralentit le travail»*.

Les étudiants d'Orsay, qui n'ont été interrogés que sur les avantages et les inconvénients des didacticiels, font des remarques semblables à celles des étudiants de Marseille.

À propos des conditions d'utilisation et d'insertion dans l'enseignement (voir les conditions d'utilisation des didacticiels avant l'enquête au paragraphe 2.2.)

- il y a un trop grand délai entre le cours et l'utilisation des didacticiels, ce qui entraîne un oubli des notions enseignées,
- la durée des séances d'utilisation des didacticiels est trop longue,
- il y a un trop grand nombre d'étudiants en salle d'informatique,
- il est nécessaire d'avoir déjà travaillé les notions introduites en cours,
- il serait souhaitable de revenir en travaux dirigés traditionnels sur des points mal compris en séance avec le didacticiel.

3.2. Discussion des résultats de l'enquête réalisée auprès des étudiants de Marseille

Nous constatons que, malgré les mauvaises conditions d'utilisation des didacticiels, la majorité des étudiants trouvent ce nouvel outil intéressant et souhaitent que ce type d'enseignement soit poursuivi.

Cependant, nous remarquons que certains étudiants ont des réactions d'énervement et d'ennui, et que d'autres souhaitent même l'arrêt de ce type d'enseignement.

La durée trop longue des séances et le trop grand nombre d'étudiants par salle peuvent expliquer, au moins en partie, l'énervement (15 % des étudiants), l'ennui (8 % des étudiants) ou le souhait d'arrêter l'utilisation des didacticiels (8 % des étudiants).

Il se peut aussi que la nouveauté de l'outil micro-ordinateur (39 % des étudiants) et la difficulté de lecture à l'écran (37 %), soient en partie responsables de ces appréciations négatives.

Par ailleurs, le fait d'être redoublant peut également conduire à ce type de réaction (14 %).

Enfin, les inconvénients cités par les étudiants au paragraphe 3.1. peuvent également être en cause.

Seule une enquête réalisée dans le nouveau contexte d'utilisation (voir paragraphe 2.2.) permettrait de tester ces différentes hypothèses.

4. LE FONCTIONNEMENT DES SÉANCES D'ENSEIGNEMENT AVEC LES DIDACTICIELS : RÉSULTATS D'OBSERVATIONS

4.1. Qu'en est-il pour les étudiants ?

Nous constatons qu'au cours de ces séances l'implication des étudiants est importante. Ceci s'explique par la sollicitation continue de chaque étudiant ou de chaque binôme et par l'analyse immédiate des réponses des étudiants. Un contexte qui soutient et stimule la réflexion est créé par l'envoi d'un commentaire à chaque réponse, qu'elle soit correcte ou fautive, puis par l'analyse de l'ensemble des réponses (voir paragraphe 1.3.3. les exemples de bilan). Par ailleurs, nous pensons que l'analyse immédiate du travail des étudiants est un élément important de l'apprentissage.

Une autre situation est également propice à l'apprentissage. En effet, le didacticiel fournit la mémoire de ce qui s'est passé au cours du travail. La question, la réponse étudiante et le commentaire de cette réponse restent affichés à l'écran le temps que l'on veut. Nous remarquons que ceci peut permettre aux étudiants de **prendre conscience qu'ils ont lu une question partiellement ou d'une autre manière** que celle envisagée par le didacticiel ou encore **qu'ils ont oublié des données du problème** (voir paragraphe 1.3.1. exemples de réponses incorrectes). Ainsi, cette situation particulière

permet aux étudiants de réaliser, **par eux-mêmes**, dans la plupart des cas, l'importance de prendre le temps d'analyser le texte des données et celui de la question avant d'essayer de répondre.

Si nous espérons une importante implication des étudiants au cours de ces séances, nous ne nous attendions pas à observer un aussi grand nombre de discussions.

En effet, alors que nous ne voyions que l'aspect négatif du travail en binôme, c'est-à-dire ne pas pouvoir suivre le travail de chaque étudiant, nous observons un aspect positif de cette situation. Le fait d'être en binôme entraîne des conflits puisque les étudiants ne peuvent fournir qu'une seule réponse à la fois. La nécessité du choix de la réponse conduit alors à de nombreux échanges entre les étudiants d'un même binôme ou de binômes différents. Dans cette situation, nous constatons qu'un important travail de réflexion et d'argumentation a lieu au cours de ces discussions et nous considérons qu'elles favorisent l'assimilation des notions et concepts (distance génétique, ségrégation 2 : 2, transmission de plusieurs gènes, liaison génétique...) ainsi que l'apprentissage des démarches déductives et prédictives.

4.2. Qu'en est-il pour les enseignants ?

Au cours de ces séances, le rôle de l'enseignant est différent de celui qu'il a pendant l'enseignement sans les didacticiels. En effet, puisque l'enseignant est déchargé de la conduite de la séance et de la gestion des erreurs les plus courantes, **il est dans de meilleures conditions de travail pour fournir des explications à chaque étudiant qui le souhaite**. L'enseignant joue davantage un rôle d'observateur attentif prêt à intervenir s'il y a demande ou s'il le juge nécessaire. Pouvoir, dans ces conditions, revenir sur des notions qui ont été déjà vues par ailleurs mais qui sont encore mal assimilées est apprécié par les enseignants.

L'enseignant est également plus disponible pour inciter les étudiants à travailler avec «du papier et un crayon». Nous estimons de cette manière limiter les réponses fournies au hasard, aider au choix et à l'analyse des données essentielles, aider à noter les différentes étapes de l'analyse et enfin, favoriser la schématisation et l'utilisation des symboles.

Par ailleurs, grâce à l'affichage sur l'écran de la question, de la réponse de l'étudiant et du commentaire de sa réponse, **l'enseignant peut être aidé dans son travail de compréhension des difficultés d'un étudiant**, difficultés que le didacticiel n'a pu analyser. L'enseignant peut alors, par une série de questions, reconstituer le contexte où la réponse de l'étudiant prend sens et amener celui-ci à réaliser que le contexte qui lui est

proposé est différent. C'est un travail qu'il est difficile d'effectuer en travaux dirigés sans les didacticiels en raison du temps qu'il demande. En effet, il est nécessaire de faire avancer la séance sans trop faire «perdre de temps» aux étudiants qui n'ont pas cette difficulté ou qui l'ont, mais pas au même moment.

Enfin, **l'enseignant, s'il le souhaite, pourra connaître les erreurs les plus souvent faites par les étudiants d'un groupe** grâce à l'enregistrement et au tri des réponses des étudiants que permet le système auteur DruiD². L'enseignant, s'il le juge nécessaire, pourra alors revenir sur les difficultés des étudiants en séance sans les didacticiels.

4.3. Qu'en est-il des relations enseignants-enseignés ?

L'introduction d'un intermédiaire, le micro-ordinateur, qui détient une partie du savoir et des explications, semble faciliter les échanges explicatifs entre les étudiants et les enseignants. Il se peut que cet intermédiaire, «tierce personne neutre», permette de réduire les confrontations duelles bloquantes qui peuvent avoir lieu au cours des échanges explicatifs entre l'étudiant et l'enseignant.

Notons enfin que l'aide à proximité que représente l'enseignant, dont les interventions sont moins systématiques et plus à la demande, est appréciée par les étudiants (voir paragraphe 3.1.).

5. CONCLUSION

En conclusion, il apparaît que, dans les conditions d'utilisation telles qu'elles sont actuellement définies à Orsay et à Marseille, ces didacticiels sont bien adaptés aux étudiants du premier cycle universitaire. Ils leur fournissent un nouvel outil de travail qui les aide, à leur propre rythme et selon leurs besoins, dans l'apprentissage de la génétique et qui complète ceux qui existent déjà dans l'enseignement de la génétique.

L'utilisation des didacticiels en séance d'enseignement crée un nouveau contexte de travail pour les enseignants. Ce contexte leur fournit de nouveaux moyens dans la gestion de groupes d'étudiants dont les niveaux de connaissance et les rythmes d'apprentissage sont différents.

Pour nous, auteurs des didacticiels, un important travail de réflexion, d'analyse de la discipline et des erreurs des étudiants a été nécessaire pour conduire l'interaction avec l'étudiant par l'intermédiaire de l'ordinateur.

2 Système-auteur DruiD (1992). Laboratoire d'ingénierie didactique (LID), Université Paris 7, 2 place Jussieu, 75251 Paris cedex 05.

Nous avons clarifié la définition des objectifs de notre enseignement. Par ailleurs, il est apparu au cours de ce travail que de nombreux implicites étaient présents dans l'enseignement. Aussi sommes-nous plus attentifs à la formulation des questions et des explications mutuelles entre les enseignants et les étudiants au cours des séances d'enseignement sans les didacticiels.

BIBLIOGRAPHIE

- GAUTIER G. (1988). Que faire des nouveaux medias ? *Éducation permanente*, n° 93-94, pp. 95-108.
- RICHARD-MOLARD C., LAURENT J., BOUCHON B., HEUDE M., MASSON A., MONNEROT M. & PRUDHOMMEAU C. (1990). Conception et réalisation d'un didacticiel de génétique : bilan de trois années d'utilisation. *BIOpedagos*, n°5, Laboratoire de physiologie animale et bioinformatique, Université de Caen, 14032 Caen cedex, pp. 67-75.
- ROSSIGNOL J.-L. (1992). *Génétique*, 4ème édition. Paris, Masson.

Remerciements

Je remercie Marie-Geneviève SÉRÉ, responsable du groupe DidaScO, Université Paris XI, pour ses critiques et ses remarques constructives concernant la rédaction de cet article.

Un test de rentrée à l'Université

Gérard REBMANN

Université Denis Diderot-Paris 7
Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Tour 24 - 2 Place Jussieu
75251 Paris cedex 05, Case 7021, France.

Résumé

Depuis 1987, l'Université Paris 7, maintenant dénommée Denis Diderot, propose un test de rentrée informatisé, destiné aux étudiants des DEUG scientifiques. Ce test d'autoévaluation, dont la fonction principale est de fournir un diagnostic pour inciter à des révisions, a été renouvelé en profondeur en 1994.

Le présent article propose une analyse de l'opération, tant dans ses buts que dans les modalités de réalisation. Les principales étapes ainsi que les choix essentiels sont explicités. L'intérêt de ce test réside dans l'immédiateté et la spécificité du diagnostic ainsi que dans la qualité du dialogue étudiant-enseignant, susceptible de s'instaurer à l'issue du diagnostic.

Mots clés : *mécanique, physique, autoévaluation, test informatisé, université.*

Abstract

Since 1987, the Paris 7 University, now called Denis-Diderot, has proposed a computer test for freshmen entering the sciences. The main goal of this self-assessment test is to provide a diagnosis in order to incite students to review the subjects they are weak in. The test was thoroughly restructured in 1994.

This paper offers an analysis of the operation, in terms of goals and usage. The main stages and the essential choices are explicitly given. The main properties are the instantaneous and specific diagnosis and also the quality of the exchange between professor and student, arising after diagnosis, at the very end of the test.

Key words : *mechanics, physics, self assessment, computer test, university.*

Resumen

Desde 1987, la Universidad Paris 7, ahora llamada Denis Diderot, propone un test de ingreso computarizado, destinado a los estudiantes de DEUG científico. Este test de autoevaluación donde la función principal es de dar un diagnóstico para incitar a las revisiones, ha sido renovado profundamente en 1994.

El presente artículo propone un análisis profundo de la operación, tanto en sus propósitos como en las modalidades de realización. Las principales etapas así como las selecciones esenciales son explicitadas. Las principales cualidades residen en lo inmediato y la especificidad del diagnóstico así como en la cualidad del diálogo estudiante-enseñante, susceptible de instalarse como resultado del diagnóstico.

Palabras claves : *mecánica, física, autoevaluación, test computarizado, universidad.*

1. INTRODUCTION

La population des étudiants qui arrivent à l'université en DEUG scientifiques (Sciences de la Matière ou SM, et Mathématiques et Informatique appliquées aux sciences ou MIAS), est des plus hétérogènes. Jusqu'en 1994, elle était constituée d'étudiants provenant de baccalauréats de séries différentes (C, D, E, F, étrangers...) ; les nouveaux programmes et la refonte du baccalauréat font qu'elle le restera encore après 1995, car les étudiants auront suivi des enseignements de spécialités dont les contenus et les niveaux seront très liés aux lycées d'origine. De plus un taux non négligeable de «bacs antérieurs», de baccalauréats (ou équivalents) étrangers et d'étudiants en reprise d'études, contribue à cette hétérogénéité.

D'un côté, chaque étudiant possède un titre qui lui permet l'accès à l'enseignement supérieur et s'attend plus ou moins à ce que ses connaissances et son savoir-faire soient adaptés à l'enseignement qu'il va recevoir.

De l'autre côté, les enseignants de l'université pensent que leurs étudiants possèdent bien évidemment les connaissances dites de «base». Ils sont plus ou moins confortés dans cette idée par la présence dans leurs travaux dirigés (TD) d'étudiants aux compétences conformes à leurs espoirs ; ces derniers ne sont pas majoritaires.

Le problème essentiel tient à ce que les deux points de vue qui viennent d'être énoncés ne sont, en pratique, absolument pas compatibles.

L'enseignant imaginant un «étudiant théorique» ne répondra pas réellement aux besoins des vrais étudiants. Une des fonctions essentielles du test-diagnostic sera de rapprocher les deux points de vue, en donnant aux enseignants une représentation globale de leurs étudiants et en indiquant à l'étudiant, assez précisément dans un domaine, ce que les enseignants attendent de lui.

La mise en œuvre de cette opération de diagnostic demande une réflexion approfondie, la maîtrise de l'outil informatique, une très bonne connaissance du public en plus de la compétence «ordinaire» sur le contenu (Rebmann et al., 1988). En pratique, ceci s'obtient par la constitution d'une équipe motivée et représentative des enseignants, autour d'un projet bien défini.

2. LE TEST

Les principales fonctions du test sont le diagnostic de lacunes et d'incompréhensions en physique (essentiellement en mécanique), l'accueil des nouveaux étudiants et la contribution à une statistique de résultats globaux, destinée aux enseignants.

2.1. Les conditions de passation du test

Le public et le calendrier du test sont parfaitement définis. Il s'agit des étudiants qui arrivent à l'université, en première année de DEUG sciences SM ou MIAS. Les étudiants sont convoqués au test à l'occasion des inscriptions pédagogiques. Ils sont donc déjà inscrits dans les groupes de TD lorsqu'ils passent le test. Cette organisation leur garantit que celui-ci n'a pas d'aspect sélectif. Plusieurs centaines d'étudiants doivent passer le test dans un temps assez bref, entre l'inscription pédagogique et la reprise des cours.

On y consacre la semaine qui précède cette reprise, la séance de test étant présentée comme une première séance de TD. Des moyens importants en salles et machines sont mis à disposition. En pratique, à Paris 7, trois salles de seize places chacune sont utilisées pendant quatre jours. Les étudiants sont convoqués toutes les deux heures par groupes de TD. Ils sont accueillis par un enseignant en charge de l'opération, aidé par des enseignants de la section. Les machines disponibles sont au moins des PC type 386 couleur, avec souris.

2.2. Le contenu du test

Les questions abordées dans le test ne seront d lib r ement pas détaillées ici de manière à éviter des effets pervers ultérieurs (entraînement d'élèves) ; toutefois, en voici les grandes lignes.

VECTEURS	Angles et projections Sommes et différences Produit scalaire écriture algébrique du poids d'une masse m
CINÉMATIQUE à une dimension	Lecture de graphe $x(t)$ Grandeurs caractéristiques d'un mouvement périodique Trajectoire Vitesse et accélération
CINÉMATIQUE à deux dimensions	Mouvement circulaire (�quations paramétriques) Calcul et saisie graphique de vecteurs vitesse et accélération
DYNAMIQUE	Action-réaction Chute libre Mouvement et vitesse initiale Montgolfière (�quilibre et mouvement uniforme)

Le test porte sur les vecteurs, la cinématique et la dynamique du point matériel. Certaines notions comme les unités ne sont pas explicites dans le tableau mais sont réparties dans les différentes sections du test. C'est également le cas de certains «outils mathématiques» comme les dérivations de fonction ou de vecteurs ou l'utilisation des graphes de fonctions.

Ce test comporte 53 items dont certains demandent plusieurs éléments de réponse. Il fournit un score global sur 65 points. La plupart des questions sont assez classiques quoique souvent présentées de manière inhabituelle, elles demandent finalement une bonne maîtrise du contenu pour y répondre complètement. Plusieurs des notions abordées font appel à des raisonnements étudiés en didactique de la physique, c'est notamment le cas de l'algébrisation des grandeurs physiques (Rebmann & Viennot, 1994) ou de l'action-réaction (Viennot, 1982). Des confusions force-vitesse (Viennot, 1979) peuvent être mises en évidence à l'occasion de plusieurs questions. Enfin les changements de représentations avec passage du cadre graphique au cadre algébrique ou l'inverse sont également utilisés. L'accent est mis sur le sens physique, sur l'interprétation de graphe.

2.3. L'interactivité

La réalisation informatique à l'aide du système auteur DUO Plus de DDTEC a permis une présentation agréable, avec des formes de questionnement variées (QCM, désignation, association, saisie de texte, saisie de vecteur), ce qui évite toute lassitude. Une programmation événementielle a facilité le recours à des aides contextuelles et aux consignes ainsi que l'adaptation à un public hétérogène, tant du point de vue de la physique que de celui de la pratique de l'outil informatique. Enfin les outils d'analyse de réponse du système ont permis de programmer une catégorisation des erreurs. On peut ainsi enregistrer les réponses et leurs interprétations, ce qui facilite les interprétations ultérieures (diagnostic ou statistiques).

Après chaque réponse la machine indique si celle-ci est exacte ou fautive mais ne donne pas la solution exacte. Toutefois pour certaines questions, l'ordinateur fournit des éléments de solution. En cas d'erreur, on s'efforce de fournir un commentaire en rapport avec l'erreur commise. Il s'instaure ainsi une certaine forme de dialogue. La machine attribue des points à chaque réponse et fournit à la fin un «score» global et un score par partie, qui permettent aux étudiants de provenances différentes de se situer les uns par rapport aux autres. Cet aspect qui contribue à l'émulation est assez prisé par les étudiants. Il a même été réclamé par certains. La distinction entre score et note est subtile, elle peut paraître superflue ou artificielle, mais une note possède en France une connotation scolaire qui suppose qu'il convient d'obtenir la moyenne pour être dans la norme ; or, comme les notions testées ici relèvent de prérequis, la moyenne n'est pas pertinente.

Pour des raisons pratiques (convocation par groupe), la durée du test est limitée, toutefois cette limitation n'est pas gênante car très supérieure à la durée moyenne (90 minutes pour 70 minutes en moyenne environ). De plus, au début de chaque question, l'indication du temps restant est accessible sur demande de l'étudiant, elle n'est pas affichée en permanence, et toute question abordée est achevée : il n'y a ainsi pas de débranchement intempestif pendant une réponse.

2.4. L'aspect diagnostic

À la fin du test, la machine fournit un diagnostic individualisé, sous la forme de conseils incitant à revoir les notions qui ont constitué des obstacles au cours du test. Outre les parties annoncées (vecteurs, cinématique, dynamique), le diagnostic révèle le cas échéant, des problèmes

avec l'algébrisation des grandeurs physiques, les ordres de grandeurs, les unités, la trigonométrie, la dérivation des fonctions trigonométriques, l'utilisation des graphes. Le manque d'attention et la lenteur peuvent également être décelés. Techniquement, on réalise ce diagnostic en associant un compteur à chacune de ces notions ; ces compteurs sont incrémentés lorsque le type d'erreur reconnu correspond à la notion. Ainsi une question peut incrémenter des compteurs différents selon le type d'erreur faite dans la réponse. Un élément du diagnostic (conseil) est présenté chaque fois que son compteur dépasse un seuil fixé, environ au tiers de la totalité des erreurs susceptibles d'incrémenter le compteur.

L'accent est mis sur la prise de conscience par l'étudiant de ses propres problèmes, qu'il lui faudra résoudre par lui-même. Les solutions peuvent être individuelles (travail personnel), utiliser l'entourage (travail en groupe, aide à la maison) ou être fournies par les établissements (tutorat de suivi, groupe de soutien...). Ces problèmes ne consistent pas nécessairement en des lacunes ; l'intérêt et la motivation pour une matière se refl teront aussi, d'une certaine manière, dans le résultat du test qui pourra alors constituer une information utile en vue d'une (r )orientation volontaire.

L'intérêt premier du diagnostic est la prise de conscience, par l'étudiant, de ses lacunes en termes assez précis. Les notions abordées dans le test ne sont pas compliquées mais demandent une bonne maîtrise des concepts et une bonne mobilisation des connaissances. Le niveau de pratique est autant en cause que le contenu. C'est notamment le cas pour les vecteurs où le physicien attend surtout une opérativité efficace de la notion, espérant souvent qu'une compréhension approfondie ne sera que le fruit d'une pratique acharnée.

Il s'agit donc de tenter de répondre à un problème de communication professeur-élève qui appar it lors du dialogue (stéréotypique) où le professeur demande par exemple : «*Avez-vous étudié les vecteurs ?*». Le problème de communication réside dans le fait que l'élève et le professeur ne mettent pas le même contenu dans cette question : un élève a tendance à répondre «oui» lorsqu'il en a «entendu parlé un jour», tandis que le professeur qui entend ce «oui» pense trop souvent que tout ce qui se rapporte à la notion est donc connu.

La solution retenue consiste à poser des questions assez complètes, c'est-à-dire qui mettent plusieurs aspects d'une notion en cause, éventuellement en la d contextualisant de son environnement scolaire standard, pour s'assurer de sa mobilisation.

2.5. L'aspect accueil

On s'assure qu'à la fin du test, l'étudiant a lu les conseils attachés aux éléments de diagnostic. La pratique (Rebmann et al., 1988) a montré qu'il est utile qu'un enseignant établisse le dialogue avec l'étudiant afin de tempérer ou d'amplifier l'impression laissée par le diagnostic informatisé. Cette fonction n'est pas toujours essentielle, toutefois il faut noter que certains étudiants (avec des scores assez bons) sont abattus parce qu'ils découvrent qu'ils ont oublié ce qu'ils croyaient savoir, tandis que d'autres se satisfont d'un score très moyen et se réjouissent de ne pas avoir fait plus d'erreurs !

Ce dialogue est aussi l'occasion d'orienter les révisions nécessaires en début d'année, de manière spécifique dans chaque section du DEUG, ou bien, en s'appuyant sur l'ensemble des résultats disponibles (test, baccalauréat, résultats de l'année énoncés par l'étudiant), on peut aussi l'inciter à s'inscrire au suivi (tutorat). Les utilisations du test sont à adapter aux structures et aux efforts de chaque établissement.

On distinguera les étudiants «standards» (baccalauréat scientifique de l'année) de ceux qui peuvent avoir suivi des voies plus détournées :

- baccalauréats antérieurs (réorientation, échec en classe préparatoire...),
- étudiants étrangers avec d'éventuels décalages de programmes ou des difficultés linguistiques,
- étudiants en reprise d'études, en provenance de la formation continue.

Tous ces «non-standards» sont souvent révélés par les résultats au test, et un dialogue spécifique peut alors s'instaurer entre eux et l'enseignant. On peut ainsi leur consacrer un peu plus de temps si cela s'avère nécessaire.

Une telle réponse spécifique constitue une forme d'accueil appréciable, compte tenu du nombre total d'individus concernés (environ 400 étudiants passent le test chaque année à Paris 7), elle ne serait pratiquement pas envisageable si on devait recevoir chacun individuellement dans le temps imparti pour l'opération (quatre jours).

2.6. L'aspect statistique

En ce qui concerne les enregistrements en vue de statistiques annuelles, le logiciel fabrique un fichier de résultats constitué, pour chaque étudiant, d'un identifiant non-nominal, de ses résultats à l'écrit du baccalauréat en mathématiques et en physique, puis de ses réponses aux questions du test

ainsi que de renseignements comme le recours à l'aide et le temps mis pour répondre. Enfin un résumé comportant le score aux différentes parties et les compteurs d'erreurs déterminantes pour établir le diagnostic sont enregistrés. Ces traces individuelles assemblées constituent à leur tour un fichier de résultats pour une machine donnée. Le regroupement des résultats des différentes machines est réalisé manuellement.

L'analyse des résultats est menée à l'aide d'un tableur standard, elle fournit une statistique des scores par série de baccalauréat et permet également un accès «plus fin» aux proportions de réponses erronées pour chaque question. Les réponses fausses également enregistrées peuvent révéler les confusions, difficultés ou lacunes les plus fréquentes.

Ces enregistrements permettent d'observer l'évolution des proportions entre différents types d'erreurs, notamment celles induites par des conceptions d'élèves, objets de recherches didactiques.

3. LA RÉALISATION

La réalisation d'un tel test est une opération complexe dont nous allons maintenant décrire les étapes essentielles. Il faut considérer le public et les conditions de l'opération, les buts suivis (cf. 1) et faire un certain nombre de choix fondamentaux.

La réalisation s' st échelonnée sur dix-huit mois environ (  temps partiel). La première année a été consacrée à une construction r fl ch e du questionnement et les six mois suivants à la réalisation du produit informatique.

La première étape consiste à réunir une équipe où chacun poursuit les mêmes buts, partage les mêmes préoccupations et motivations. L'équipe est formée d'enseignants de plusieurs établissements de la région parisienne afin de favoriser la diffusion et rentabiliser ainsi l'investissement intellectuel (voir liste des auteurs du test). La pluralité des auteurs permet aussi de favoriser l'émergence d'un consensus relatif à «ce qu'il est important de savoir...».

Les thèmes sont élaborés en sous-groupes (binômes). Les questionnaires produits, discutés et revus en équipe, permettent de fabriquer un premier questionnaire papier. Celui-ci a été expérimenté à l'occasion du test de rentrée (version antérieure) de septembre 1993 (Rebmann et al., 1990).

Cette étape d'expérimentation permet d'éliminer des questions peu significatives (où tous répondent de manière équivalente) et de constituer des corpus de réponses essentiels pour réaliser des analyses de réponses pertinentes et efficaces.

La réalisation informatique utilise un système auteur (DUOPLUS de DDTEC) qui favorise l'analyse des réponses au fur et à mesure et facilite la catégorisation des réponses et l'interactivité. D'un point de vue technique, le recours à un tel système facilite la mise au point et la maintenance du produit.

Les différentes formes du questionnement sont validées par l'équipe d'auteurs qui contribue également à la mise au point informatique.

La nouvelle version du test a ainsi pu être passée en septembre 1994, à l'université Denis Diderot-Paris 7 (378 étudiants) et pour une section à l'université d'Orsay (207 étudiants) ; les autres établissements en proie à des difficultés de mise en place de la réforme ou de matériel n'ont pas pu faire bénéficier leurs étudiants de cette opération.

4. QUELQUES RÉSULTATS

À titre d'illustration, voici quelques résultats obtenus à Denis Diderot-Paris 7.

4.1. Globalement

Le diagramme 1 présente les histogrammes des scores obtenus. Ils représentent le nombre d'étudiants ayant obtenu un score à l'intérieur d'intervalles de 10 points. Les histogrammes illustrent les résultats pour les différentes sections du baccalauréat (C,D, E et autres) et pour l'ensemble. Le total a été ramené de 65 à 100 pour faciliter la lecture. On note que les séries C présentent un histogramme légèrement décalé vers les meilleurs scores.

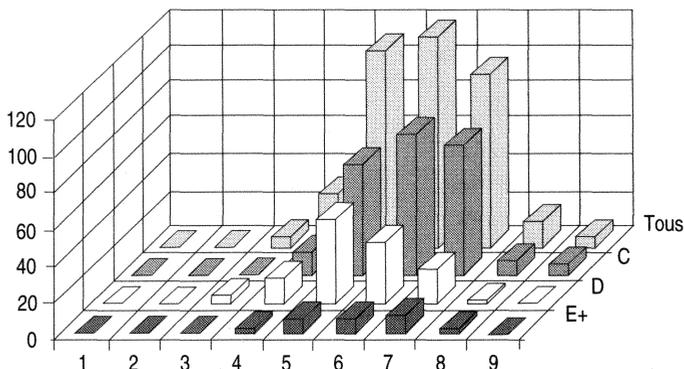


Diagramme 1 : Histogrammes des scores

4.2. Résultats particuliers

On peut également s'intéresser aux résultats obtenus à certaines questions du test. Par exemple, une question porte sur l'algébrisation des grandeurs physiques, qu'on a choisi d'illustrer par l'écriture algébrique du poids d'une masse m . L'énoncé précise : *» On choisit un vecteur unitaire \hat{i} vertical orienté du bas vers le haut ; on note g la mesure algébrique de \mathbf{g} sur l'axe.«*

On constate que 214 étudiants sur 372 (58 %) proposent «- $mg \hat{i}$ » au lieu de « $mg \hat{i}$ ». Il semble que pour eux g est forcément positif. Or, ils ont fait proportionnellement autant d'erreurs que l'ensemble de la population aux questions relatives aux vecteurs qui portent sur des opérations (somme, différence, produit scalaire) où il faut «lire» les vecteurs sur un graphe. Ceci permet de penser que l'erreur incriminée dans cette question est l'expression d'une difficulté supplémentaire, de nature différente, liée à l'algébrisation des grandeurs physiques.

Une autre question relative à la troisième loi de Newton sur l'action-réaction montre que près des deux tiers des étudiants (64 %) sont prêts à renoncer à ce principe pour expliquer une situation de la vie courante...

4.3. Pr dictivit  du test

Afin de comparer les résultats du test avec ceux obtenus en juin aux unités de valeurs de physique de première année, le diagramme 2 présente, en positif, la proportion d'étudiants reçus, et en négatif les proportions d'étudiants ajournés ou ayant abandonné, pour des tranches de scores globaux différents. Les populations des tranches sont comprises entre 42 et 110 individus, pour un ensemble de 360 étudiants suivis.

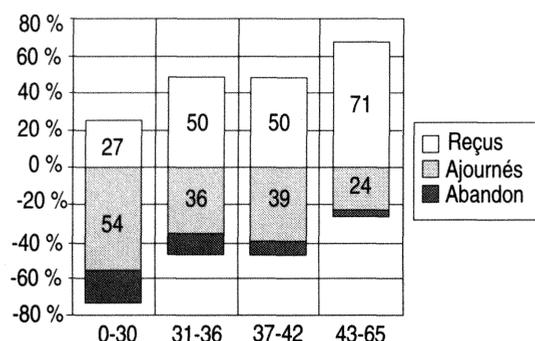


Diagramme 2 : Pourcentage de reçus/ajournés en fonction des résultats du test

On constate que ceux qui obtiennent un score supérieur à 43/65 (ce qui correspond dans le diagramme 1 à 66/100) ont une probabilité d'être reçus bien plus élevée que ceux qui obtiennent un score inférieur à 30/65 (soit 46/100). Toutefois, un quart de ceux qui obtiennent de «mauvais résultats» au test réussissent à l'examen et un quart de ceux qui obtiennent de «bons résultats» échouent. Ceci permet de relativiser l'importance des prérequis par rapport à l'enseignement et confirme qu'il ne serait pas raisonnable de sélectionner sur un tel test.

5. CONCLUSION

Un test de rentrée à l'Université s'est révélé suffisamment bénéfique pour être renouvelé pendant plusieurs années consécutives (depuis 1987) et récemment rénové. On constate que les moyens informatiques connus pour leur interactivité et le dialogue homme-machine, n'excluent pas l'interactivité intellectuelle et le dialogue entre humains (étudiants-professeur) si on les emploie avec pertinence. Une telle opération fournit à l'étudiant un diagnostic immédiatement utilisable, elle permet aussi un démarrage plus rapide dans le semestre et constitue une forme d'accueil utile aux étudiants «non-standards».

Cette opération est bien acceptée par tous. Les étudiants se sont montrés intéressés, voire enthousiastes, certains ont même souhaité une généralisation (autres matières ou autres périodes de l'année). La plupart des enseignants apprécient cette première prise de contact et certains le montrent par leur fidélité à l'opération.

Une exploitation des résultats du test permet, outre des statistiques annuelles, une mesure de l'importance des difficultés liées à certaines conceptions étudiées en didactique de la physique.

LISTE DES AUTEURS DU TEST

Université Denis Diderot-Paris 7 : Janine Bruneaux, Françoise Lenoir, Gérard Rebmann

Université Paris Nord : Monique Couchouron

Université Pierre et Marie Curie : Raymond Constancier

Université Saint-Quentin Versailles : Marie-Claire Brianso

Université Paris Sud : Marie-Françoise de Feraudy, Pierrette Kilcher

CNAM : Marinette Vialle

BIBLIOGRAPHIE

- REBMANN G., BRUNEAUX J. & ROBINET J. (1988). Checking oneself up before entering university - a real size experiment with computers. In F. Lovis et E.D. Tagg (Eds), *Computers in Education ECCE* Lausanne (IFIP). Elsevier Sciences Publishers B.V. (North-Holland), pp. 167-171.
- REBMANN G., BRUNEAUX J. & BRIANSO M.-C. (1990). Un test d'auto-évaluation à l'entrée de la première année de DEUG. *Bulletin de la Société Française de Physique*, n  77, pp. 20-22.
- REBMANN G. & VIENNOT L. (1994). Teaching algebraic coding : Stakes, difficulties, and suggestions. *American Journal of Physics*, vol. 62, n  8, pp. 723-727.
- VIENNOT L. (1979). *Le Raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1982). L'action et la réaction sont-elles bien ( gales et) opposées ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n  640, pp. 479-488.

CORTEN-GUALTIERI P. (1995). *Communication de concepts de génétique par le dessin d'humour ; analyse sémiologique de dessins parus dans La Recherche, Science & Vie et Sciences & Avenir ; interprétation par un public scolaire (16 à 18 ans).* Thèse de doctorat (Sciences), Université de Louvain-la-Neuve.

Les dessins humoristiques, que publient épisodiquement les revues de vulgarisation scientifique, peuvent-ils devenir des aides pédagogiques ? C'est l'une des questions qui parcourt une recherche originale mais rigoureuse en didactique. Heureuse idée que le choix de ce type de dessin. Puisqu'il introduit un thème rarement cité dans l'enseignement scientifique : celui de l'humour. Puisqu'il permet de nourrir la veine, encore pauvre, des recherches en didactique des sciences portant sur les représentations imagées des connaissances. Puisqu'enfin il se situe à l'articulation de l'enseignement académique et de l'éducation non formelle.

L'ouvrage comporte trois parties différentes. Dans une première partie, et non sans avoir procédé à une revue de la littérature, puis choisi et défini les notions et les concepts de sémiotique visuelle utilisés, Pascale Gualtieri montre comment un certain nombre de concepts sont figurabilisés et condensés dans l'image, et comment cette scène peut faire naître le sourire. Au passage, elle fait apparaître, outre la complexité à conduire de façon sûre une analyse formelle, la multiplicité des interprétations possibles de ces dessins, ainsi que le rôle d'ancrage du titre et du texte du chapeau placé à proximité sur la page imprimée. Soulignons que cette méthode suppose que le chercheur mobilise une double culture : d'une part scientifique, avec la détermination et le maniement de concepts élaborés de génétique et, d'autre part, sémiologique avec le repérage des codes et des signes à l'œuvre dans l'image fixe.

Fort logiquement, à l'interprétation des dessins en production, succède, dans une

seconde partie, une étape visant à explorer la reconnaissance de ces dessins par des apprenants. Pascale Gualtieri a choisi un public d'élèves du secondaire qui reçoit un enseignement de génétique. Pour approcher les réactions des élèves, elle procède par entretiens semi-directifs à partir de dessins extraits de la série précédemment étudiée. L'entretien est administré à un couple d'élèves pour éviter de lui conférer une dimension évaluative ; et il est conduit avec une empathie et une écoute qui favorisent les interactions avec l'enquêteur et entre élèves de façon à stimuler et multiplier de libres parcours interprétatifs. Si les sujets interrogés (n = 20) confirment certaines des interprétations mises en évidence par l'analyse formelle, ils en proposent également d'autres, imprévues mais tout aussi plausibles.

Ces deux étapes autorisent alors une autre trajectoire de recherche qui occupe la dernière partie de la thèse : toutes choses étant égales par ailleurs, dans quelle mesure un dessin humoristique peut-il favoriser, chez des apprenants, l'appropriation de concepts de génétique ? À cet effet un questionnaire à réponses fermées leur est administré individuellement (n = 100) afin de mettre en relation, d'une part, leur maîtrise des principaux concepts de génétique, et d'autre part leur habileté à interpréter, de manière convergente (ou divergente), un dessin humoristique. Les résultats de cette dernière investigation ne font pas apparaître cet *effet de supériorité de l'image*, dans l'apprentissage de la biologie, que mentionne pourtant, avec des preuves expérimentales de nature différente, un chercheur comme Reid. Dans la situation nécessairement artificielle dans laquelle ils ont été interrogés, la consultation d'un dessin humoristique, qu'il soit, ou ne soit pas, accompagné d'un titre et d'un chapeau linguistique, ne semble pas systématiquement améliorer le score des réponses attendues à des questions portant sur des concepts de génétique.

D. Jacobi

DEVELAY M. (1995). *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines*. Paris, ESF.

L'ambitieux projet de M. Develay de créer un instrument pédagogique qui vise à *faciliter le dialogue d'une équipe de professeurs au sein d'une discipline donnée et favoriser les échanges entre professeurs de disciplines différentes*, et ce, dans le contexte de la quête d'une nouvelle identité professionnelle par les personnes intéressées, me paraît à la fois intéressant et quelque peu démesuré.

Il est temps, comme le souligne avec justesse l'auteur, que les professeurs et les professeures du secondaire discutent des enjeux idéologiques, sociaux et épistémologiques trop souvent occultés de l'enseignement des diverses disciplines. N'est-il pas étonnant que dans l'école actuelle les élèves doivent décoder par eux-mêmes ces enjeux au gré de leur fréquentation d'une dizaine de disciplines, alors que ceux et celles qui sont responsables de l'orientation des divers enseignements s'ignorent les uns les autres et s'enferment dans un carcan disciplinaire plus ou moins étroit ! Mais comment initier le nécessaire dialogue ?

Le choix qui a consisté à inviter des spécialistes de l'enseignement de plusieurs disciplines (des arts plastiques à la technologie en passant par l'éducation physique, le français, la géographie, l'histoire, l'anglais, les mathématiques, la musique, la philosophie, les sciences économiques et sociales, la physique et la biologie) à produire un discours de type épistémologique situé en amont d'une approche didactique particulière, risque cependant d'être quelque peu rebutant pour des professeurs et des professeures du secondaire qui, pour diverses raisons, n'ont pas nécessairement eu l'occasion ou le temps de s'adonner à ce type de réflexion. Ils et elles estimeront sans doute que ces discours, par trop philosophiques, sont plus ou moins pertinents au regard de leurs préoccupations actuelles et ne les aident guère à trouver des solutions aux problèmes d'éducation auxquels ils et elles sont confrontés quotidiennement. En ce sens, je doute que les visées pédagogiques de l'auteur soient atteintes.

Toutefois, les didacticiens et les didacticiennes de ces disciplines y trouveront certainement leur compte et ce n'est pas la moindre des choses. En effet, avant même de suggérer aux professeurs et professeures du secondaire qu'ils et elles auraient intérêt à pratiquer le dialogue entre les disciplines, ne serait-il pas souhaitable que nous le pratiquions nous-mêmes entre didacticiens et didacticiennes ? À cet égard, le travail de Develay et des auteurs des divers chapitres du livre est approprié et stimulant. Au terme d'une seule lecture trop rapide pour me permettre de cerner l'essentiel de chacun des discours, j'en sais certes un peu plus sur les problématiques possibles de l'enseignement dans d'autres champs disciplinaires, mais j'ai surtout pris conscience de la nécessité d'explorer plus avant les potentialités d'un tel dialogue sur le plan de l'enrichissement des problématiques de l'éducation aux sciences. Par exemple, à la lecture des chapitres portant sur l'enseignement de la philosophie et des sciences économiques et sociales (SES), il m'a semblé que les didacticiens et les didacticiennes de ces disciplines savaient beaucoup mieux que ceux et celles qui œuvrent généralement en didactique des sciences, intégrer dans leurs problématiques de l'enseignement les préoccupations d'ordre idéologique et axiologique. Ainsi l'enseignement des sciences ne devrait-il pas contribuer autant que l'enseignement des SES à « *former la capacité de l'élève à prendre une position raisonnée et citoyenne dans un univers complexe, incertain, mouvant et conflictuel.* » (p. 291)

Certes, il est possible d'engager des discussions serrées, voire d'amorcer des débats, à propos des thèses soutenues dans les divers chapitres, notamment en ce qui a trait à la caractérisation classique de l'épistémologie proposée dans l'introduction du livre. Toutefois, les auteurs et auteures ne se limitent pas à cette définition et font état d'une diversité de positions, ce qui constitue un attrait supplémentaire du livre.

En somme, il s'agit d'un livre dont je recommanderai la lecture aux étudiants et étudiantes engagées dans des études de psychopédagogie et de didactique des sciences (autre décloisonnement à accomplir...) afin de les aider à élargir leur horizon

conceptuel. Cependant, on doit déplorer l'absence, d'une part d'un index qui aurait permis de repérer facilement les divers usages que les auteurs et auteures font des concepts centraux (transposition didactique, représentations, etc.) et, d'autre part, de bibliographies raisonnées à la fin de chacun des chapitres. Enfin, dans la foulée de l'ouverture conceptuelle promue dans ce livre, on se serait attendu à une ouverture similaire en ce qui concerne les ouvrages cités. Le plus souvent les ouvrages portant sur ces thématiques mais réalisés hors de l'hexagone sont ignorés.

J. Désautels

GAY A. (1995). *Étude didactique de situations de construction collaborative de diagnostics d'élevage – Intérêt des didacticiels hypermédia pour la communication interprofessionnelle et l'opérationnalisation des savoirs théoriques*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon 1.

Cet ouvrage de 324 pages avec les annexes concerne un champ de recherche relativement peu développé en France qui est celui de la modélisation des rapports existant entre les savoirs professionnels, le plus souvent a-disciplinaires, et les savoirs théoriques disciplinaires. Alain Gay se propose d'étudier l'impact d'une médiation introduite par un didacticiel hypermédia qu'il a conçu pour constituer une interface entre ces deux types de savoirs. Il s'agit donc d'un travail de pionnier et, à ce titre, il s'apparente à la fois à une recherche descriptive à travers la description des éléments du contexte économique, sociologique, épistémologique et didactique qui fondent cette étude et à une recherche-action. En effet, l'auteur ne se contente pas de décrire les habitudes de communication qui existent entre les différents acteurs, mais tente de les modifier pour substituer une démarche de résolution collective de problèmes à une situation où semble régner une barrière plus ou moins étanche entre les savoirs détenus par les éleveurs de bovins, les techniciens (les pareurs), les vétérinaires et les directeurs de laboratoire d'analyses biologiques. Les expérimentations rapportées dans cette

thèse, ne relevant pas véritablement d'une situation expérimentalement maîtrisée en raison des nombreux paramètres, nourrissent le caractère de recherche-action de ce travail et contribuent à forger la conviction qu'une démarche d'apprentissage s'est bien engagée autour et grâce au logiciel utilisé.

L'originalité de cette recherche provient également des savoirs mis en jeu par le didacticiel. Des pathologies comme, par exemple, les boiteries persistantes dans les élevages laitiers, constituent des objets d'apprentissage complexes relevant au sens large de la biologie, mais impliquant des domaines multiples et non connexes comme l'architecture des bâtiments d'élevage, la taille des onglons et les techniques d'analyse biochimique. Ces objets d'apprentissage intéressent le champ de la recherche en didactique et Alain Gay montre tout l'intérêt qu'ils peuvent présenter en tant que contenus informationnels dont on va étudier les conditions de communication. Cette thèse pose bien, à mes yeux, le problème de la pertinence de l'utilisation des outils de la didactique pour la résolution de problèmes posés par des situations critiques. Ces outils permettent de comprendre que la situation de crise, introduite par la fragilisation du bétail suite à un élevage intensif imposé par le souci de rentabilité économique, concerne un nombre important de partenaires interdépendants et crée une motivation « naturelle » pour résoudre les problèmes que posent les pathologies des bovidés. Aucun des partenaires n'ayant à lui tout seul la solution, il s'agit bien d'une situation-problème, classique en didactique, qui va demander l'instauration de dialogues pour une mise en commun des connaissances et des compétences et qui fera ainsi apparaître des besoins de formations complémentaires. Autour du problème posé par : comment favoriser l'état de santé du bétail, une situation nouvelle exigeant la coopération des partenaires va pouvoir naître.

Un didacticiel comme celui construit pour cette thèse, couplant une approche guidée et une approche par découverte, peut-il constituer une médiation pertinente pour catalyser une recherche collective de solutions impliquant à la fois le recours au dialogue et une formation, c'est-à-dire le plus

souvent une remise en question de ses propres savoirs ? Si le travail de recherche d'Alain Gay ne permet pas, pour le moment, d'évaluer à long terme l'acquisition de nouveaux savoirs par les différents partenaires impliqués dans l'expérimentation ou un changement de leurs pratiques professionnelles, les éléments rapportés dans ce mémoire permettent de penser que ce type de logiciel hypermédia est bien adapté pour constituer une aide à la résolution collective de problèmes et pour favoriser la réflexion sur les pratiques. Cependant, je me demande si ce logiciel ne pourrait pas être remplacé par des documents pédagogiques et par une autre médiation humaine ayant pour visée – sur le même thème et avec les mêmes types de partenaires – l'établissement de dialogues et de conflits socio-cognitifs et la résolution de problèmes. Je pense qu'il serait intéressant de pouvoir comparer alors ces différents dispositifs pédagogiques et ainsi mieux préciser les spécificités du didacticiel «Mambo-VL».

Cette étude des «*procès de communication visant la recherche de solutions aux problèmes sanitaires critiques*» constitue également un modèle du genre qui, me semble-t-il, pourrait être transposé fructueusement dans des contextes différents concernant la santé humaine ou l'environnement, où se rencontrent bien souvent et simultanément des partenaires multiples, dont les logiques ne sont pas forcément complémentaires, et des situations critiques qui impliquent des prises de décision collectives. Cette transposition serait d'autant plus aisée qu'A. Gay en a méthodologiquement balisé les étapes. En s'appuyant sur une bibliographie importante et diversifiée, il a en effet effectué un excellent travail d'explicitation des contextes des notions et des concepts utilisés, travail qui montre bien l'intérêt de croiser des apports et des terminologies issus de disciplines et de pratiques professionnelles différentes. Le contexte épistémologique que constitue l'écopathologie et l'utilisation de catégories comme par exemple : «connaissances profondes et connaissances de surface», donnent des clés pour comprendre les différentes dimensions du problème et pour fournir une base sémantique au développement d'une véritable interdisciplinarité.

En conclusion, la thèse présentée par A. Gay repose sur une problématique didactique clairement et solidement construite. Son traitement me paraît très original, décrivant le rôle que pourraient jouer les didacticiels et leur aide, en rendant des informations presque immédiatement disponibles, à la résolution collective de problèmes. L'argumentation, le style et les qualités d'écriture de ce mémoire contribuent à susciter l'intérêt au fur et à mesure de sa lecture. On aurait pu craindre en effet qu'un tel sujet donne lieu à de longues descriptions ; ce n'est pas le cas, les différentes parties sont justes assez redondantes pour que l'on ne se perde pas entre les différentes approches et se complètent comme les pièces d'un puzzle.

D. Favre

**LE NY J.-F. & GINESTE M.-D. (1995).
La psychologie. Paris, Larousse.**

L'ouvrage de Jean-François Le Ny et Marie-Dominique Gineste appartient à un genre relativement rare en France, mais très répandu dans le monde anglo-saxon, à savoir celui des *readers*, livres composés d'articles ou d'extraits d'articles déjà parus dans des revues primaires ou dans des livres. Leur but est de permettre aux étudiants d'avoir accès soit à des auteurs dont les livres sont épuisés, soit à des articles de recherche souvent cités comme référence, publications qu'ils n'auraient pas idée d'aller chercher dans les bibliothèques spécialisées destinées aux chercheurs.

Les auteurs présentent ainsi 68 articles ou extraits pour un livre d'environ 700 pages. Le sujet porte sur ce qu'on appelait il n'y a pas si longtemps la psychologie générale, mais qu'on préfère dénommer maintenant la psychologie cognitive. Le livre est réparti en neuf chapitres, avec un découpage très classique inspiré d'une approche fonctionnaliste où l'on retrouve les grands domaines de la psychologie cognitive, entre autres ceux relatifs à la perception, à la mémoire et représentation des connaissances, au raisonnement et à la résolution de problèmes.

Qui dit livre composé d'articles de psychologie cognitive pourrait s'attendre à une avalanche

d'auteurs américains. Eh bien non ! Seulement quinze articles ou extraits de non francophones (entre autres, D. Norman, D. Rumelhart, P.N. Johnson-Laird), ce qui prouve qu'il a toujours existé une école francophone de psychologie cognitive bien vivante, quoique non inspirée du paradigme du traitement de l'information. Ainsi le lecteur de 1996 pourra lire, ou relire, des articles de P. Guillaume, de H. Pierron, de P. Fraisse, de C. Florès ou encore de P. Oléron, sans oublier des extraits de Piaget dont l'un de 1924. À côté de ces psychologues qui ont marqué l'histoire de la psychologie de langue française, on retrouve des articles de psychologues cognitivistes dont les travaux ont inspiré certains didacticiens tels J.-F. Richard, E. Cauzinille-Marmèche ou G. Vergnaud.

Les différents chapitres ont chacun une introduction qui replace dans leur cadre les articles présentés. Chaque introduction écrite soit par J.-F. Le Ny, soit par M.-D. Gineste fait office de mini-revue de question et permet au lecteur non familier d'aborder le contenu du chapitre correspondant. Certains articles ou extraits d'article sont eux-mêmes complétés par des références bibliographiques supplémentaires. En plus l'ouvrage se termine par une bibliographie de livres de référence en sciences cognitives et de livres plus techniques «*pour aller plus loin*», comme le disent les auteurs. Si toutes ces références bibliographiques sont fort utiles pour un lecteur curieux d'approfondir le contenu des articles reproduits, le lecteur sera quand même surpris de voir, dans le texte des articles reproduits, la présence des références bibliographiques de l'auteur de l'article, références qui ne renvoient à rien puisque les bibliographies des articles reproduits ne sont pas données. Un autre petit défaut, mineur toutefois, est lié au choix des auteurs d'avoir voulu donner les dates de naissance des auteurs cités. Mais par manque d'information certaines dates de naissance sont remplacées par des points d'interrogation, surtout chez les auteurs étrangers. Il eût sans doute mieux valu ne rien indiquer que de donner des demi-informations qui n'apportent, en plus, rien à l'ouvrage.

Pour les didacticiens des sciences, la question que l'on peut se poser est ce qu'un tel ouvrage peut leur apporter. Pour le chercheur au

courant des travaux de la psychologie cognitive, rien de nouveau sinon que l'ouvrage lui permet de faire le point sur des questions vives, telle celle des représentations mentales, des modèles mentaux ou encore sur la résolution de problèmes. Par contre pour l'étudiant qui débute une formation à la recherche (DEA ou programme gradué), c'est un ouvrage à lui conseiller par le nombre de références et de sujets abordés, à côté de manuels plus classiques de psychologie cognitive. Toutefois il faut bien noter que les auteurs, psychologues à la recherche de «régularités du fonctionnement mental», n'ont pas choisi d'articles portant directement sur des tâches à contenu scientifique, ce qui aurait pu être fait par exemple à propos de la résolution de problèmes, où justement l'étude des processus cognitifs mis en jeu lors de la résolution de problèmes de physique a remis en cause le modèle GPS de Newell et Simon.

M. Caillot

MARCEL E. (1995). *Étude lexicologique comparative de manuels universitaires de botanique et des œuvres botaniques de J.-J. Rousseau*. Thèse de doctorat (Sciences du Langage, didactique, sémiotique), Université de Franche-Comté.

Élisabeth Marcel se propose de décrire et d'interpréter les caractéristiques lexicales d'une langue de spécialité : celle de la *Botanique*. Elle le fait, avec rigueur et méthode, en prenant appui presque exclusivement sur le modèle (dit *sens-texte*) du linguiste russe Mel'cuk. Ce modèle, plus connu sous le nom de *théorie des fonctions lexicales*, a été imaginé en vue de l'élaboration d'un nouveau type de dictionnaire, très original, dans lequel on enregistre les formes figées de discours les plus régulières. Il faut souligner qu'il s'agit d'une première, car si le modèle *sens-texte* est souvent cité, peu de recherches ont tenté de l'appliquer à un corpus étendu. C'est ce que tente cette recherche, ce qui conduit Élisabeth Marcel à affiner un certain nombre des fonctions lexicales proposées par Mel'cuk.

Comme il se doit, les principales fonctions lexicales sont recueillies à partir d'un nombre limité de documents. Le corpus a cependant

été construit dans une perspective contrastive. Il est délimité ainsi : un manuel et un précis contemporain, de niveau premier cycle universitaire, d'une part et, les écrits de J.-J. Rousseau sur la botanique, d'autre part. Ce choix présente deux avantages : il instruit de fait une perspective diachronique à cause du décalage entre les périodes de production des écrits. Il offre une relative hétérogénéité quant aux conditions de production et d'emploi de cette langue de spécialité : enseignement et littérature (il est vrai à vocation autodidacte). Il est judicieux de comparer des textes situés à deux pôles pédagogiques différents (formel et non formel) ; mais il eût été peut-être utile d'inclure des textes de vulgarisation contemporains et, réciproquement, des manuels anciens.

Cette approche produit une description précise des formes lexicales simples et complexes utilisées. C'est un inventaire très systématique et réalisé de façon particulièrement patiente et scrupuleuse, avec une multiplication d'exemples très démonstratifs et bien échantillonnés. Cependant, la nature du corpus choisi a pour effet de saturer rapidement l'information ; ce qui conduit l'auteur de la recherche à proposer, à de nombreuses reprises, les mêmes interprétations à partir des différents résultats successivement présentés.

Si la comparaison entre les textes de Rousseau et les manuels récents est bien productive de différences manifestes, peut-on cependant en inférer des règles sur les caractéristiques de ce que serait une langue scientifique de la botanique ? Certes, le lexique est notablement différent de celui de la langue naturelle usuelle, mais l'absence dans le corpus, par exemple, de textes écrits par des chercheurs pour d'autres chercheurs, ou de textes contemporains de popularisation conduit, un peu comme dans la recension de Kocourek, à confondre le texte d'enseignement de la botanique et le texte scientifique de botanique. Si la terminologie (*foliole*, *pédoncule*...) est bien la même, il est moins sûr que les emplois en contexte soient identiques.

Le modèle théorique utilisé se révèle particulièrement productif pour analyser certaines des caractéristiques des textes de manuels comme les synonymes et hypé-

nymes, les expansions de noms et les paraphrases. Mais il montre aussi certaines limites : il est laborieux à mobiliser et incomplet pour saisir certaines nuances sémantiques. Il repose sur des jugements d'équivalence ou de différence du sens proposés par le chercheur sans contrôle possible de leur justesse.

En dépit de ces remarques, cette recherche a donc le mérite d'analyser de façon rigoureuse et systématique des textes de spécialité et de confirmer, avec d'autres méthodes d'investigation, des caractéristiques déjà connues, mais rarement étudiées, dans le domaine de la botanique.

D. Jacobi

Von GLASERSFELD E. (1995). *Radical constructivism. A way of knowing and learning*. Londres, The Falmer Press.

Voici un livre qui mettra à la portée de tous les fondements du *constructivisme radical*, dont l'influence apparaît fulgurante dans plusieurs cercles de la pensée pédagogique outre-Atlantique. C'est un ouvrage de philosophe, mais sans la pesanteur qu'ont souvent ces types d'écrits. Il est constitué d'un mélange de textes anciens et de productions spécifiques, si bien que les redites sont fréquentes, mais permettent au néophyte de bien suivre la pensée de l'auteur.

Cependant ces avantages indéniables ont leurs contreparties. Le recours constant à l'anecdote personnelle, bien que classique dans les productions nord-américaines, apparaît quelque peu troublant quand il s'agit par ce biais d'éclairer des questions difficiles. De plus, Glasersfeld revendiquant le droit à une lecture subjective des auteurs qu'il cite, le non-spécialiste est dépossédé de la possibilité de faire la part de ce qu'il laisse de côté chez Hume, Descartes, Kant ou Piaget. Enfin, mais là nous touchons déjà au fond, il néglige toute confrontation avec des auteurs majeurs dans le champ considéré. Comment traiter philosophiquement le problème de la construction des connaissances sans discuter par exemple Aristote, Hegel, Marx, ou plus près de nous Lévi-Strauss et Foucault, voire, à l'opposé, Derrida ? Tous auteurs

évidemment fort différents, mais dont les thèses ne peuvent être ignorées sans autre forme de procès, et se retrouvent bien sûr en contrepoint de celles de l'auteur.

Glaserfeld formule ainsi les principes fondamentaux du constructivisme radical (p. 51) :

1. *La connaissance n'est pas reçue passivement, que ce soit par l'intermédiaire des sens ou par celui de la communication ; la connaissance est activement construite par le sujet connaissant.*

2. *La fonction de la cognition est adaptative, dans le sens biologique du terme, tendant à l'ajustement (fit) ou la viabilité ; la cognition est au service de l'organisation par le sujet du monde expérientiel, non de la découverte d'une réalité ontologique objective.*

En dehors du dernier point, le plus controversé d'après Glaserfeld, le résumé qui est fait est très directement tiré du constructivisme piagétien. Piaget est d'ailleurs explicitement l'auteur de référence ici, au point que le lecteur déjà familier avec le maître de Genève peut aisément se faire une idée des positions propres à Glaserfeld en allant directement au chapitre 6 : *Constructing Agents : The Self and Others*. Glaserfeld s'y confronte en effet aux deux difficultés redoutables de toute position idéaliste : le solipsisme (c'est l'esprit qui crée le monde, et rien n'existe en dehors de l'esprit, y compris les autres esprits supposés), et la manière de bâtir une communication sociale (par quel miracle deux constructions expérientielles privées, différentes par nature, peuvent-elles aboutir à un sens partageable à propos d'un monde sans réalité propre ?). Dès la page 1, Glaserfeld affirme que sa théorie surmonte ces deux difficultés, si bien que ne resterait face à ses positions que «*de la métaphysique*». Or, il serait étonnant que des questions aussi délicates et aussi anciennes puissent se régler si aisément, ce que pourtant les partisans de Glaserfeld acceptent apparemment sans discuter. Puisqu'il dit qu'il n'y a plus de problème, c'est qu'il n'y en a plus. Un peu comme Popper qui s'en allait répétant que quiconque affirmait qu'il était un «réfutationniste naïf» n'avait rien compris à ses positions. Ce qui n'a pas empêché Kuhn de proclamer et de montrer que c'était pourtant bien ce qu'il était...

Glaserfeld montre avec raison que la dite «théorie des stades» de Piaget n'est pas au cœur de l'épistémologie génétique. Comme le Piaget tardif, il place au centre du constructivisme la description des connaissances en termes de schèmes d'action, avec les concepts qui vont avec : assimilation, accommodation, équilibration. Comme chez Piaget, c'est l'action qui est première, source et conséquence du schème cognitif. Sauf que Piaget admettait l'existence de «schèmes réflexes» (donc non «construits»). Sauf surtout que chez Piaget, les schèmes primitifs évoluent par confrontation avec les «objets» physiques. On ne compte plus les phrases de Piaget du type «les objets résistent», voire «le réel résiste». Glaserfeld le sait bien, qui voit là une «*contradiction dans les écrits de Piaget*» (p. 74). En fait, dans les termes de Glaserfeld, ce n'est pas l'action sur des objets (lesquels n'existent pas) qui est le moteur de la mise en schèmes, mais **l'expérience vécue de l'action**. Seul un observateur extérieur peut modéliser tout cela comme une interaction sujet-objet. Mais en dernière instance, seule doit être prise en compte la subjectivité irréductible du sujet, son expérience.

Glaserfeld estime pourtant que le sujet n'est pas «libre» de sa construction. Celle-ci est soumise à des «contraintes». Mais comme ces dernières ne sont pas inscrites dans les objets, elles en deviennent bien mystérieuses. Glaserfeld invoque ainsi un postulat de base qui veut que les organismes «*aiment (like) certaines expériences mieux que d'autres*» (p. 68). Pourquoi ? Selon quels mécanismes ? A-t-on là un niveau de réalité sous-jacent (biologique) qui rend compte de cela ? Sinon, quelle aberration conduirait des «organismes» à «construire» des expériences désagréables ? Glaserfeld dépense beaucoup d'énergie à expliquer qu'il bâtit non une théorie de l'être en tant que tel (voire de l'étant, pour parler comme Heidegger), mais une théorie du *knowing*. On voit ici pourtant, inévitablement pourrait-on dire dans la conception idéaliste, comment des postulats ontologiques sous-tendent sa théorie, au moins en dotant les «êtres connaissants» d'une «qualité première» fondamentale non-construite. La porte est alors ouverte au dualisme, qui va distinguer d'un côté le soi (*self*) et le «corps», de l'autre un mystérieux

agent qui «construit» les deux premiers (*mysterious self-conscious entity*, p. 123). Bien que Glaserfeld ne le souligne jamais, cela distingue absolument sa position de celle des «constructivistes radicaux» biologisants, comme Varela. Au-delà, une fois admis comme une donnée cette espèce de «principe de plaisir» expérientiel, on retrouve *grosso modo* l'épistémologie piagétienne, sans que l'on voie clairement ce qu'il y a à gagner à remplacer l'adaptation de celle-ci (à un environnement extérieur, c'est ce qui déplaît à Glaserfeld), par la «viabilité» (*viability*).

La seconde question – comment s'établit une communication sociale – est encore plus délicate. Là encore, Glaserfeld imagine des «contraintes» qui vont jouer en faveur de l'établissement de rapports sociaux. C'est ce qu'il appelle *la corroboration par les autres* (p. 120). Nous construisons les autres sur le modèle de nos expériences, ce qui nous permet, par exemple, de prévoir leurs comportements (ou faudrait-il dire de prévoir l'expérience que nous construirons de leurs comportements ?). Si ce modèle est viable, il sera corroboré par les autres, et renforcé. Dans le cas contraire, le déplaisir qui en résulte (encore lui) conduit à la modification du modèle.

Comment un tel processus peut-il conduire tous les indiens navajos à «construire» les autres comme des indiens navajos, et des nord-américains... à écrire comme des nord-américains ? Autrement dit, comment comprendre qu'une multitude de «corroboration» réciproques conduise justement à reproduire des caractéristiques bien repérables de la culture ? On touche là des limites communes à tous les constructivismes de type «soliste», y compris celui de Piaget lui-même, et non seulement leur version «radicale». Il y a par exemple un glissement sémantique qui ne laisse pas d'étonner entre l'affirmation : «la connaissance n'est pas reçue passivement» et le slogan pédagogique des «constructivistes radicaux» comme quoi «rien n'est transmis». Est-ce la transmission qui est en cause ou seulement son aspect «passif» ? Si c'est la première interprétation qui doit primer, pourquoi ce détour par l'adjectif «passif» ?

Prenons deux exemples. Soit à solidariser deux planches. Dira-t-on qu'il revient au même de poser d'un côté cette question sans plus de détail et de l'autre de fournir une vis et un tournevis ? Que l'on parle de ces outils, qu'on les montre, qu'on les expérimente devant les sujets, n'y a-t-il pas la une transmission culturelle, quelle qu'en soit la forme ? Autre exemple : Glaserfeld passe un chapitre entier à montrer comment peuvent se construire les notions d'unité, de pluralité et de nombre. Admettons qu'il ait raison. Comment ensuite passe-t-on à la numération de position ? Revient-il au même de «construire» de l'arithmétique avec et sans cette numération ? Et, encore plus important, avec et sans disposer du zéro, lequel n'a surgi que fort récemment dans l'histoire des «sujets connaissants» ? Comment alors expliquer que l'humanité n'ait jamais éprouvé le besoin de «corroborer» l'existence d'un zéro auparavant, mais que tous les enfants scolarisés du monde l'utilisent désormais sans émotion particulière ?

Tout ceci n'a rien à voir avec la «vérité» du zéro en soi. D'un point de vue pédagogique, cela signifie que la palette des modèles candidats à l'enseignement est vaste, et découle de choix, épistémologiques, psychologiques, politiques, idéologiques, c'est-à-dire culturels. C'est alors que l'on rencontre le paradoxe le plus étonnant du «constructivisme radical» quand il veut se constituer en base d'une réflexion didactique. Puisqu'il n'y a pas de réalité extérieure, que tout est subjectivement construit et valable tant que viable, pourquoi faudrait-il traquer en priorité les positions «réalistes naïves», qui, pourtant, ont l'avantage d'être «corroborées» par le plus grand nombre ? Au nom de quelle vérité ? Galilée, Newton, Einstein : tous de typiques «réalistes naïfs» dans la description de Glaserfeld. En sont-ils de mauvais physiciens pour autant ? Pourquoi faudrait-il choisir les positivistes de l'interprétation de Copenhague plutôt que Schrödinger dans la présentation de la mécanique quantique ?

La violence du rejet des positions «réalistes» va de pair, autre paradoxe, avec l'indulgence attendrie devant les productions d'élèves, quelles qu'elles soient, dont on laisse entendre qu'elles en valent bien d'autres. Si c'était vrai,

pourquoi faudrait-il une école ? La réponse de Glasersfeld ne manque pas de piquant qui affirme (p. 184) : «*Le professeur ne peut pas dire aux élèves quels concepts il faut construire et comment les construire, mais par un usage judicieux du langage, les élèves peuvent être préservés de construire dans des directions que le professeur considère comme futiles.*» Vous avez toute liberté... pour construire justement ce que je veux que vous construisiez, mais chut, je ne vous ai rien dit !

Il est vrai que l'on sort ici du strict commentaire du livre de Glasersfeld. Il faudrait pour poursuivre ce débat considérer les travaux plus directement didactiques inspirés par ses théories, car les positions à proprement parler pédagogiques de l'auteur ne sont que des **convictions**, comme il le reconnaît honnêtement dès l'introduction et à plusieurs reprises par la suite. Comme telles, elles ne sortent pas de la vulgate de tous ceux qui se penchent avec tendresse sur les chères têtes blondes. En voici un exemple, à mon sens tout à fait représentatif de son dernier chapitre (*To Encourage Students' Conceptual Constructing*) : «*La résolution de problèmes est indubitablement un outil éducationnel puissant. Cependant, je voudrais suggérer que sa puissance est grandement accrue si les élèves la perçoivent comme amusante (fun)... Comment y parvenir ?... Cela dépend beaucoup de la sensibilité de l'enseignant et de sa volonté d'accompagner un élève individuellement dans sa manière de penser, et, quand c'est possible, d'engager toute la classe à suivre et discuter cet itinéraire particulier... Une leçon peut commencer en faisant raconter par un enfant une de ses expériences comprenant des nombres. Habituellement, il n'est pas trop difficile, alors, d'introduire un «problème» approprié dans l'histoire rapportée, et ainsi de créer quelque intérêt pour la solution.*» Pourquoi diable n'y avait-on pas pensé auparavant ?

S. Johsua

Réponse de E. von Glasersfeld à S. Johsua

Comme le dit une des maximes du constructivisme : «il y a toujours plus d'une façon de voir les choses», aussi n'ai-je pas l'intention de débattre en détail les opinions exprimées par S. Johsua. Cependant, comme la rédaction de *Didaskalia* m'a invité à répondre, je profite de l'occasion pour expliquer un malentendu.

Si j'utilise les termes «*viabilité*» et «*viable*» au lieu de «*adaptation*» et «*adapté*», ce n'est pas parce que j'y vois une opposition. La raison en est la suivante : même en biologie on trouve souvent la tendance de présenter l'adaptation comme une activité intentionnelle – cela induit l'idée que les organismes (ou les espèces) sont au courant des contraintes du milieu avant de s'y adapter. En transférant le terme dans le domaine de la cognition (en suivant Piaget), l'idée d'une adaptation des connaissances à des contraintes ontologiques dont on connaît déjà le caractère serait en nette contradiction avec l'orientation constructiviste de l'épistémologie génétique. Par contre, si on affirme qu'une action, un concept ou une théorie est viable, on dit seulement que son utilisation n' pas été empêchée par des obstacles. Cette absence d'empêchement n'est pas un déni de la réalité, elle indique seulement qu'on n'a pas touché des contraintes ontologiques. Par conséquent, le concept de viabilité est un concept négatif et élimine pour le constructiviste la tentation de parler des vérités qui pourraient «représenter» des objets ou bien la structure d'un monde réel indépendant.

Je regrette d'ailleurs que mon critique n'ait considéré ni mon approche des problèmes du langage et de la communication (présentée dans les chapitres 5 et 7), ni les idées que j'ai empruntées à la cybernétique (chapitre 8). Une explication de la construction des significations me semble essentielle dans une discussion des interactions sociales et de la pédagogie : de plus le concept de modèle créé par la cybernétique, à mon avis, est indispensable pour la résolution du problème de la connaissance que j'ai proposée dans mon texte.

E. von Glasersfeld

ERRATUM

Concerne *DIDASKALIA* n° 8/1996

Dans l'article de Françoise Chauvet, la figure 3 de la page 74 est à remplacer par la figure ci-dessous.

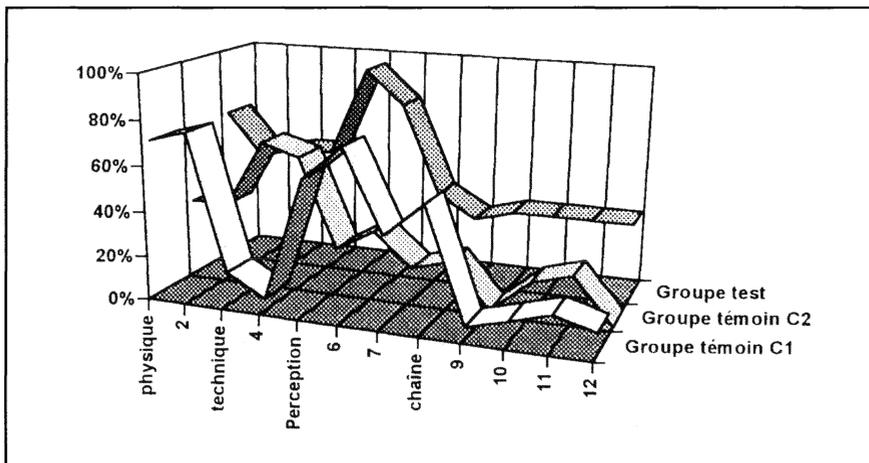


Figure 3. **Profils conceptuels des groupes de l'évaluation externe (aspects positifs de réponses).**

Dans l'article de Monique Scwob et François-Marie Blondel, les formules de la page 123 sont à remplacer par celles ci-dessous.

$$\frac{\text{quantité 1}}{\text{Nombre stœchiométrique 1}} = \frac{\text{quantité 2}}{\text{Nombre stœchiométrique 2}}$$

$$\frac{\text{volume 1}}{\text{Nombre stœchiométrique 1}} = \frac{\text{volume 2}}{\text{Nombre stœchiométrique 2}}$$

Concerne *DIDASKALIA* N° 7/1995

Dans l'article de P. Kariotoglou, P. Koumaras et D. Psillos, au deuxième alinéa de la page 76, dans la phrase : "Ainsi les élèves répondent correctement que les pressions sont égales...", "les pressions sont égales" doit être remplacé par "les pressions ne sont pas égales".