

Charges et champs électriques : difficultés et éléments de stratégie pédagogique en Mathématiques Spéciales Technologiques

Charges and electric fields : difficulties and teaching strategies in «Mathématiques Spéciales Technologiques»

Sylvie RAINSON, Laurence VIENNOT

Laboratoire de Didactique de la Physique dans l'Enseignement Supérieur
Université Denis Diderot, Case 7021
2 place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Cet article décrit une séquence d'enseignement visant à guider des étudiants de Mathématiques Spéciales Technologiques dans la construction des concepts de charge et de champ électriques. Il expose d'abord une analyse du contenu de la cible conceptuelle et un résumé des principaux résultats d'une enquête préliminaire sur les difficultés communes dans ce domaine. La description de la séquence, expérimentée cinq ans de suite en deux versions successives, est suivie d'un exposé de la méthode utilisée pour l'évaluation – des «profils conceptuels de

groupe» – et des résultats ainsi obtenus. Une discussion sur les approches adoptées dans la séquence et dans l'évaluation termine l'article.

Mots clés : *champ électrique, modes de raisonnements, séquence d'enseignement, profils conceptuels, didactique de la physique.*

Abstract

This paper describes a teaching sequence of the «guided construction» type, dealing with electric charge and field. Two versions of this sequence were successively implemented at college level in an institutional framework subject to severe constraints : «Classe de Mathématiques Spéciales Technologiques», in France. A content analysis of the conceptual target and the main results of an investigation of common ways of reasoning are discussed. The evaluation method, using «group conceptual profiles», is explained and illustrated with the main findings. A discussion of the approche adopted in the teaching sequence and in the evaluation ends the paper.

Key words : *electric field, ways of reasoning, teaching sequence, conceptual profile, didactics of physics.*

Resumen

Este artículo describe una secuencia de enseñanza dedicada a guiar a los estudiantes de "Mathématiques Spéciales Technologiques" (sistema francés) en la elaboración de los conceptos de carga y de campo eléctrico. Expone primero un análisis del contenido del objetivo conceptual y un resumen de los principales resultados de una encuesta previa sobre las dificultades comunes en este campo. La descripción de la secuencia experimentada cinco años seguidos en dos versiones sucesivas precede una ponencia sobre el método de valoración – de los perfiles conceptuales por grupo – y de los resultados así logrados. Una discusión sobre los métodos utilizados en la secuencia y en la valoración rematan el artículo.

Palabras claves : *campo eléctrico, modo de razonamiento, secuencias de enseñanza, perfiles conceptuales, didáctica de la ciencia física.*

1. INTRODUCTION

Après deux décades de recherche intensive sur les conceptions et raisonnements communs concernant les sciences, le centrage principal de la recherche en didactique s'est déplacé vers l'étude des processus d'enseignement et d'apprentissage et donc vers l'évaluation de séquences d'enseignement.

Un credo constructiviste longtemps répandu (voir par exemple Driver, 1989, citée par Millar, 1989) consiste à vouloir calquer la démarche

d'enseignement sur les étapes d'apprentissage considérées comme nécessaires, c'est-à-dire l'explicitation des idées communes, leur confrontation avec d'autres éléments contradictoires, et la résolution des conflits ainsi engendrés. Rapidement, il s'est avéré que l'expérience seule ne pouvait provoquer des basculements cognitifs même temporaires, lorsqu'il s'agissait de remettre en cause l'une de ces idées ou l'un de ces raisonnements non conformes à la physique à la fois très répandus et très résistants à l'enseignement : plutôt nier l'indication des ampèremètres que d'admettre que le courant ne s'use pas dans un circuit en série (Johsua & Dupin, 1989). Et d'ailleurs, au point où en est la connaissance scientifique, pourrait-on sérieusement prétendre que les aspects retenus comme objectifs d'enseignement peuvent tous émerger de la mise en oeuvre d'expériences, même dans une démarche hypothético-déductive ?

Restent donc à trouver les composantes d'un enseignement plus efficace que celui dont vingt ans d'études ont montré les limites, en intégrant l'apport considérable de nos connaissances sur les conceptions et raisonnements des apprenants, mais sans l'illusion d'une solution simple centrée sur le seul conflit cognitif.

Millar (ibid.), dès 1989, avait plaidé pour que l'enseignement ne se détermine pas seulement à partir de cette séquence théorique de l'apprentissage – explicitation/confrontation/résolution – arguant, non sans humour, que les chercheurs en didactique eux-mêmes pensaient connaître leur discipline sans avoir été exposés à ce traitement. Lijnse (1994), très radical dans son souhait d'une détermination de l'enseignement centrée sur l'apprenant, «du bas vers le haut», rejoint pourtant Millar pour recommander l'étude de parcours d'apprentissage détaillés, domaine par domaine. Certes, il s'agit surtout pour lui de déterminer des tâches propres à susciter chez les apprenants de fructueux débats, tandis que Millar envisage plutôt l'enchaînement soigneux des concepts assignés comme objectifs à l'enseignement. Mais, *in fine*, il s'agit, d'une manière ou d'une autre, d'une construction conceptuelle guidée, dans un processus où le maître occupe une place déterminante. Il existe un ensemble de connaissances, objets de consensus dans la communauté savante, dont certains aspects doivent être introduits comme objets et outils de pensée chez des apprenants qui n'en ont au départ à peu près rien à faire. Au maître de susciter la motivation et de guider le parcours : telle est la position qui inspire la séquence étudiée ici, qui rejoint aussi celles exprimées par Johsua (1995) et Ogborn et al. (1996).

Le «comment» de cette opération est une question très ouverte. L'exemple traité ici, au delà d'une proposition particulière, illustre à quel point cette question du «comment» est liée à la détermination de ces aspects du contenu consensuel que l'on décide de prendre comme objectifs

d'enseignement. Autrement dit, le «quoi» et le «comment» sont des questions liées. Le contenu de la physique acceptée est bien unique, mais ce n'est pas seulement un morceau de ce contenu que l'on décide d'enseigner, c'est un morceau plus un «éclairage». La détermination de celui-ci s'effectue, dans notre démarche, en s'appuyant à la fois sur l'analyse de contenus et sur l'étude des difficultés communes des apprenants.

Dans le cas présent, le contexte de l'expérimentation est une classe de Mathématiques Spéciales Technologiques, c'est-à-dire qu'il est extrêmement contraint : le contenu à enseigner sur le sujet abordé ici – charges et champs – est parfaitement défini, en principe, et les horaires et conditions d'enseignement sont lourdement déterminés à la fois par les directives nationales et par la perspective des concours de fin d'année. C'est donc uniquement par des actions «à la marge» que se définira l'éclairage particulier dont on vient de parler. S'il s'agit d'évaluer une séquence d'enseignement, il importera tout naturellement de prendre en compte aussi bien les objectifs particuliers liés à cet éclairage novateur, inspiré par l'analyse des difficultés communes, que les aspects les plus classiques des contenus à enseigner. Nous reviendrons en fin d'article sur ce point, après avoir successivement explicité le domaine conceptuel en cause, les difficultés observées lors d'une enquête préliminaire et les éléments de stratégie pédagogique qui ont été mis en oeuvre et évalués.

2. CHARGES ET CHAMPS ÉLECTRIQUES : ASPECTS RETENUS

Nous nous centrons ici sur la relation entre les charges et les champs électriques associés, dans un contexte – statique ou quasi-statique – où cette relation s'exprime par la loi de Coulomb [$\vec{E}(M) = (q/4\pi\epsilon_0 r^2)\vec{u}$, en notations habituelles]. Plus particulièrement encore, c'est l'indissolubilité de ce lien entre une charge et son champ qui est le point de mire de notre étude, tandis que la dépendance inverse du champ au carré de la distance n'y fait pas l'objet d'attention particulière, pas davantage que la question importante de la distinction entre force et champ.

L'un de nos mobiles dans cette étude est la constatation, faite par plusieurs chercheurs (Eylon & Ganiel, 1990 ; Barbas & Psillos, 1993 ; Härtel, 1993 ; Sherwood & Chabay, 1993 ; White et al., 1993 ; Psillos, 1995 ; Chabay & Sherwood, 1995) que les étudiants sont très loin d'une vision unifiée de l'électrostatique et de l'électrocinétique, ce qui conduit à proposer de faciliter la compréhension des circuits électriques par une étude des régimes transitoires préalables à l'établissement d'un courant permanent. Une telle analyse amène notamment Sherwood & Chabay (ibid.) à

s'intéresser aux charges superficielles qui expliquent que le champ suive la direction des fils, par opposition à une centration exclusive sur les charges polaires (Benseghir & Closset, 1993, 1996). Il nous semble que ces propositions sont tout à fait intéressantes, mais aussi qu'il y a peu d'espoir pour avancer sur ce plan si la compréhension du lien fondamental entre charge et champ n'est pas véritablement en place.

Par ailleurs, les premiers résultats de notre enquête (Viennot & Rainson, 1992) ont vite montré que, dans le seul cadre de l'électrostatique, ce lien faisait parfois défaut dans les raisonnements étudiants.

Le contenu de physique au centre de cette étude est donc en fait le principe de superposition ainsi exprimé.

Considérons un certain nombre de particules de charge électrique q_1, q_2, \dots, q_i . Pour des positions données, les interactions deux à deux entre ces charges sont les mêmes que si les deux charges considérées étaient seules dans l'espace et l'on peut ajouter les forces ainsi calculées pour trouver la force totale \vec{F} exercée sur l'une d'elles. Ceci revient à dire que toutes les charges présentes à un instant donné dans une situation quasi-statique contribuent au champ électrique en tout point de l'espace selon la même loi, celle de Coulomb.

Ce principe *a priori* simple à comprendre est-il mis en oeuvre, quelle que soit la situation, ou bien certaines conduisent-elles les étudiants à le nier de fait ? Cette question oriente une enquête sur les raisonnements communs d'étudiants de niveau universitaire dont nous ne citons ici que les principaux résultats.

3. ENQUÊTE SUR LES RAISONNEMENTS COMMUNS DES ÉTUDIANTS

Environ deux mille étudiants de tous niveaux universitaires ont participé à cette enquête (synthèses des résultats : Rainson, 1995 ; Viennot, 1996). L'annexe 1 précise les acquis supposés de chacun des niveaux envisagés, notés par ordre d'avancement croissant, *G1* à *G4*. Nous avons interrogé des étudiants français, suédois et algériens, sans différence notable entre eux pour ce qui est des résultats cités ici.

Après un premier constat sur le peu de relations spontanément établies entre électrostatique et électrocinétique, nous décrivons des questions plus ciblées sur deux obstacles importants qui semblent largement associés à des aspects causaux du raisonnement.

Déconnexion entre électrostatique et électrocinétique : le champ dans les fils

Le questionnaire «CF» figurant en annexe 2 a été présenté en France à diverses populations : des étudiants de Mathématiques Supérieures (G_2) jusqu'à des doctorants en formation à l'enseignement supérieur (G_4). On s'y intéresse au champ dans diverses portions d'un circuit électrique extrêmement simple, de forme rectangulaire. Les directions et les sources du champ sont demandées. C'est ensuite plus particulièrement sur la cause des changements de direction du champ que porte le questionnement, ainsi que sur cette interrogation de deuxième degré : «vous étiez-vous déjà posé cette question ?».

Au delà des résultats détaillés sur les causes avancées pour l'existence et les changements de direction du champ dans les fils, (ceux-ci sont majoritairement associés aux charges polaires et/ou aux potentiels existant à divers niveaux sur le trajet des fils et/ou à l'intensité, laquelle manifeste l'existence du champ), un résultat massif (Rainson et al., 1994) est que moins de 1 % des étudiants dans tous les échantillons interrogés évoque l'existence des charges de surface grâce auxquelles la direction du champ suit celle des fils. Surtout, les étudiants ne sont guère plus nombreux (5%) à dire s'être jamais demandé auparavant ce qui pouvait bien justifier les changements de direction du champ. Le circuit figuré sur le schéma proposé ne ressemble pourtant pas aux lignes de champ d'un dipôle («+Q, -Q», équivalent supposé du générateur), pas plus que n'importe quel circuit électrique réaliste ou symbolisé. C'est cette absence de questionnement que nous retenons donc ici, sans pourtant nous en étonner outre mesure, sachant bien que ce n'est pas l'enseignement habituel qui soulève cette question, ni qui se préoccupe de vision unifiée entre électrostatique et électrocinétique (on trouvera une étude de manuels dans Rainson, 1995).

À supposer que l'on souhaite remédier à cet état des choses, il faudrait que cette contribution simultanée de toutes les charges du circuit à l'existence et à la direction du champ soit bien comprise, et donc le principe de superposition maîtrisé. La compréhension de ce point est l'objet du corps de notre étude de raisonnements.

Obstacles à la compréhension du principe de superposition et causalité

À l'aide de dix entretiens préliminaires avec des étudiants de deuxième année universitaire scientifique (Rainson, 1995), deux traits de raisonnement sont apparus comme des obstacles majeurs, en relation avec une vision causale des situations physiques proposées.

Cette intervention de la causalité dans les difficultés observées n'est pas pour surprendre. La question de l'interprétation causale des co-occurrences n'est pas nouvelle. Le fait que la charge électrique et son champ, co-occurent s'il en est, donnent lieu à l'interprétation causale est prévisible : la charge ne «*crée*»-t-elle pas son champ, comme on le dit souvent ? La causalité physique impose qu'il y ait un décalage temporel entre une modification de la source et une variation du champ, mais ce point ne semble pas au coeur de la réflexion de ceux qui s'expriment ainsi. La charge est responsable de son champ, voilà qui suffit en général pour mettre l'analyse causale en branle.

Mais les recherches didactiques ont montré à la fois l'importance de la composante causale et les limites de sa pratique dans les raisonnements des apprenants (De Kleer & Brown, 1981 ; Driver et al., 1985 ; Andersson, 1986 ; Rozier & Viennot, 1991 ; Gutierrez & Ogborn, 1992 ; Ogborn, 1993 ; Viennot, 1993, 1996). C'est le plus souvent une réduction de l'analyse que l'on observe, le maillon de base du raisonnement étant l'association d'une seule cause à un seul effet observable, ce qui, à l'occasion, laisse en chemin d'autres variables pertinentes. Or la question de la superposition des champs renvoie, par définition, à une multicausalité.

Les obstacles observés dans notre étude appartiennent à ce registre. Résumons-les brièvement.

«*Champ si mobilité*»

Cette formule traduit le fait suivant : les étudiants raisonnent souvent comme si une cause n'existait qu'en cas d'effet manifeste. Cette façon de penser les conduit à refuser l'existence d'un champ en un point où les charges ne peuvent pas circuler.

Cette conclusion s'appuie sur une première série de questionnaires qui mettent en jeu des isolants (Viennot & Rainson, 1992). Les questionnaires IS₁ et IS₂, donnés en annexe 3, interrogent sur la contribution au champ, en un point d'un isolant, d'une charge extérieure à cet isolant, et inversement, sur la contribution d'une charge, située dans un isolant, au champ en un point extérieur. Outre les justifications des réponses correctes («*OUI, la charge crée un champ...*»), on trouve deux catégories principales de commentaires :

– l'une regroupe les justifications qui font allusion au «*rôle bloquant de l'isolant*» :

«*La propriété isolante du corps empêche le champ de pénétrer*» (IS₁, G₁);

«*L'isolant bloque le champ à l'intérieur du corps....*» (IS₂, G₁).

– l'autre regroupe les allusions à l'impossibilité du mouvement des charges :

«Comme ce corps est un isolant, les charges à l'intérieur sont immobiles. Si q créait un champ, les charges à l'intérieur seraient soumises à un champ électrique»(IS₁, G₂).

Ces deux catégories de commentaire sont exclusives du point de vue du décompte des justifications, puisqu'elles se différencient par la mention explicite de la non-mobilité des charges. La première rassemble de 44% (G₁, N=64) à 19% (G₄, N=64) des étudiants, la seconde de 25% (G₁, N=64) à 14% (G₄, N=64) (Rainsou, 1995). Si l'on regroupe tous ces commentaires centrés avec plus ou moins de précision sur l'idée qu'un isolant rend impossible l'interaction électrostatique entre charges, on obtient des taux impressionnants d'étudiants concernés : de 69% à 33%, selon le niveau d'étude. Le lien indissoluble entre charge et champ est oublié, la cause étant, semble-t-il, «bloquée» ou simplement non manifestée par un effet, sans autre évocation (notamment des charges de polarisation).

Un second questionnaire vise la même difficulté (Rainsou et al., 1994). Le questionnaire «TN» (annexe 4) met en scène deux surfaces équipotentiellles planes, à des potentiels différents, réunies par une zone conductrice et deux zones isolantes s'étendant chacune d'une plaque à l'autre. Aux effets de bord près, le champ dans ces zones est le même, perpendiculaire aux plaques et d'intensité donnée par la relation $E=|V_1-V_2|/d$, où d est la distance entre plaques. La difficulté est d'admettre cette identité alors que les effets du champ sont très différents dans les deux types de zone : un courant permanent s'établit dans la zone conductrice alors que les zones isolantes s'installent dans un régime de polarisation statique.

De 44 % (G₂, N=80) à 68 % (G₄, N=78) des étudiants nient l'égalité des champs dans les différentes zones. De 31 % (G₃, N=77) à 43 % (G₁, N=185) attribuent la différence des champs explicitement à la différence des matériaux, ou à la présence d'isolant, argumentation assortie éventuellement de commentaires tels que :

«Le champ électrique n'existe que dans les zones conductrices. Le rôle de l'isolant est d'isoler, comme le suggère son nom, et donc il amortit ou supprime le champ» (G₂) ;

«Puisqu'un isolant ne conduit pas l'électricité, le champ ne peut pas passer» (G₁) ;

ou encore à l'existence d'un courant, comme l'explique cette justification :

«Comme le champ électrique est responsable du courant et comme les courants sont différents dans le conducteur et dans l'isolant, alors les champs sont différents.» (G₂)

Par delà les différences d'occurrence de ces variantes selon le niveau scolaire (Rainson, 1995), le fait que quelque chose passe ou ne passe pas dans ces différentes zones se révèle déterminant pour accepter l'existence d'un champ.

L'obstacle «champ si mobilité» est à l'oeuvre.

Voyons le second.

«Cause dans la formule»

Dans cette rubrique, nous mettons les réponses qui peuvent s'interpréter en considérant que les étudiants attribuent un statut causal abusif aux «formules» : une grandeur, X , mentionnée dans l'expression algébrique d'une autre grandeur $G=f(X)$, est interprétée comme une «cause» exclusive du phénomène associé à cette grandeur G . Ceci conduit à ne pas prendre en compte la contribution au champ électrique total de charges dont la valeur ne figure pas explicitement dans l'expression de ce champ.

C'est un premier questionnaire sur le théorème de Gauss qui nous avait alertées sur ce point (Viennot & Rainson, 1992). La formule rituelle s'interprétait, pour 80% des étudiants universitaires interrogés, comme si, une fois un champ calculé en un point, on pouvait modifier les charges extérieures à la surface de Gauss correspondante sans modifier la valeur de ce champ. Motif avancé : ce sont les charges intérieures qui comptent (sous entendu ou explicité : «dans la formule»).

La seconde série de questionnaires clarifie ce point à propos du théorème de Coulomb, qui exprime le champ total (\vec{E}) au voisinage d'un conducteur par une formule où figure la densité de la charge σ présente *sur le conducteur au voisinage du point considéré* ($\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$, voir l'annexe 5). La variable σ , à première vue très locale, s'adapte en fait à la disposition de l'ensemble des charges présentes dans tout l'univers : les charges du conducteur s'y répartissent en fonction de toutes les autres. L'expression du champ (\vec{E}) est valable quelles que soient les charges extérieures au conducteur, et, même si cette expression ne mentionne que la variable σ , les sources du champ en question sont toutes les charges de l'univers.

Le questionnaire «C» donné en annexe 5C interroge notamment sur la validité de la formule de Coulomb dans le cas où une charge est placée assez près du conducteur en cause pour l'influencer.

La question est alors de savoir si la formule, $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ laisse croire, à tort, que les sources du champ sont exclusivement sur le conducteur. En fait, une compréhension complète de la situation consiste à considérer qu'une charge extérieure au conducteur a deux effets. L'un est de modifier la densité de charges sur le conducteur, par influence. L'autre, direct celui-là, demeure la contribution au champ total en tout point en vertu du principe de superposition.

On note un très faible taux de réponses complètement correctes (8%) et une difficulté manifeste à prendre en compte à la fois superposition et influence (Rainson et al., 1994 ; Rainson, 1995).

Certains commentaires mentionnent la superposition des contributions des charges du conducteur et de la charge extérieure q sous la forme d'une relation clairement erronée (avec ou sans prise en compte de l'influence) :

« q crée un autre champ \vec{E}' . En situation A, $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ est créé par le voisinage. En situation B, $\vec{E}_T = \vec{E} + \vec{E}'$ » (G_3);

« $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{u}q/4\pi\epsilon_0 r^2$ » (G_3) ;

« $\vec{E} = \sigma'/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ » (G_3).

Dans ces réponses, le premier terme apparaît comme la contribution supposée du conducteur et le second comme celle de la charge extérieure. La formule correcte $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ a donc été réinterprétée, et le champ \vec{E} attribué aux seules charges du conducteur (évoquées dans le membre de droite : $\sigma/\epsilon_0 \vec{n}$).

Nous avons, au vu de ces réponses, construit un questionnaire reproduit en annexe 5 (version C') qui confronte explicitement l'étudiant à la formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ et lui demande de porter un jugement sur celle-ci. Un tiers environ des étudiants interrogés déclare, correctement, que la formule est fautive. Mais l'examen de certains arguments révèle une incompréhension :

« La formule est fautive, puisque σ change, il aurait fallu écrire :

$\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ » (G_2).

Ce sont finalement 75 % des étudiants interrogés qui montrent leur absence de maîtrise du problème.

4. ÉLÉMENTS D'UNE SÉQUENCE D'ENSEIGNEMENT

Ces diverses difficultés mises en évidence, il nous a semblé opportun de centrer une intervention pédagogique sur la mise en oeuvre du lien entre charge et champ d'abord dans des situations statiques. Le programme de Mathématiques Spéciales Technologiques comportant l'étude des conducteurs uniquement en équilibre électrostatique, l'obstacle susceptible d'intervenir était le second : « cause dans la formule » ; telle a donc été notre cible.

Trois étapes ont marqué la construction de la séquence. Toutes ont respecté les mêmes contraintes horaires (15 heures d'électrostatique pour

le cours et les exercices), de programme, de contexte qu'un enseignement normal. Dans tous les groupes expérimentaux, l'enseignante a été S. Rainson.

La première étape est l'échec total d'un premier essai, S_0 , marqué par la conscience des problèmes, et l'insistance, le désir de clarté que tout enseignant motivé cherche à mettre en oeuvre dans ces cas-là.

La seconde est la mise en oeuvre (1992-1993) d'une séquence encore non totalement informée par les résultats de l'enquête sur les raisonnements et difficultés des étudiants : nous notons S_1 cette séquence.

La forme finale de notre séquence, S_p , a été mise en oeuvre quatre années de suite (1993-1997) avec des résultats stables.

Les éléments de stratégie pédagogique utilisés sont décrits ci-dessous. Ils sont rapportés dans chaque cas aux séquences où ils ont été mis en oeuvre. On notera que la séquence S_i n'a mis en oeuvre que trois des quatre éléments exposés ci-dessous, tandis que la toute première séquence, S_0 , n'en avait mis aucun.

Les deux premiers éléments de stratégie concernent les exposés de l'enseignant, les deux suivants sont intervenus surtout dans les débats proposés aux élèves.

Cause et effet associés sur transparent (S_i et S_p)

Il s'agit d'une action d'illustration. Chaque charge en cause est représentée avec son champ, dans une couleur donnée, sur un transparent donné : impossible d'amener cette charge quelque part sans son champ.

Multiplicité des causes : des corps chargés incongrus dans l'illustration des lois (S_i et S_p)

La remarquable puissance de «théorèmes» de l'électrostatique tels que celui de Gauss et son dérivé dit de Coulomb, rappelé en annexe, ou plus simplement d'un énoncé tel que «*le champ est nul à l'intérieur d'un conducteur en équilibre électrostatique*», ou encore des conditions de (dis)continuité des champs au passage d'une surface, est que ces énoncés sont indifférents à la présence de corps chargés au voisinage de ce dont on parle ; les valeurs des grandeurs changent, les lois demeurent. Cette multiplicité des causes possibles de champ, au delà de celles qui apparaissent dans «la formule», nous avons choisi de l'accentuer systématiquement dans la présentation du cours, par la présence incongrue, sur les dessins illustratifs, d'un bric-à-brac de corps chargés.

Multiplicité des effets : analyse approfondie (avec transparents) de la situation, charge près d'un conducteur (S_1 et S_2)

La situation particulière de charges ponctuelles au voisinage d'un conducteur a été l'objet d'une analyse approfondie, débattue en classe avec l'appui de transparents : celui associé à la charge extérieure, disons en vert, pour illustrer la permanence de l'effet direct, et un autre (en rouge) illustrant les charges développées par influence sur le conducteur et leur champ (effet indirect). La surprise de constater que le champ «créé par le conducteur» (rouge) n'est pas perpendiculaire à la surface du conducteur est attendue (figure 1), pour une stimulation du débat.

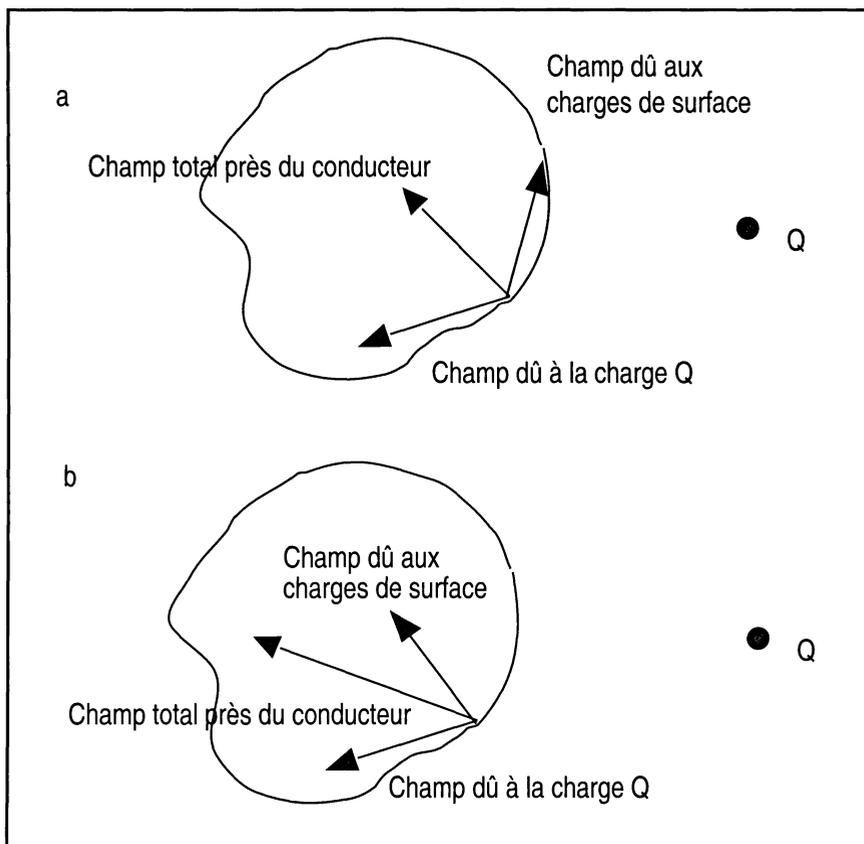


Figure 1 : Champ près d'un conducteur en équilibre électrostatique en présence d'une charge ponctuelle extérieure :

a : analyse correcte, le champ total est perpendiculaire au conducteur,

b : erreur souvent observée, où le champ dû aux seules charges du conducteur est présenté comme perpendiculaire à la surface de celui-ci

Analyses causales appuyées par la mise en oeuvre de modifications (quasi-statiques) des situations physiques étudiées (S_i)

Dans la dernière version de la séquence, nous avons décidé d'accentuer encore la mise en oeuvre d'un raisonnement causal chez nos étudiants, en mettant en jeu des modifications de situation, par opposition à la simple analyse d'états d'équilibre. Ceci s'est fait avec des questions du type : «*qu'est-ce qui change si on double la valeur de la charge ?*», ou «*si on l'éloigne*», etc. L'idée est de mettre explicitement en action le raisonnement causal des élèves, d'en faire apparaître les limites et d'en étendre la portée par la discussion de la non unicité des causes et des effets.

L'évaluation de la séquence s'est faite principalement par questionnaires.

Le même questionnaire a été utilisé cinq années de suite, une (1992-1993, échantillon E₁) pour la séquence S_i et quatre (1993-1997, E₂, E₃, E₄, E₅) pour la séquence finale S_r.

Ce questionnaire («C dans C» : conducteur dans condensateur) est reproduit en annexe 6. Un conducteur isolé et globalement neutre y est présenté, situé entre les plaques d'un condensateur chargé. On interroge sur les champs et leurs sources en quatre points, M₁ à l'intérieur du conducteur, M₂ et M₃ au voisinage de celui-ci, de part et d'autre, et enfin M₄ au voisinage d'une des plaques.

Ce questionnaire a été présenté, en fin de séquence, aux cinq groupes expérimentaux (E₁ à E₅, d'environ 30 élèves chacun), et à des groupes témoins de niveau globalement équivalent (rassemblés, C₁ : classes de Mathématiques Spéciales Technologiques, N=107) ou notoirement supérieur selon les critères habituels (C₂ : classe de Mathématiques Spéciales M' d'un grand lycée parisien, N=39).

Le questionnaire «CF», déjà montré en annexe 2, a également été présenté à deux groupes expérimentaux (E₁ et E₃) et à un groupe témoin C'₁ (N=90) de niveau *a priori* équivalent.

Résultats du questionnaire «C dans C»

Avec le questionnaire «C dans C», nous avons souhaité évaluer simultanément des compétences de type différent. Pour reprendre la métaphore initiale, l'éclairage apporté au contenu par la séquence décrite plus haut est susceptible de produire des effets modulés selon les types de compétence évaluée. Ainsi, il est possible qu'un approfondissement de l'analyse causale s'accompagne d'une régression sur le plan des connaissances classiquement développées, à savoir la valeur du champ

dans un conducteur ou sa direction au voisinage de celui-ci. Nous repérons donc les taux d'occurrence de neuf observables, constituées chacune d'un couple «élément(s) de réponse/item de question», et regroupées en trois «familles» (tableau 1) : connaissances classiques (famille 1), analyse causale (famille 2), synthèse des connaissances classiques et d'une analyse causale maîtrisée (famille 3).

Le tableau 2 détaille les taux d'occurrence correspondant à ces neuf couples pour les cinq groupes expérimentaux.

	Couple	Elément(s)	Item de question
Famille 1 → Connaissances classiques	1	valeur correcte (zéro) du champ	en M_1
	2	direction correcte du champ (perpendiculaires à la surface)	en M_2 et M_3
	3	direction correcte du champ (perpendiculaire à la surface)	en M_4
Famille 2 → Analyse causale	4	identification correcte des sources du champ...	en M_1
	5	identification correcte des sources du champ...	en M_2 et M_3
	6	identification correcte des sources du champ...	en M_4
Famille 3 → Synthèse	7	valeur et sources du champ correctes	en M_1
	8	direction et sources du champ correctes...	en M_2 et M_3
	9	direction et sources du champ correctes...	en M_4

Tableau 1 : Couples «élément(s) de réponse/item de question» utilisés dans l'évaluation de la séquence

Couple → Groupe ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E ₁ N=38	71	37	95	5	42	0	5	5	0
E ₂ N=34	88	56	91	20	62	18	20	27	12
E ₃ N=39	87	67	87	28	59	31	28	36	23
E ₄ N=26	88	54	100	23	50	19	12	23	19
E ₅ N=30	73	47	87	27	73	20	20	37	23

Tableau 2 : **Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question»** (définis en tableau 1) **pour les cinq groupes expérimentaux**

Ces résultats détaillés font apparaître la stabilité sur tous les groupes de la forme de l'histogramme correspondant à chaque famille : dans tous les échantillons, la question «classique» la moins bien réussie concerne les points M₂ et M₃ (couple 2) qui sont aussi l'occasion du plus fort taux de succès quand il s'agit des sources du champ (couple 5). Ce caractère se retrouve avec les groupes témoins.

Plus globalement, tous les groupes manifestent beaucoup plus de difficultés en matière d'analyse causale que sur les connaissances classiques.

Les groupes expérimentaux E₂ à E₅ ayant reçu la séquence finale S₇, manifestent une grande stabilité de performance sur les quatre années correspondantes : les écarts des taux d'occurrence des couples par rapport à la moyenne obtenue en regroupant tous ces groupes expérimentaux en un seul, E₁, ne dépassent pas 11%, ce qui correspond à quatre élèves. Ceci nous amène à comparer les taux d'occurrence dans ce groupe témoin reconstitué, E₁ (tableau 3), d'une part à ceux observés dans la séquence initiale, S₁ (figure 2), d'autre part à ceux observés respectivement dans les groupes témoins C₁ et C₂ (tableau 3 et figure 3).

Les figures 2 et 3 représentent des «profils conceptuels» de groupe (Chauvet, 1994, 1996 a et b ; Viennot, 1994) où l'on reconnaît, pour chaque «famille» la forme caractéristique déjà décrite, traduisant ce qu'on nomme, en termes habituels d'enseignement, la «difficulté relative» qu'il y a à réussir selon les items de question à l'intérieur d'une catégorie donnée : histogramme

en «V» pour les connaissances classiques (famille 1), en «Λ» pour l'analyse causale (famille 2) et pour la synthèse de ces deux compétences (famille 3).

Couple → Groupe ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9
E ₁ N=129	84	57	91	25	61	23	21	31	19
C ₁ N=107	62	46	96	1	21	2	1	7	2
C ₂ N=39	85	72	100	5	36	0	0	10	0

Tableau 3 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour le groupe expérimental reconstitué, E₁, et les deux groupes témoins de niveaux respectifs similaire (C₁) et supérieur (C₂)

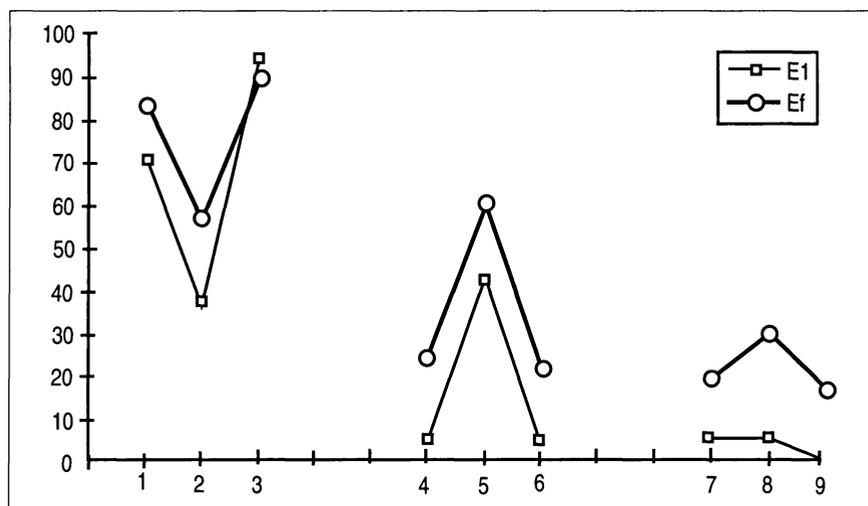


Figure 2 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour les groupes expérimentaux E₁ (séquence S₁) et E₂ (séquence S₂)

On observe, en figure 2, que la séquence S₁ (groupe E₁) se traduit par des taux de succès presque partout inférieurs ($p < 0.01$ au test de χ^2 , Rainson, 1995) à ceux du groupe reconstitué E₁ enseigné avec la séquence S₁, une seule exception concernant les taux très élevés correspondant au

couple 3 : direction du champ au voisinage (en M_4) d'une plaque du condensateur. Il semble que les étudiants de ce groupe (E_1) aient, dans une certaine mesure, pris conscience de la multiplicité des sources du champ (42 % contre 21 % dans le groupe C_1 pour le couple 5) mais il se peut qu'ils aient été, de ce fait, déstabilisés pour trouver la direction des champs correspondants (37 % contre 46 % dans le groupe C_1 pour le couple 2). De nombreux schémas du type représenté en figure 1b en témoignent.

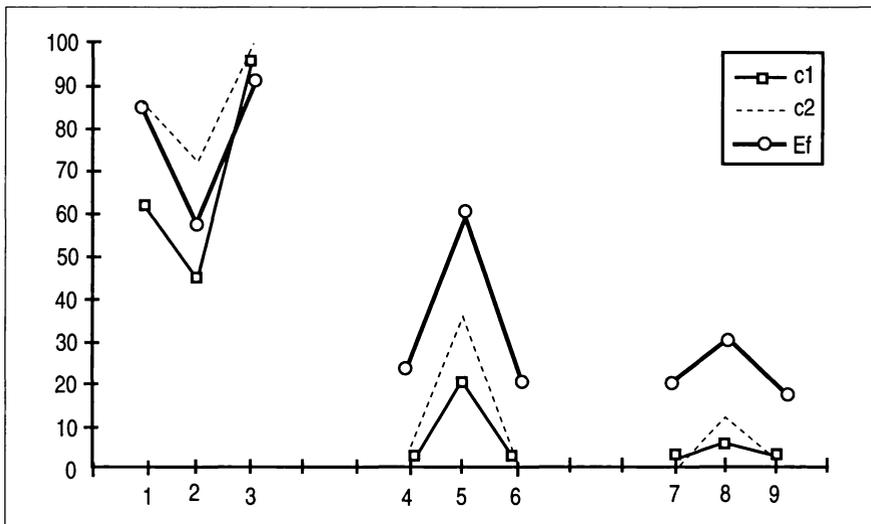


Figure 3 : Taux d'occurrence des 9 couples «élément(s) de réponse/item de question» (définis en tableau 1) pour le groupe expérimental E_f (séquence S_f) et les deux groupes témoins de niveaux respectifs similaire (C_1) et supérieur (C_2)

La figure 3 montre que le groupe E_f se situe, pour les connaissances classiques, entre le groupe de niveau *a priori* comparable C_1 et le groupe de niveau *a priori* excellent C_2 , rejoignant ce dernier pour les couples 1 et 3, c'est-à-dire à propos des points M_1 et M_4 du questionnaire. La séquence finale n'a donc rien fait perdre sur ce terrain, où l'on n'observe plus de trace de déstabilisation.

En matière d'analyse causale, alors que le groupe C_2 voisine avec le groupe témoin «normal» C_1 dans les piètres performances, le groupe expérimental E_f s'en détache par une supériorité des taux d'occurrence de l'ordre de 25 % ($p < 0.01$ au test de χ^2) pour les trois «couples» (4, 5 et 6) de cette «famille». La famille 3 reflète très largement les résultats obtenus pour la famille 2, dans la mesure où c'est par l'analyse causale que pèchent la plupart des réponses erronées.

Il s'agit donc d'un succès, à la fois modeste et remarquablement stable, dans la direction de l'objectif visé par la séquence, c'est-à-dire une intégration entre les connaissances classiques d'une part, et, d'autre part, une prise en compte de l'association entre charges et champs qui respecte le principe de superposition.

Transfert à l'électrocinétique ? Résultats du questionnaire «CF»

Devant le relatif succès dont on vient de faire état, la question se pose de savoir jusqu'où va l'acquisition conceptuelle observée dans les groupes expérimentaux, plus précisément quelle est sa disponibilité pour un transfert à des situations d'électrocinétique. L'association entre le champ et ses sources se maintient-elle lorsqu'il s'agit d'expliquer le comportement du champ dans les fils d'un circuit parcouru par un courant quasi-stationnaire ? Le questionnaire «CF» décrit plus haut (et annexe 2) a été utilisé pour éclairer cette question. Il a été proposé à un groupe expérimental E' (69 étudiants regroupés ayant reçu la séquence finale) et à un groupe témoin C' (128 étudiants regroupés, de même niveau que le groupe expérimental). Les résultats ne font apparaître aucune supériorité de ce dernier groupe sur le groupe témoin, l'un comme l'autre rejoignant à quelques pour cents près les résultats obtenus avec d'autres populations (voir plus haut). Le transfert ne s'est donc pas produit spontanément, ce qui confirme, s'il en était besoin, que ces questions n'ont rien d'immédiat.

5. CONCLUSION

Les points qui nous semblent importants sont les suivants.

En termes d'efficacité scolaire, cette étude paraît de nature à relativiser un fatalisme souvent observé, selon lequel la marge de manoeuvre est à peu près nulle dès que les conditions aux limites de l'enseignement sont strictement fixées. Les classes préparatoires aux grandes écoles françaises constituent typiquement un contexte extrêmement contraint, où il peut être tentant de croire que peu d'aspects de l'enseignement peuvent être modifiés. C'est le moment de rappeler l'un de nos résultats, passé peut-être inaperçu : la motivation et la conscience du problème qui animait l'enseignante lors d'un premier essai d'intervention pédagogique ont donné un résultat nul. En revanche, il semble que des actions «à la marge», mais fondées sur une analyse précise, soient d'une efficacité que le niveau relativement moyen des groupes expérimentaux ne parvient pas à dissimuler, et ceci sans perte sur le terrain des connaissances classiquement valorisées. Voilà pour le versant positif de nos résultats.

Une fois de plus, pourtant, il faut noter la difficulté des acquisitions conceptuelles que vise l'enseignement, si l'on en juge par les faibles progressions obtenues. Ce principe de superposition n'apparaît pas bien mystérieux, *a priori*, mais, comme toujours, c'est la constance dans la prise en compte des lois qui pose problème. Quant au transfert de l'acquisition en question ici de l'électrostatique vers l'électrocinétique, il ne faut pas l'espérer à moindre coût.

En matière de recherche sur les séquences d'enseignement, notre tentative repose la question des méthodes d'évaluation. Il peut arriver qu'une hypothèse précise soit émise sur un processus d'apprentissage d'un contenu précis (Méheut, 1996), et que l'expérimentation permette l'examen d'un minimum de paramètres quitte à ne pas respecter les conditions aux limites habituelles de l'enseignement. Ici, nous avons fait le choix de travailler en contexte contraint avec des actions à la marge. Celles-ci sont orientées selon une ligne directrice, ici la causalité vue à la fois comme source de difficulté et comme voie d'accès à une meilleure maîtrise conceptuelle, mais elles sont aussi multiples : nous renonçons à évaluer la part de chaque ingrédient injecté dans la forme finale de la séquence. En revanche, nous nous imposons de faire une évaluation multidimensionnelle de l'ensemble.

Il faut souhaiter que, en matière d'évaluation de séquences, la réflexion sur ces divers types de recherche se développe et qu'elle puisse s'appuyer sur un nombre accru d'exemples.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSSON B. (1986). The experiential Gestalt of Causation : A common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n° 3, pp. 151-171.
- BARBAS A. & PSILLOS D. (1993). Designing a computer-based course on basic electricity for prospective primary school teachers. In P.Lijnse (Éd.), *European Research in Science Education. Proceedings of the first PhD Summerschool*. Utrecht, Cdb Press, pp. 215-223.
- BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1993). Transition électrostatique électrocinétique : points de vue historique et didactique. *Didaskalia*, n° 2, pp. 31-47.
- BENSEGHIR A. & CLOSSET J.-L. (1996). The electrostatics-electrokinetics transition. Historical and educational difficulties. *International Journal of Science Education*, vol. 18, n° 2, pp. 179-192.
- CHABAY R.W. & SHERWOOD B.A. (1995). *Electric and Magnetic Interactions*. New York, John Wiley and Sons.
- CHAUVET F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception : principes d'élaboration et évaluation d'une séquence d'enseignement*. Thèse de doctorat, Université Paris 7.
- CHAUVET F. (1996a). Un instrument pour évaluer un état conceptuel : exemple du concept de couleur. *Didaskalia*, n° 8, pp. 61-79.

- CHAUVET F. (1996b). Teaching colour : designing and evaluation of a sequence. *European Journal of Teacher Education*, vol. 19, n° 2, pp. 119-134.
- DE KLEER J. & BROWN J.S. (1981). Mental models of physical mechanisms and their acquisition. In R.J. Anderson (Éd.), *Cognitive skills and their Acquisition*. Hillsdale, Lawrence Erlbaum.
- DRIVER R., GUESNES E. & TIBERGHEN A. (1985). Some features of Children's Ideas and their Implications for Teaching. In R. Driver, E. Guesnes & A. Tiberghien (Éds), *Children's Ideas in Science*. Milton Keynes, Open University Press, pp. 193-201.
- DRIVER R. (1989). Changing conceptions. In P. Adey et al. (Éds.), *Adolescent Development and School Science*. Lewes, Falmer Press, p. 141.
- EYLON S. & GANIEL U. (1990). Macro-micro relationships : The missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 1, pp. 79-94.
- GUTIERREZ R. & OGBORN J. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions, *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 2, pp. 201-229.
- HÄRTEL H. (1993). New approach to introduce Basic Concepts in Electricity. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Séries F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 5-21.
- JOHSUA S. (1995). Réponse au point de vue de P.J. Lijnse paru dans *Didaskalia* n° 3, La recherche-développement : une voie vers une «structure didactique» de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia* n° 6, pp.133-135.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique. Berne, Peter Lang.
- LIJNSE P.L. (1994). La recherche-développement : une voie vers une «structure didactique» de la physique empiriquement fondée. *Didaskalia*, n° 3, pp. 93-108.
- MÉHEUT M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège : questionnement et simulation. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- MILLAR R. (1989). Constructive criticisms. *International Journal of Science Education*, Special issue, n° 11, pp. 587-596.
- OGBORN J. (1993). Approches théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, n° 1, pp. 29-477.
- OGBORN J., KRESS G., MARTINS I., & MCGILLICUDDY K. (1996). *Explaining Science in the Classroom*. Buckingham, Open University Press.
- PSILLOS D. (1995). Adapting Instruction to Students' Reasoning. In D. Psillos (Éd.), *European Research in Science Education*. Proceedings of the second PhD Summerschool. Leptokaria, Greece, pp. 57-71.
- RAINSON S. (1995). *Superposition des champs électriques et causalité : Étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de Mathématiques Spéciales Technologiques*. Thèse de doctorat, Paris, Université Denis Diderot.
- RAINSON S., TRANSTRÖMER G. & VIENNOT L. (1994). Students' understanding of superposition of electric fields. *American Journal of Physics*, vol. 62, n° 11, pp. 1026-1032.
- ROZIER S. & VIENNOT L. (1991). Students' reasoning in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, vol. 13, n° 2, pp. 159-170.
- SHERWOOD B.A. & CHABAY R.W. (1993). Electrical Interactions and the Atomic Structure of Matter. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Series F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 23-35..
- VIENNOT L. & RAINSON, S. (1992). «Students' reasoning about the superposition of electric fields. *International Journal of Science Education*, vol.14, n° 4, pp. 475-487.

- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants, *Didaskalia* n° 1, pp 13-27.
- VIENNOT L. (1994). A multidimensional approach in characterising a conceptual state in students : the role played by questions. In D.Psillos (Éd.), *European Research in Science Education II. Art of Text* Thessaloniki, pp. 178-187.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. Louvain la Neuve, De Boeck.
- WHITE B.Y., FREDERIKSEN J.R. & SPOEHR K.T. (1993). Conceptual models for Understanding the behavior of Electrical circuits. In M. Caillot (Éd.), *Learning Electricity and Electronics with Advanced Educational Technology*. NATO ASI Series F, vol. 115. Berlin, Springer-Verlag, pp. 77-95.

ANNEXE 1

Contenus traités antérieurement auprès des étudiants interrogés dans l'enquête préliminaire

Les étudiants interrogés ont reçu respectivement des enseignements sur les notions suivantes :

(G_1) : circuits électriques et introduction à l'électrostatique ; le champ électrique \vec{E} défini par la relation $\vec{F} = q \vec{E}$; le cas d'un champ uniforme, en relation avec le condensateur, et la relation $E = U/d$ (U est la tension et d la distance entre plaques) ;

(G_2) : (en outre), la loi de Coulomb et le théorème de Gauss ; le potentiel (V) défini par la relation $\vec{E} = -\text{grad} V$; la conductivité g définie par la relation $\vec{j} = \gamma \vec{E}$, \vec{j} est la densité de courant ; quelques rudiments de calcul vectoriel, dont la définition du gradient ;

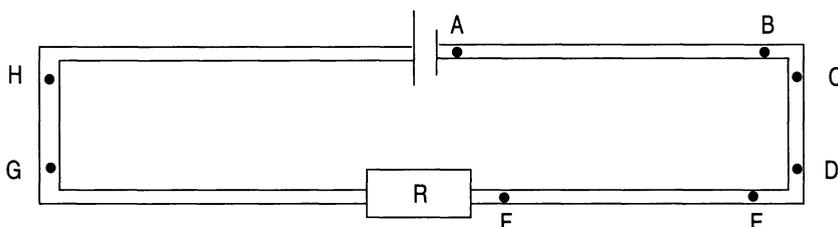
(G_3) : (en outre), les conducteurs en équilibre électrostatique, le fait que le champ électrique est nul à l'intérieur de ceux-ci, le théorème de Coulomb ;

(G_4) : (en outre), les diélectriques (ou encore : «isolants») et les équations de Maxwell.

ANNEXE 2

Le questionnaire «Champ dans les fils» (CF)

On considère un circuit représenté par le schéma suivant, où l'on a volontairement grossi les fils de connexion (de section constante, de matériau identique, de conductivité γ).



\vec{E}_1 est le champ électrique dans la zone AB

\vec{E}_2 est le champ électrique dans la zone CD

\vec{E}_3 est le champ électrique dans la zone EF

\vec{E}_4 est le champ électrique dans la zone GH

1) Représentez les vecteurs \vec{E}_1 , \vec{E}_2 , \vec{E}_3 , \vec{E}_4 . Justifiez votre représentation (direction, sens, valeur relative des normes).

2a) Quelles sont les sources de ces champs ?

2b) Comment s'expliquent les éventuels changements de direction d'une zone à l'autre ?

2c) Vous étiez-vous déjà posé la question 2b ?

Éléments de la réponse correcte

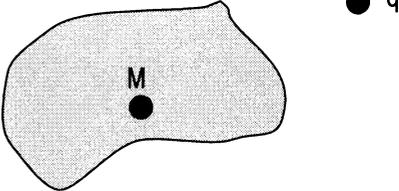
Le champ est de norme identique dans les quatre sections indiquées : la norme de la densité de courant \vec{j} et la conductivité γ y sont identiques, or $\vec{j} = \gamma \vec{E}$. Le champ est dirigé le long des fils, du pôle + vers le pôle -. Les sources de ces champs sont toutes les charges présentes dans tout le circuit, sur les pôles et la surface des fils. Ce sont les charges de surface qui expliquent que la direction du champ s'adapte aux changements de direction des fils.

ANNEXE 3

Les questionnaires « Isolants » (IS1 et IS2)

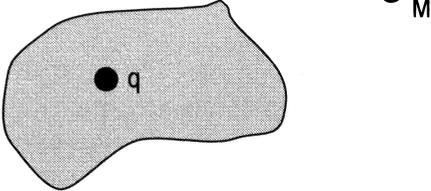
IS1 :

Une charge ponctuelle est située à l'extérieur d'un isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M situé à l'intérieur de l'isolant (voir le schéma ci-dessous) ?

	<p>OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/></p> <p>Pourquoi ?</p>
---	--

IS2 :

Une charge ponctuelle est située à l'intérieur d'un isolant. Cette charge crée-t-elle un champ électrique en un point M situé à l'extérieur de l'isolant (voir le schéma ci-dessous) ?

	<p>OUI <input type="checkbox"/> NON <input type="checkbox"/></p> <p>Pourquoi ?</p>
---	--

Dans les deux cas, la réponse correcte, en vertu du principe de superposition, est que la charge crée un champ électrique non nul au point considéré, en d'autres termes, sa contribution au champ total est non nulle.

ANNEXE 4

Le questionnaire «Tranche Napolitaine» (TN)

<p><i>Dans la situation représentée ci-dessous, les deux surfaces équipotentielles sont des plans infinis, perpendiculaires au plan de la figure. Décrire le champ électrique entre les deux surfaces.</i></p>		
<p><i>surface équipotentielle (potentiel V_1)</i></p>		
<p><i>zone conductrice</i></p>	<p><i>zone isolante</i></p>	<p><i>zone conductrice</i></p>
<p><i>surface équipotentielle (potentiel $V_2, V_2 = \pi V_1$)</i></p>		
<p><i>Selon vous, les champs électriques dans la zone isolante et dans les zones conductrices sont-ils</i></p> <ul style="list-style-type: none"><i>différents ?</i><i>identiques ?</i><i>je ne sais pas</i> <p><i>Justifiez votre réponse.</i></p>		

La réponse correcte est que les champs sont égaux (en négligeant les effets de bord). Le seul argument correct dont disposent les étudiants *G1* est la relation $E = U/d$ (la tension U et la distance d entre plaques sont identiques pour les deux matériaux).

À des niveaux plus avancés, on peut invoquer la relation $\vec{E} = -\text{grad } V$ qui s'applique dans tout matériau. Enfin, les étudiants les plus avancés peuvent s'appuyer sur la continuité de la composante tangentielle du champ électrique \vec{E} à l'interface entre isolant et conducteur.

ANNEXE 5

Le questionnaire «Coulomb» (deux versions, C et C')

Première version (C) :

En P , à la surface d'un conducteur en équilibre, la densité surfacique de charge est s . Le vecteur unitaire, perpendiculaire à la surface du conducteur en P et dirigé vers l'extérieur, est \vec{n} . À l'extérieur du conducteur en un point proche de P , le champ électrique est $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$.

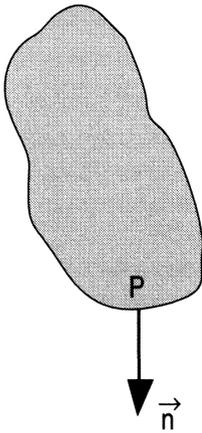
1 – Le champ est-il créé par

- a) les charges au voisinage de P ?
- b) toutes les charges du conducteur ?
- c) toutes les charges de l'univers ?

Choisissez la réponse correcte et justifiez la.

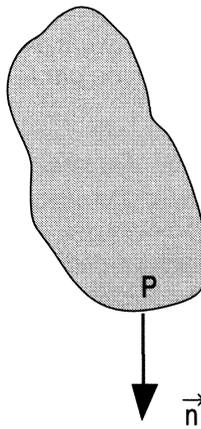
2 – On considère les deux situations ci-dessous

Situation A



Situation B

(q est une charge ponctuelle)



• q

Le vecteur unitaire perpendiculaire au conducteur en P et dirigé vers l'extérieur est \vec{n} .

a) Dans la situation B, le champ électrique \vec{E}' à l'extérieur du conducteur en un point proche de P est-il donné par l'expression $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$?

Oui

Non

Je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

b) le champ électrique \vec{E}' à l'extérieur du conducteur en un point proche de P est-il le même dans les situations A et B ?

Oui Non Je ne sais pas

Justifiez votre réponse.

c) La densité surfacique de charge σ , est-elle la même dans les situations A et B ?

Oui Non Je ne sais pas

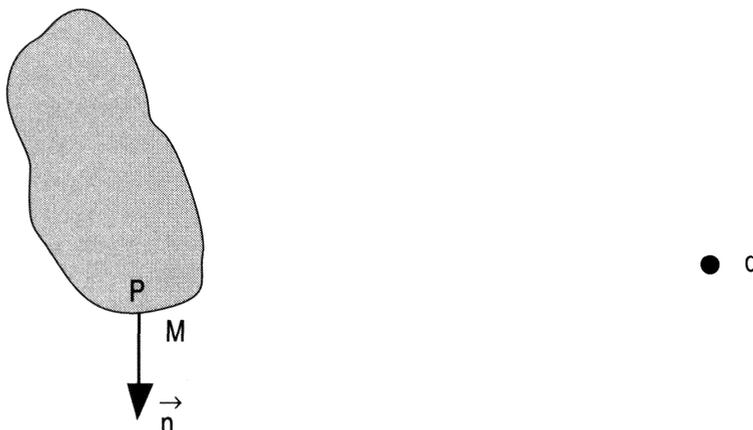
Justifiez votre réponse.

Les réponses correctes sont les suivantes.

La formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ concerne l'expression du champ total au voisinage de P, créé par toutes les charges de l'univers. Elle reste valable quel que soit l'environnement du conducteur (réponse OUI en question 2a). Les valeurs des grandeurs \vec{E} et s_p sont, elles, affectées par la présence de la charge extérieure (réponses NON aux questions 2b et 2c).

Deuxième version (C') :

Un étudiant suggère l'expression « $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n} + \vec{E}_q$ »
où \vec{E}_q est le champ créé par la charge q en un point M voisin d'un conducteur.



<i>Qu'en pensez vous ?</i>	<i>Cette expression est-elle</i>
<i>correcte</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi</i>
<i>incorrecte ?</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi et donnez l'expression correcte</i>
<i>ambigüe ?</i>	<i>OUI NON Expliquez pourquoi et donnez une expression non ambigüe</i>

Réponse correcte

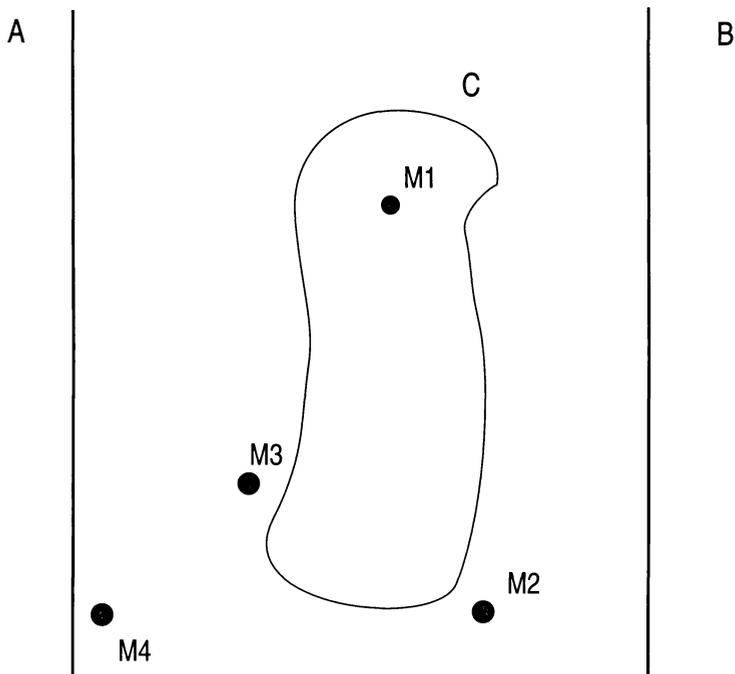
Cette expression est fausse. La formule $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ concerne l'expression du champ total au voisinage de P, créé par toutes les charges de l'univers. Elle reste valable quel que soit l'environnement du conducteur. La variable s résume en quelque sorte l'action au point M de l'ensemble des charges en présence, car sa valeur s'adapte à la charge extérieure *via* le phénomène d'influence.

ANNEXE 6

Le questionnaire «Conducteur dans Condensateur» (C dans C)

Soit un conducteur C initialement neutre, isolé.

Soit un condensateur plan, d'armatures (A, B) séparées par le vide, chargé et isolé (on suppose $Q_A > 0$). On introduit C dans le condensateur plan : voir figure ci-dessous. On suppose l'équilibre électrostatique établi.



On considère les points

M_1 , à l'intérieur de C ,

M_2, M_3 , à l'extérieur de C , au voisinage de sa surface,

M_4 , entre les armatures du condensateur, au voisinage de l'armature A .

Représentez les champs électriques $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \vec{E}_4$ qui existent respectivement aux points M_1, M_2, M_3 et M_4 .

Justifiez votre schéma.

Quelles sont les sources de \vec{E}_1 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_2 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_3 ?

Quelles sont les sources de \vec{E}_4 ?

Réponses correctes

Introduit dans le condensateur, le conducteur C, par le phénomène d'influence, acquiert une densité surfacique de charge non uniforme et perturbe la densité de charge sur les armatures.

En M_1 , le champ est nul. Ailleurs, il est donné par l'expression $\vec{E} = \sigma/\epsilon_0 \vec{n}$ (voir annexe 5). En M_2 et M_3 , il est normal à la surface de C, vers l'extérieur de ce corps pour M_2 ($s > 0$) et vers l'intérieur de celui-ci pour M_3 ($s < 0$). En M_4 , il est normal à l'armature A ($s > 0$) et dirigé vers l'armature B.

Dans tous les cas, les sources du champ sont l'ensemble des charges en présence (sur A, B et C).

Enseigner les pratiques effectives de la science : expériences d'étudiants en projet de recherche de licence

Teaching the actual practices of science : students' experiences of undergraduate research projects

Jim RYDER, John LEACH

Learning in Science Research Group
Centre for Studies in Science and Mathematics Education
School of Education
University of Leeds
Leeds LS2 9JT, U.K.

(Traduit par Anne-Marie Servranckx)

Résumé

Cet article décrit une étude de cas basée sur des entretiens avec des étudiants de 20 à 22 ans à propos de leur expérience de projet de fin d'études en science à l'université. Nous examinons comment, par leur travail de projet, les étudiants développent leur compréhension des pratiques effectives de la science, c'est-à-dire des différents moyens utilisés par les scientifiques pour développer le savoir scientifique et les procédures de recherche. Nous donnons des exemples de connaissances explicites et implicites tels qu'on les rencontre dans un travail de projet. Nous indiquons que les messages implicites communiqués aux étudiants pendant leur travail de projet influencent de manière significative leur apprentissage des pratiques effectives de la science.

Mots clés : épistémologie, nature de la science, licence, projets de recherche, acculturation.

Abstract

In this paper we give details of a longitudinal interview study of students' experiences of project work involving twelve final year university science students aged 20 to 22 years. We consider how these students, as a result of project work, develop their understanding of the actual practices of science – the various ways in which scientists work with and develop scientific knowledge and investigative procedures. Details of both explicit knowledge and tacit knowledge communicated through project work are presented. It is suggested that student learning about the actual practices of science is significantly influenced by implicit messages about science communicated to students during project work.

Key Words : epistemology, nature of science, undergraduate, investigative project, enculturation.

Resumen

Este artículo describe un estudio de casos basado en las entrevistas a estudiantes de 20 a 22 años sobre la experimentación en su «proyecto de final de carrera de ciencias» en la Universidad. Examinamos cómo, por su trabajo de proyecto, los estudiantes desarrollan su comprensión de las prácticas reales de la ciencia, es decir de los diferentes medios de los que se valen los científicos para ampliar los conocimientos científicos y los procesos de investigación. Damos algunos ejemplos de los conocimientos explícitos e implícitos tales como aparecen en un proyecto. Indicamos que los mensajes implícitos, comunicados a los estudiantes durante sus proyectos, influyen de manera significativa en su aprendizaje de las prácticas reales de la ciencia.

Palabras claves : epistemología, ciencia, «licencia», proyecto de investigación, cultura.

INTRODUCTION

En Grande-Bretagne, pendant la licence en sciences qui dure 3 à 4 ans, les étudiants se spécialisent dans un sujet unique. S'ils entrent à l'université directement après l'école, ils obtiennent leur licence à l'âge de 21-22 ans. Pendant les 2 ou 3 premières années de leur cursus universitaire, ils étudient la discipline scientifique qu'ils ont choisie au travers d'un ensemble de cours magistraux, de travaux dirigés, de séances d'exercices, d'activités expérimentales ou de classes de terrain. Au cours de la dernière année, les étudiants poursuivent le même programme mais l'activité expérimentale est remplacée par des projets de recherche. Ces projets

permettent aux étudiants d'entreprendre des recherches, souvent originales, ouvertes et empiriques, en tant que membres de groupes de recherche professionnelle dans les universités. Ces projets sont caractéristiques de la licence ; ils donnent aux étudiants une occasion unique de se former aux pratiques effectives de la science, aux moyens utilisés par les scientifiques pour travailler et développer la connaissance scientifique, rechercher des procédures, tout en étant intégrés dans un volet de la pratique scientifique professionnelle.

Dans cet article, nous nous sommes basés sur une étude des expériences des étudiants en projet de recherche pour montrer différentes voies par lesquelles les étudiants peuvent se former aux pratiques effectives de la science en réalisant un travail de projet. Cette publication commence par une définition des pratiques effectives de la science en tant que partie importante du programme de licence. Ensuite nous soulignons les questions de la recherche dont cet article rend compte. Suit une description de la recherche menée au cours des expériences des étudiants pendant leur travail de projet. Nous présentons ensuite un aperçu des moyens par lesquels les étudiants apprennent ce que sont les pratiques effectives de la science au cours de leur travail de projet, en illustrant les points clés par des épisodes relatés dans notre étude. Enfin, nous discutons quelques implications pédagogiques et nous abordons d'autres contextes de programme de licence dans lesquels les étudiants peuvent aussi se former aux pratiques effectives de la science.

1. LES PRATIQUES EFFECTIVES DE LA SCIENCE TELLES QU'ABORDÉES DANS LE PROGRAMME DE LICENCE

L'enseignement de la licence en sciences se fixe principalement comme centre d'intérêt **les contenus de la science**. Ceci comprend les lois, les modèles, les concepts et théories d'une discipline. La sélection naturelle, la loi des gaz parfaits, la mécanique quantique et la tectonique des plaques sont différents exemples de ces contenus scientifiques. Les contenus de savoir font l'objet de manuels et forment le matériel de base des cours magistraux. Les programmes de licence s'intéressent aussi aux **méthodes de la recherche scientifique**. Ceci implique l'utilisation adéquate du matériel expérimental et des procédures, ainsi que des considérations sur la façon de concevoir la recherche et l'analyse des données expérimentales. Au cours de la licence, les étudiants vont avoir beaucoup à assimiler concernant les contenus et la méthode de la discipline scientifique choisie.

L'apprentissage des contenus et des méthodes d'investigation de la science constitue une part significative de la formation de la licence en science. On peut le considérer à deux niveaux. Au premier niveau, l'apprentissage des contenus scientifiques consiste à acquérir une connaissance des théories particulières et des lois et être capable de les utiliser pour expliquer quelques phénomènes choisis à titre d'exemples. Ainsi un étudiant en physique doit pouvoir manipuler les variables de la loi des gaz parfaits et réaliser des calculs de changements de pression et de volume à température constante. Au second niveau, l'apprentissage des contenus scientifiques nécessite la compréhension de l'utilisation, par les scientifiques, du savoir scientifique. Comment les scientifiques font-ils des approximations et appliquent-ils des conditions limites lorsqu'ils utilisent des idées théoriques pour résoudre des problèmes réels ? Comment les scientifiques déterminent-ils si les données expérimentales confortent ou contredisent les prédictions du modèle scientifique ? Selon l'exemple précédent, et à ce second niveau, cela signifie, pour l'étudiant qui apprend les lois des gaz parfaits, d'apprécier pour quelles pressions ces lois restent valides et de réaliser comment modifier ces lois pour rendre compte du comportement des gaz en-dehors de ces limites (pour un exemple en sciences biologiques voir Ryder & Leach, 1996).

De même, l'apprentissage des méthodes scientifiques peut être considéré à deux niveaux. Par exemple, au premier niveau, les étudiants apprennent comment réaliser des procédures de laboratoire en utilisant du matériel et des échantillons standard. Au second niveau, les étudiants apprennent comment les scientifiques, dans leurs pratiques, utilisent ces procédures de laboratoire avec du matériel et des échantillons hors standards pour aborder des problèmes originaux. Ceci nécessite des manipulations très prudentes pour obtenir des résultats fiables, ainsi qu'un mode opératoire précis pour obtenir une validité maximale. Apprendre les méthodes scientifiques au second niveau, consiste aussi à réaliser comment les scientifiques déterminent si les résultats d'une expérience sont fiables et valides et choisissent, parmi différentes procédures expérimentales, celle qui est adéquate dans des conditions particulières.

Aux deux niveaux considérés, l'objectif de l'apprentissage en sciences du contenu et des méthodes est de faire passer les étudiants du stade novice au stade expert. Les étudiants vont développer leur compréhension des pratiques effectives de la science, c'est-à-dire des différents moyens utilisés par les experts en science pour travailler, développer les contenus et les méthodes scientifiques dans le contexte de leur pratique professionnelle.

Pour étudier les contenus et les méthodes scientifiques au premier niveau, les étudiants peuvent trouver tout ce dont ils ont besoin dans les

livres et manuels de laboratoire. Mais, au second niveau, comme nous le montrons plus loin, utiliser les contenus et les méthodes nécessite d'explicitier aux étudiants des aspects de **la nature de la science**. Des analyses de la nature de la science, faites antérieurement, ont montré qu'il n'existe pas un seul point de vue capable de rassembler une large adhésion (pour une revue accessible, voir Chalmers, 1982). Ceci met en évidence la difficulté, pour les enseignants en science, d'explicitier les pratiques effectives de la science à l'intérieur de leur discipline.

Un des aspects importants des pratiques effectives de la science est une compréhension de la nature du savoir scientifique. Les théories scientifiques sont reliées aux phénomènes du monde réel, bien qu'elles en soient distinctes. Une théorie comprend souvent nombre d'hypothèses et d'approximations qui limitent l'extension de son application aux phénomènes du monde réel. En outre, différents types de connaissances sont utilisés dans différentes disciplines pour atteindre des buts différents. Dans certains cas, les idées théoriques jouent un rôle central : par exemple, dans le cas des scientifiques qui cherchent à produire un modèle théorique capable d'expliquer des phénomènes observés, ou lorsqu'ils conçoivent les investigations à mener pour choisir entre des idées théoriques qui se contredisent. Dans d'autres cas, les idées théoriques restent en arrière-plan : par exemple, lorsqu'il s'agit de produire des mesures extrêmement précises de phénomènes, l'important est de pouvoir développer de nouvelles techniques d'investigation menant à la précision souhaitée. Les étudiants, confrontés aux contenus scientifiques tels que décrits au second niveau, devront approfondir leur connaissance de la nature du savoir scientifique dans leur discipline.

Le deuxième aspect des pratiques effectives de la science concerne la nature de la recherche scientifique. Les données expérimentales et d'observation ont, bien sûr, une très grande importance dans la production et la validation de toute connaissance scientifique nouvelle, mais il faut aussi tenir compte des perspectives théoriques du chercheur et des points de vue nouveaux que peut générer une recherche. L'autre élément de la nature de la recherche scientifique qu'il faut prendre en compte est le rôle des programmes de recherche : l'ensemble des questions et des points de vue théoriques auxquels la communauté des chercheurs adhèrent et qui détermine la légitimité des problèmes proposés à la recherche. Il existe une distinction importante entre «*la science toute faite*» et «*la science en action*» (Latour, 1987). Dans l'apprentissage des contenus scientifiques, au premier niveau, la connaissance scientifique est présentée comme un ensemble de faits acceptés, «nettoyée» de toute les incertitudes et des chemins obscurs qui ont caractérisé son parcours jusqu'à l'adhésion par la communauté scientifique. Cependant, ces chemins obscurs et ces incertitudes font partie du quotidien des pratiques effectives de la science et l'étudiant les rencontrera

lorsqu'il étudiera les méthodes scientifiques, au second niveau. Par exemple, les scientifiques qui utilisent des techniques expérimentales exigeant du matériel très précis doivent acquérir une très grande compétence dans le maniement des techniques et des appareils utilisés, avant d'être capables de produire des données fiables et valides.

Le dernier aspect des pratiques effectives de la science qui est rarement explicité est le fonctionnement de la science comme activité sociale. De nombreuses raisons sociales entrent en jeu dans la justification de la déclaration de nouvelles connaissances : par exemple, la recension par les pairs des articles de recherche soumis à publication et le statut au sein de la communauté scientifique de ceux qui proposent une nouvelle connaissance. De plus, on peut aussi considérer la science en tant qu'activité sociale à l'intérieur des laboratoires de recherche, au sein des interactions complexes entre techniciens, étudiants-chercheurs et chercheurs professionnels. Cette culture de l'activité scientifique constitue un des aspects importants des pratiques effectives de la science (Ziman, 1995).

2. LA SIGNIFICATION DE L'APPRENTISSAGE DES PRATIQUES EFFECTIVES DE LA SCIENCE

Apprendre les pratiques effectives de la science par une prise de conscience croissante de la nature de la science est considéré comme un but important du programme à tous les niveaux de l'éducation en science (Millar, 1989 ; AAAS, 1990 ; Van Heuvelen, 1991 ; Matthews, 1994). Nous énonçons ici trois raisons de prendre comme objectif important de la licence celui d'initier les étudiants à une compréhension des pratiques effectives de la science. D'abord, tout étudiant qui se destine à la recherche et compte y faire carrière ne peut que bénéficier de ces aperçus sur la manière de travailler des scientifiques du point de vue des contenus et des méthodes. Deuxièmement, beaucoup de diplômés en sciences feront des carrières proches des sciences : enseignant en science, journaliste scientifique, hommes et femmes d'affaires, chargé de l'administration et de la politique du développement scientifique. Pour ces étudiants, ces considérations sur les pratiques effectives de la science seront aussi importantes pour leur future carrière. Par exemple, les journalistes qui doivent côtoyer chaque jour des scientifiques tireront profit d'une meilleure connaissance des motivations et des pratiques des scientifiques. De plus, pour les enseignants en science, l'introduction aux différentes façons par lesquelles les scientifiques développent et maîtrisent la connaissance les aideront à rendre vivant et à contextualiser leur enseignement. Le troisième argument prend en compte l'aide que cet enseignement des pratiques effectives de

la science apporte aux étudiants de licence eux-mêmes pour réaliser leurs travaux. Souvent des tâches courantes données aux étudiants de licence requièrent une compréhension en profondeur de la manière propre aux scientifiques d'approcher les problèmes. Cette compréhension doit s'ajouter à la connaissance de la matière de base du sujet.

3. POINT CENTRAL DE LA RECHERCHE

Il existe de nombreuses études concernant les idées des élèves sur les divers aspects des pratiques effectives de la science (Larochelle & Désautels, 1991 ; Driver et al., 1996 ; pour une revue voir Lederman, 1992). Mais il y a peu d'études sur celles des étudiants de niveau universitaire (Fleming, 1988 ; Séré et al., 1993 ; Ryder et al., 1997), et encore moins sur le développement de ces idées.

Dans cette étude, nous cherchons à relier les expériences d'un petit échantillon d'étudiants, pris dans un contexte d'enseignement précis, au développement de leur compréhension des pratiques effectives de la science. Nous nous basons sur quelques études de cas "longitudinales" des expériences d'étudiants de licence au cours du travail de leur projet de fin d'études à l'université de Leeds en Grande-Bretagne. Comme il est montré dans la partie quatre, de tels projets mettent les étudiants dans les conditions d'un véritable apprentissage des pratiques effectives de la science.

Le point de vue développé ici met l'accent sur :

- les caractéristiques de la connaissance des pratiques effectives de la science ;
- les moyens par lesquels le travail de projet en licence permet l'apprentissage des pratiques effectives de la science.

4. PROJETS DE RECHERCHE AU COURS DE LA LICENCE EN SCIENCE

Le but principal du travail du projet de dernière année, tel que le conçoivent les professeurs d'université impliqués dans l'étude rapportée ici, est de donner une expérience des pratiques effectives de la science.

«[Les projets de recherche donnent aux étudiants] l'occasion de vivre la vie d'un vrai laboratoire et d'en expérimenter les diverses facettes en faisant partie d'un groupe actif de recherche : en expérimenter les

pièges, les essais, les tribulations, aussi bien que la passion de la recherche.» (Tuteur cité dans Ryder et al., 1996a, p. 10).

Au cours du travail de projet, les étudiants doivent mettre en pratique une série de compétences que nous avons caractérisées comme faisant partie du second niveau de l'apprentissage des contenus et méthodes en science – apprendre comment les scientifiques utilisent le savoir scientifique et les procédures de recherche. Les projets de recherche jouent un rôle particulier en familiarisant les étudiants à toute une gamme de facettes des pratiques effectives de la science.

Le travail de projet peut conduire à divers types d'activités : le travail de laboratoire, le travail de terrain, l'analyse de données, le travail sur les modèles théoriques, le travail en bibliothèque. À l'Université de Leeds, chaque étudiant développe son propre projet et est dirigé par un membre de l'équipe enseignante. Dans la plupart des cas, cette personne est un chercheur professionnel dont le travail présente des liens avec les projets proposés. Dans ce contexte, la plupart de ces projets prennent la forme d'une recherche originale et peuvent se conclure par une publication dans une revue scientifique. Les projets comptent pour un tiers de la note totale en fin d'année.

Il est important de souligner que la recherche dans les départements universitaires ne représente qu'un aspect de la pratique scientifique contemporaine. Celle-ci comprend aussi la recherche orientée vers la production dans le cadre commercial et la recherche interdisciplinaire. Notre étude se limite au développement des idées des étudiants à propos de la pratique scientifique dans le contexte de la recherche à l'intérieur des départements universitaires en science.

5. CONCEPTION DE L'ÉTUDE

L'étude fut menée de septembre 1994 à janvier 1996 et faisait partie d'une collaboration entre la School of Education et les départements de biochimie et biologie moléculaire, chimie, sciences de la Terre et génétique à l'université de Leeds. Les objectifs de l'ensemble de la recherche prennent en compte l'organisation au sein des départements, le contrôle et l'évaluation du travail de recherche (Leach et al., 1996). Cependant dans cette publication nous n'aborderons que la partie de nos données qui relatent le développement des opinions des étudiants à propos des pratiques effectives de la science. Une analyse complète des données se trouve dans Ryder et al. (1996a ; 1996b ; 1997).

Nous avons mené douze études longitudinales de cas d'étudiants et de leurs tuteurs. Pour mieux comprendre les problèmes liés aux pratiques

effectives de la science, nous considérons trois entretiens avec des étudiants menés à différents moments au cours des 5-8 mois du travail de projet. Le tuteur de chacun de ces étudiants a été interrogé à la fin du projet. Les douze études de cas présentent divers types de projet (par exemple : laboratoire, analyse de données, modèle théorique, travail de terrain), de compétences et de profils (par exemple : âge, sexe, expérience de travail, aspirations de carrière). Cependant, un échantillon aussi limité ne peut être considéré comme représentatif de tout le corps étudiant des quatre départements. Il nous permet toutefois d'analyser l'interaction entre les expériences individuelles des étudiants en travail de projet et leur apprentissage des pratiques effectives de la science.

Les entretiens étaient semi-structurés : basés sur le modèle de l'entretien mais organisés de manière à inciter les participants à relever les problèmes qui leur paraissaient importants. De plus amples détails sur l'échantillonnage de l'étude de cas et sur l'organisation de l'entretien des étudiants et des tuteurs sont donnés par Leach et al. (1996).

Notre étude a pour objet le développement des idées des étudiants à propos des pratiques effectives de la science et l'influence des activités liées au projet sur ce développement. Il faut noter cependant que ces idées à propos des pratiques effectives de la science ne sont pas évidentes. Elles doivent être déduites du discours de l'étudiant à propos de la science, ou d'actions, dans un contexte spécifique. Notre utilisation des entretiens d'étudiants présente certaines limites. Dans chaque cas, les entretiens donnent les points de vue «exposés» par les étudiants – points de vue exprimés dans le contexte d'un entretien de recherche. Il n'est pas certain que ce que les étudiants disent dans un entretien reflète exactement le point de vue sur la science engendré par leurs activités dans le projet. Cependant, nous estimons que les opinions exprimées dans les entretiens donnent une image représentative de ce que les étudiants pensent suite à leur travail de projet. C'est en particulier le cas lorsqu'ils illustrent leurs considérations sur la science par la description d'épisodes de leur propre travail de projet. Ces épisodes sont repris dans cet article. Le fait d'observer en direct les étudiants au cours de leurs activités dans leur projet nous aurait permis de sonder leurs opinions sur la science mais cela aurait pris trop de temps à cause de la durée, de 5 à 8 mois, du projet de chaque étudiant.

Le point de vue présenté dans cette publication est issu du résultat des études de cas elles-mêmes mais aussi de nos lectures annexes, en didactique des sciences, en histoire et en philosophie des sciences. Pour illustrer et donner des exemples de ce point de vue, nous présentons quelques épisodes de nos études de cas. Ils constituent des sortes «d'instantanés» des expériences des étudiants au cours de leur travail de projet, choisis pour mettre en exergue les points clés. Ces épisodes ne sont

pas représentatifs des activités typiques de projet. Nous avons utilisé autant que possible des extraits directs des entretiens des étudiants et des tuteurs. Mais dans de nombreux cas, ce n'est qu'en prenant un entretien dans son ensemble que l'on peut établir sa signification. Dans ces cas-là, les épisodes comprennent un commentaire plutôt qu'une citation brute.

6. L'APPRENTISSAGE DES ÉTUDIANTS SUR LES PRATIQUES EFFECTIVES DE LA SCIENCE

6.1. Connaissances explicite et tacite

La connaissance des contenus et des méthodes de la science est la **connaissance explicite**. On peut la lire dans les manuels, en parler pendant les pauses café ; elle constitue l'essentiel des syllabus de cours. À l'opposé, la connaissance des pratiques effectives de la science est souvent très difficile à montrer de manière explicite. Par exemple, les biologistes moléculaires peuvent réaliser avec succès des procédures de polymérisation en chaîne et évaluer la signification des résultats. Cependant, ils peuvent éprouver des difficultés à décrire de manière explicite chaque détail de la manière dont ils procèdent. Une telle connaissance est la **connaissance tacite**, décrite par Polanyi (1967, p. 4) en tant que « *connaître plus que ce que l'on peut en dire* ». La connaissance tacite existe aussi en-dehors de la science. Par exemple, la plupart des gens sont capables d'utiliser la grammaire correctement tout en étant incapables de décrire les règles grammaticales de manière explicite.

La connaissance tacite des pratiques effectives de la science joua un rôle important dans de nombreuses études de cas des expériences des étudiants en travail de projet de dernière année. Par exemple, un étudiant en sciences de la Terre décrivit à quel point il fut surpris de découvrir avec quelle facilité son tuteur, Suzan, pouvait identifier les types de roche pendant une visite sur le terrain.

« Suzan nous emmena sur un site (...) et nous signala certaines choses. Nous lui avons dit : "oh, nous n'avons pas appelé [ces roches] ainsi, nous ne pensions pas du tout que c'était cela" (...) nous les interprétions tout-à-fait différemment et les appelions autrement. »
(deuxième entretien)

En fait cet étudiant apprit, par la suite, que son tuteur de projet utilisait une clé de classification particulière pour identifier les types de roche. Ce tuteur s'était déjà rendu de nombreuses fois sur ce site. Suite à ses visites, son utilisation de cette clé de classification était devenue tacite. Elle n'était

plus explicitement consciente de faire usage d'un système de classification pour identifier les types de roches de ce site. Au cours de la visite sur le terrain, l'étudiant, lui non plus, ne se rendait pas compte de son utilisation d'un système de classification et était incapable d'identifier les roches comme le faisait son tuteur. Les clés de détermination sont un outil de base pour décrire et interpréter le monde de la nature dans les sciences de la Terre (et bien sûr dans de nombreuses sciences de la Vie) et sont communément utilisées au cours des études de terrain.

L'exemple donné ci-dessus montre que, pour assurer au mieux l'apprentissage des pratiques effectives de la science, les professeurs en science doivent pouvoir identifier les contextes dans lesquels ils font usage de leurs connaissances tacites. Les ayant rendues explicites à eux-mêmes, il faut encore qu'ils s'assurent que ces connaissances tacites sont effectivement communiquées aux étudiants. Dans certains cas, il peut être approprié de communiquer explicitement aux étudiants des aspects des pratiques effectives de la science ; dans d'autres cas, une approche plus implicite peut être plus efficace.

6.2. Les messages implicites des programmes

Dans nos études de cas, nous avons trouvé que les connaissances des étudiants sur des pratiques effectives de la science se développent souvent à partir des messages communiqués implicitement au cours des activités d'enseignement. Ces messages implicites contrastent avec ceux des activités d'enseignement dans lesquels les professeurs discutent explicitement des aspects des pratiques effectives de la science. L'importance de ces messages implicites a déjà été reconnue en didactique. Par exemple, Brickhouse (1990) a montré que des enseignants communiquent des messages implicites sur la science par l'organisation du travail de laboratoire, et par la manière de parler des données fournies par ces activités. Roth & Lucas (1997) ont décrit ces messages implicites comme un «*programme mis en actes*» – un programme communiqué par l'action plutôt que par la parole.

Dans certains cas, les connaissances issues de ces messages implicites se formaient sans lien avec le but poursuivi par le professeur dans ses activités d'enseignement. Dans d'autres cas, les professeurs de science étaient conscients que l'activité d'enseignement peut engendrer, implicitement, des idées chez les étudiants, sans nécessité de rendre le message explicite.

En voici un exemple : l'épisode suivant décrit un contexte d'enseignement dans lequel le tuteur de l'étudiant n'est pas du tout

impliqué. L'étudiant y développe un raisonnement complexe sur les pratiques des géologues dans la construction de leurs modèles théoriques basée sur l'évaluation de données expérimentales. Même si la nature des modèles multiples n'est jamais rendue explicite, l'étudiant peut parvenir à se la représenter grâce aux messages implicites révélés par une des facettes de l'activité scientifique professionnelle.

Épisode 1 : «Modèles multiples»

Robert était étudiant en géophysique et son projet comprenait une analyse sur ordinateur d'un enregistrement sismologique anormal. Son tuteur lui présenta deux modèles sismologiques. Dans le premier entretien, on comprend que Robert pensait que le but de son projet était de prouver laquelle des deux théories était correcte. Cependant, au cours du second entretien, Robert décrit un événement qui eut un impact important sur son projet :

«Je lisais quelques notes dans un livre et il était dit qu'il existait une publication sur les vagues superficielles et on y faisait état de sortes de "vagues guidées". J'ai pensé que je devais jeter un coup d'oeil à cela et juste voir (...) Cette publication a changé complètement mon projet. Cela m'a semblé un peu étrange et j'ai essayé de mettre les choses au clair.»

(deuxième entretien)

En réalité, la publication présentait un troisième modèle qui pouvait rendre compte des données qu'il devait estimer. Il fut troublé par cette prolifération de modèles. Dans le dernier entretien, les réflexions générales de Robert sur la nature de la science révèle l'influence de sa découverte des modèles multiples :

«Souvent vous voyez qu'il existe toujours déjà au moins 2 ou 3 théories pour expliquer un phénomène jusqu'à ce qu'il soit peut-être démontré expérimentalement. Mais même alors, les gens peuvent encore modifier leurs théories (...) c'est typique de la géophysique, cela semble une science moins exacte que d'autres comme la physique.»

(troisième entretien)

La lecture d'articles de recherche se retrouve dans tout projet de recherche de dernière année. Le but de cette lecture est de développer la compréhension des étudiants du savoir scientifique et des découvertes de la recherche dans le domaine de leur projet. L'épisode ci-dessus montre que Robert a reçu des messages explicites sur les vagues guidées et les vagues de surface mais aussi des messages implicites provenant des publications qu'il a lues. Ces dernières lui ont permis de développer sa

compréhension de la nature de la connaissance scientifique. Les entretiens avec le tuteur de Robert ont confirmé que cet étudiant avait lu beaucoup d'articles de recherche et que l'article qu'il avait mentionné dans son entretien avait effectivement eu une profonde influence sur le projet. Grâce à cette lecture, Robert avait acquis une connaissance plus approfondie du rôle de la construction de modèles dans les sciences de la Terre, en particulier l'idée que les modèles ne naissent pas spontanément de l'analyse de phénomènes mais nécessite une implication créative de la part du chercheur. C'est pourquoi, bien souvent, plus d'un modèle peut être légitimement utilisé pour expliquer le même phénomène.

L'épisode 2 («Vidéo de l'apoptose») donne un autre exemple de l'apprentissage d'un étudiant sur les pratiques effectives de la science comme résultat de messages implicites.

Épisode 2 : «Vidéo de l'apoptose»

À deux moments, dans son dernier entretien, Anita, une étudiante en génétique, fit mention de l'influence qu'eut une vidéo sur ses idées de la science.

«Il y a cette théorie vraiment très importante de l'apoptose. Voici peu, nous avons regardé une vidéo à ce sujet. Elle a comme sujet la mort des cellules. Il y a 20 ans ce scientifique avait annoncé l'existence de l'apoptose mais personne ne l'a cru. Récemment des scientifiques dans un tout autre travail de recherche avaient découvert des choses qu'ils ne pouvaient pas du tout expliquer saufs'ils suivaient l'hypothèse de l'apoptose. Ainsi 20 ans plus tard, ils durent l'accepter. Cela prend du temps, ils étaient sûrs d'eux quand ils disaient que cela ne pouvait pas se passer mais finalement ils ont dû l'admettre. Ceci montre comment les gens peuvent changer d'avis.»

(troisième entretien)

«Nous eûmes un séminaire sur l'apoptose. Je pense que c'était le Docteur Bojar, il montra la vidéo avant le séminaire comme cela nous pouvions comprendre de quoi il s'agissait. Elle donne beaucoup d'exemples de quelque chose qui était totalement oublié. Au moment où il présenta sa théorie, personne ne le crut. Il n'obtint aucun fonds et maintenant 20 ans après, tout cet intérêt a repris vie dans ce projet précis. Je pense que cela m'a vraiment influencée parce que j'ignorais cet aspect particulier.»

(troisième entretien)

En voyant une vidéo, à mi-parcours de son travail de projet, Anita réalisa comment les idées théoriques peuvent être admises ou rejetées dans le monde de la science. Dans l'épisode qui vient d'être décrit, elle parle

de l'importance, pour les scientifiques, d'accepter de nouvelles idées et note combien l'obtention des fonds influence le choix des problèmes scientifiques retenus par la recherche. Bien que nous n'ayons pas relevé de citations d'autres entretiens d'Anita, ces idées ne ressortaient pas avant.

La vidéo fut montrée au groupe d'étudiants des travaux dirigés comme préparation à l'écoute d'un séminaire de département sur l'apoptose, une théorie de la mort programmée des cellules. Bien que la vidéo ne fut pas montrée en tant que partie de son travail de projet, le fait qu'Anita la vit, alors qu'elle était engagée dans un travail de recherche, eut pour effet qu'elle put faire le lien entre les déclarations d'acceptation/rejet de la connaissance scientifique et ses propres expériences.

Les deux épisodes qui viennent d'être décrits soulignent l'importance des messages implicites dans le développement de la compréhension des étudiants. Ces messages implicites peuvent provenir des activités officielles du programme, comme c'est le cas pour la vidéo sur l'apoptose, ou plus simplement de discussions avec des professeurs. Les situations décrites dans les épisodes contrastent avec les situations d'enseignement et d'apprentissage formels et explicites qui caractérisent l'apprentissage, par les étudiants, des contenus et des méthodes de la science – cours magistraux, activités expérimentales et lectures de manuels. On peut en conclure que l'enseignement et l'apprentissage des pratiques effectives de la science nécessitent des approches nouvelles et distinctes. Les messages implicites et explicites sont tous deux importants et sont communiqués dans les contextes d'enseignement/apprentissage formels et informels.

6.3. Une introduction à la culture du travail scientifique

Nous avons montré que l'apprentissage des pratiques effectives de la science nécessite de communiquer aux étudiants des messages tant implicites qu'explicites. Nous avons aussi relevé que des messages implicites peuvent être efficacement transmis dans des contextes se rapportant à l'un des aspects de l'activité scientifique professionnelle, par exemple lors d'un travail de terrain ou au cours de la lecture d'articles de recherche. La valeur de ces contextes enseignement/apprentissage a été mise en lumière par ceux qui s'intéressent à la cognition située (par exemple : Brown et al., 1989 ; Hutchins, 1994). La cognition située reconnaît que beaucoup de connaissances (spécialement la connaissance tacite) sont spécifiques du contexte et ne peuvent être facilement représentées en dehors de la situation dans laquelle elles sont utilisées. Pour acquérir cette connaissance, l'apprenant doit être placé dans un milieu dans lequel cette connaissance est utilisée. Par exemple, les jeunes enfants acquièrent la capacité à utiliser le langage correctement s'ils sont placés parmi des experts du langage.

Jamais les règles de grammaire ne sont explicitement exposées à l'enfant. Selon la théorie de la cognition située, les étudiants peuvent parvenir à comprendre les pratiques effectives de la science en travaillant au milieu de scientifiques. Dans cette partie, nous examinerons à quel point le fait de plonger les étudiants en projet dans une culture du travail scientifique peut les aider dans leur apprentissage des pratiques effectives de la science.

L'épisode 3 («Vie dans le laboratoire») décrit les expériences d'un étudiant dont le travail de projet implique des interactions continues avec des scientifiques professionnels dans un laboratoire de recherche.

Épisode 3 : «Vie dans le laboratoire»

Le projet de Jane impliquait un travail expérimental en biochimie. Son tuteur était responsable d'un petit groupe de recherche comprenant des chercheurs professionnels, des étudiants en doctorat et des techniciens. Jane collabora à ce groupe de recherche tout au long de son projet. Dans son premier entretien, elle donnait ses premières impressions de la vie au laboratoire :

«J'aime travailler au laboratoire de toute façon (...) J'ai eu beaucoup de chance mais j'apprécie vraiment d'avoir des personnes à qui parler. Je ne peux dire à quel point c'est important (...) J'en retire des tas de choses. Le fait d'y être, d'utiliser de vraies techniques et faire partie du laboratoire (...) de ne pas paraître stupide parce qu'on pose des questions et de réaliser que c'est intégré. Vous n'êtes pas laissée seule à vous-même, vous faites partie d'un groupe.»

(premier entretien)

Dans le second entretien Jane méditait sur la pratique qu'elle a apprise au cours de son projet :

«[Mon tuteur] a dit des choses comme ceci : "Fais bouillir l'échantillon de protéine un peu plus longtemps ainsi tu n'auras pas autant à recueillir au sommet du gel" (...) C'étaient vraiment les ficelles du métier.»

(deuxième entretien)

À la fin du projet, Jane réfléchit à son expérience de laboratoire et à ce qu'elle en a retenu :

«Lorsque je regarde en arrière, je pense que ce projet m'a beaucoup apporté (...) je pense que ce que j'en ai appris ce sont les bases de la recherche en science, comment fonctionne un laboratoire (...) tout problème que vous avez, quelqu'un d'autre l'a eu avant vous. Vous n'êtes pas abandonné à vous-même et je pense que c'est très profitable.»

(troisième entretien)

Ces extraits d'entretiens de Jane font allusion à tout ce qu'elle a appris sur la nature de la recherche scientifique au cours de son projet. Par exemple, l'importance d'acquérir les «ficelles du métier» pendant que l'on suit un protocole expérimental n'apparaissait pas dans la discussion avec Jane lors de son premier entretien. Il ressort de la transcription complète de l'entretien que Jane a appris beaucoup de choses concernant la science en tant qu'activité sociale, par exemple sur la manière dont les techniciens, les étudiants en post-doctorat et les chercheurs professionnels travaillent ensemble dans un laboratoire. Jane a développé ces conceptions non seulement parce qu'elle a eu l'expérience de la vie en laboratoire mais aussi parce que son tuteur l'a encouragée à s'impliquer dans les activités du laboratoire. Ce qui permet de mesurer l'expérience de Jane, c'est de voir à quel point elle était capable de parler de science avec d'autres scientifiques. Le tuteur de Jane était bien conscient qu'elle avait besoin d'un guidage lors de son introduction au travail de ce laboratoire :

« Il y a toujours deux ou trois personnes chez qui l'étudiant peut aller - des sortes de chefs d'équipe si vous voulez (...) En fait, je vérifie dans quelle direction l'étudiant se dirige, quelles sortes de techniques ils utilisent, savent-ils comment aborder le travail ou ont-ils déjà des informations ? J'ai une hiérarchie peu structurée. J'organise vraiment comme quelqu'un organiserait une société. Cela marche très bien. »

Pendant son initiation "guidée" à la culture d'un laboratoire de bioscience, Jane a eu la chance de bénéficier de nombreuses occasions de développer sa connaissance de la pratique scientifique par les messages à la fois implicites et explicites.

La perspective de la cognition située, dont on a parlé, pourrait faire penser que l'étudiant apprend sur la science simplement en étant avec des scientifiques professionnels. Selon l'épisode ci-dessus, Jane aurait certainement acquis des connaissances à propos des pratiques effectives de la science par le seul fait de pouvoir entreprendre son projet. Cependant, elle put en apprendre beaucoup plus sur les pratiques effectives de la science parce que son tuteur voyait clairement ce qu'il souhaitait que Jane comprenne de la science pendant son travail de projet. Avec comme conséquence qu'il sut volontairement lui recommander, pour son projet, des activités propres à l'aider à comprendre en quoi consiste le travail d'un laboratoire de recherche en bioscience. Le fait d'immerger les étudiants dans une culture de la pratique scientifique leur donne accès à une connaissance des pratiques effectives de la science qu'ils pourraient difficilement acquérir autrement. Cependant nous ne pouvons faire l'hypothèse que les étudiants vont acquérir un savoir sur la science simplement par le fait d'être exposés à la pratique scientifique. Le rôle de l'enseignant garde toute sa place dans l'identification des savoirs à

communiquer à l'étudiant et dans leur mise à disposition aux étudiants. Ces savoirs doivent en effet être incorporés au programme de science à un niveau approprié aux capacités des étudiants – décrit ailleurs comme un processus de la «transposition didactique» (Tiberghien, 1996 ; Ogborn et al., 1996).

Même dans un département de sciences à l'université, axé spécialement sur la recherche, tous les projets d'étudiants ne peuvent déboucher sur une participation active à une grande communauté de recherche scientifique. L'épisode suivant illustre comment des étudiants peuvent apprendre ce qu'est la science simplement en expérimentant un aspect de la pratique scientifique professionnelle, reconstituée dans un contexte d'enseignement. Cet épisode montre aussi l'apprentissage des étudiants en recherche scientifique à l'extérieur du laboratoire. En fait, les activités quotidiennes de nombreux scientifiques professionnels supposent du travail dans un isolement relatif et bien des scientifiques ne travaillent jamais dans un environnement de laboratoire.

Épisode 4 : «Oeufs de dinosaure ?»

Kevin était un des 6 étudiants en science de la terre qui vécurent ensemble dans une caravane pendant les 6 semaines du travail de terrain. Kevin décrit comment ils interagissaient comme un groupe de collègues :

«Nous pouvions revenir [à la caravane] et dire : "Oh j'ai trouvé ce fossile. Quelqu'un a-t-il une idée de ce que cela peut être?" On donnait toutes nos idées (...) il y avait parfois de quoi s'étonner (...) on se faisait plein de taquineries à propos de la géologie (...) cela vous faisait voir les choses sous différents angles.»

(deuxième entretien)

Par la suite, l'entretien de Kevin raconte un exemple typique de ces «plaisanteries géologiques» :

«Nous pensions qu'il s'agissait d'oeufs de dinosaures car cela avait la forme d'un oeuf. Nous ne pouvions expliquer ce que c'était, nous n'en avons jamais vu avant et chacun donna son idée à ce sujet. Nous pensions que nous allions faire une publication à ce sujet et devenir millionnaires. Il se passa qu'un des gars en avait vu à une petite échelle et dit : "Oh ce sont des algues" (...) ce fut très animé [mais finalement] sans rancune nous avons accepté et abandonné l'idée de faire une publication.»

(deuxième entretien)

Dans cet épisode, les étudiants examinent des traces de vie, les présentent, défendent leurs idées personnelles et en fin de compte se

mettent d'accord sur l'interprétation la plus rationnelle. On peut dire que ces étudiants sont en train de s'approprier et d'évaluer un nouveau savoir. En termes de caractérisation des pratiques effectives de la science, ces étudiants sont en apprentissage de «*la science en action*» (Latour, 1987). Si on examine l'ensemble de l'entretien de Kevin, on voit que le travail de projet l'a ouvert à de nouvelles manières de percevoir comment le savoir en science peut être accepté. Dans le contexte plus large de l'entretien dans lequel cet épisode intervient, Kevin utilisait cet exemple de son travail de projet pour montrer comment le savoir se construit dans le monde scientifique. Cette petite reconstitution informelle de la pratique scientifique professionnelle a soutenu le développement de la compréhension de Kevin des pratiques effectives de la science.

7. LES IMPLICATIONS ÉDUCATIVES

Un choix décisif pour ceux qui essaient d'incorporer des aspects des pratiques effectives de la science dans le programme de licence est de savoir s'il faut développer des cours formels dont l'objectif principal est de développer les idées des étudiants dans ce domaine ou s'il vaut mieux se centrer sur une approche globale du programme dans lequel les occasions d'explorer les pratiques effectives de la science sont insérées dans une grande diversité de cours. Les cours formels peuvent se mêler à ceux qui s'adressent aux étudiants en sciences de toutes disciplines. Un exemple de ce genre de cours de science générique a été décrit par Giere (1991). D'autres cours formels peuvent être conçus à l'intérieur d'une discipline. Par exemple l'Open University a publié un module d'enseignement intitulé «Méthodes et consensus dans les sciences de la Terre» (Open University, 1976) qui décrit et discute des épisodes de l'histoire des sciences de la Terre. Bien que ces cours présentent aux étudiants les principaux points de vue et peuvent parfaitement s'intégrer à un programme conçu pour développer les pratiques effectives de la science, ils souffrent de deux défauts principaux.

D'abord, les pratiques effectives de la science varient considérablement entre et même à l'intérieur d'une discipline (Samarapungavan, 1992). Même si, superficiellement, il existe de larges convergences entre les travaux en sciences, les activités scientifiques précises des géologues, des biologistes moléculaires, des physiciens des particules et des physiciens de la matière condensée diffèrent grandement entre elles. Par exemple, le physicien théorique conçoit des modèles théoriques qui peuvent servir à expliquer des phénomènes observables et prédire des comportements sous diverses conditions ; les activités du chercheur en physique expérimentale, qui tend à établir avec une grande précision les valeurs

d'une constante fondamentale, sont très différentes. Même si les modèles théoriques restent importants, il cherchera à travailler avec des instruments extrêmement sensibles de manière à produire des données fiables atteignant le niveau de précision souhaité. Des cours formels arrivent difficilement à rendre compte, explicitement, des détails des pratiques effectives de la science hors de la culture de la pratique où elles sont implicitement représentées. Ce problème est cependant moins marqué dans des cours centrés sur une discipline, comme ceux de l'Open University.

Un second problème rencontré, avec des cours explicites sur les pratiques effectives de la science, est qu'ils ne garantissent en rien que les étudiants pourront utiliser les connaissances des pratiques effectives de la science développées explicitement dans une situation pour les appliquer dans une autre situation. Samarapungavan (1992) a montré que ce que les scientifiques déclarent explicitement à propos de leurs activités scientifiques peut n'avoir que de faibles relations avec leurs propres activités en tant que chercheurs professionnels. De plus, nous avons vu que les messages implicites du programme ont un impact majeur sur les idées qu'ont les étudiants des pratiques scientifiques. Même lors de cours explicites, ces messages implicites peuvent avoir de l'influence sur les activités effectives des étudiants pendant les cours et au-delà. Nous voudrions proposer d'essayer d'accroître les occasions données aux étudiants de développer leurs idées des pratiques effectives de la science, à travers l'ensemble du programme de licence plutôt que, seulement, à l'intérieur de modules isolés, centrés explicitement sur les pratiques effectives de la science.

En donnant des exemples tirés d'une étude des expériences des étudiants en travail de projet de dernière année pour illustrer notre point de vue, nous ne souhaitons pas laisser entendre que ce travail de projet est l'unique contexte d'enseignement dans lequel les connaissances des étudiants à propos des pratiques effectives de la science, peuvent se développer. En fait, ce travail de projet met peu en jeu deux facettes, au moins, des pratiques de la science professionnelle. D'abord, la recherche académique expérimentée par les étudiants dans cette étude constitue seulement un côté de la pratique scientifique contemporaine. Comme souligné par Ziman (1995), une culture scientifique "post-académique" prend de l'importance – particulièrement dans la recherche et le développement scientifique commercial mais aussi à l'intérieur de la science universitaire. Ziman montre que le travail scientifique devient de plus en plus orienté vers la production, avec des décisions prises par les entreprises et les institutions gouvernementales qui le subventionnent. Les scientifiques contemporains ne peuvent être perçus comme «*les chercheurs solitaires de la vérité*» (p. 5, op.cit.). Pour introduire ces aspects nouveaux de la pratique contemporaine de la science dans le programme de licence,

il convient d'organiser des visites de centres de recherche commerciale, de laboratoires de développement, des centres de recherche interdisciplinaire, de présenter des séminaires animés par des hommes et femmes de science de l'industrie et de chercher des stages pour étudiants en dehors de l'université.

De plus, la signification des facteurs sociologiques en science n'est, elle-même, que partiellement présente dans les épisodes relatés dans cet article. Par exemple, l'épisode « Vie dans le laboratoire » montrait l'importance de l'interaction avec d'autres scientifiques dans le développement de la prise de conscience des « ficelles du métier » d'usage courant dans les biosciences expérimentales. Cependant, en plus de la sociologie interne à la science, il existe aussi une sociologie externe de la science, centrée sur les influences qu'ont les pratiques effectives de la science sur les vies de ceux qui ne sont pas directement impliqués par la science (Aikenhead & Ryan, 1992). Par exemple, les progrès de l'ingénierie génétique ont provoqué une inquiétude générale quant à l'éventualité d'un dépistage génétique obligatoire, – les résultats de l'information génétique devenant accessibles aux compagnies d'assurances – mais ils ont, par là-même, engendré la fonction nouvelle de « conseiller en matière génétique ». Ces problèmes ne sont pas abordés dans cette étude. Cependant il paraît capital de comprendre comment les pratiques effectives de la science modifient les vies de ceux qui sont en-dehors de la science. Ce problème doit être abordé par les étudiants qui vont travailler dans un domaine lié aux sciences (par exemple : enseignants, journalistes, responsables de la santé). Il faut constater que les initiatives, dans l'organisation des programmes, pour développer chez les étudiants une compréhension des interactions entre science et société ne cessent de se multiplier au cours de ces dernières années (Turney, 1994).

Nous avons illustré la perspective proposée dans cet article en utilisant une étude des expériences des projets de fin d'études. Cependant, il existe d'autres occasions, à d'autres moments de la licence, de développer la compréhension des pratiques effectives de la science. Les exemples suivants sont tirés d'activités pédagogiques, pratiquées par les départements en science de l'université de Leeds, qui tentent de reconstituer une activité scientifique dans un contexte d'enseignement. Elles servent d'introduction guidée à l'un des aspects des pratiques effectives de la science. Certaines de ces activités ont fait l'objet d'une étude de recherche, mais les conclusions doivent encore en être publiées. Un point clé de l'appréhension de la nature de la recherche en science est de comprendre la structure et les objectifs des articles de la recherche en science et de savoir comment évaluer la qualité du travail présenté. Une partie des travaux dirigés est consacrée à demander aux étudiants de choisir et lire une publication de recherche en

science et de présenter un condensé des idées principales à leurs condisciples. Dans ce travail dirigé, le professeur concerné peut décrire explicitement aux étudiants la structure d'une publication scientifique et le but de chacune de ses parties (résumé, introduction, discussion). De même, au cours d'une séance, on peut présenter aux étudiants des données expérimentales, demander d'en faire une première interprétation personnelle pour la retravailler ensuite avec d'autres étudiants et arriver à un accord sur l'interprétation (ou à une discussion bien argumentée sur ce pourquoi ils sont ou non d'accord). Très différent du travail en laboratoire d'enseignement où on se centre davantage sur la maîtrise des techniques expérimentales et la collecte des données, ces travaux dirigés donnent l'occasion aux étudiants de se focaliser sur l'interprétation de données et sur les diverses explications. Ainsi les étudiants peuvent se former aux relations entre les éléments du savoir scientifique et les données expérimentales dans leur discipline. Comme dernier exemple, on peut proposer aux étudiants d'écrire une demande de subsides à une importante institution afin de soutenir le domaine de recherche de leur travail de projet. À nouveau cette activité met en scène une reconstitution de la science professionnelle, initiant les étudiants aux moyens utilisés par les scientifiques pour trouver des fonds nécessaires au démarrage de leur travail, et aux influences des institutions accordant les bourses sur les domaines valorisés dans la recherche – aspects clés des influences sociales et institutionnelles sur l'activité scientifique professionnelle.

CONCLUSION

Dans cet article, nous nous sommes centrés sur l'apprentissage de l'étudiant des pratiques effectives de la science. Bien que les projets de recherche des dernières années ne constituent pas le seul contexte dans lequel les étudiants peuvent développer leur compréhension des pratiques effectives de la science, ces projets offrent à l'étudiant l'occasion par excellence de s'insérer dans une activité scientifique pendant une longue période. D'ailleurs le principal objectif du travail de projet, comme l'ont exprimé les professeurs concernés, est d'introduire les étudiants au monde de la science professionnelle. Bien sûr, les étudiants retiendront sans aucun doute quelque chose des pratiques effectives de la science rien que par le fait de travailler parmi des scientifiques dans l'exercice de leur métier. Mais si les départements en science souhaitent donner une efficacité maximale aux projets en réalisant ces objectifs, alors les professeurs doivent jouer un rôle important en identifiant et rendant explicites les aspects de leur propre pratique de la science, aspects qu'ils souhaitent communiquer aux étudiants. Ceci n'est pas une tâche aisée, en particulier

parce qu'une grande partie de l'expertise du scientifique professionnel relève de la connaissance tacite. Après avoir identifié et s'être rendu explicites les facettes des pratiques effectives de la science, les professeurs doivent communiquer leurs conceptions à leurs étudiants. Nous avons montré que, bien que les messages explicites sur la science occupent une grande place, il ne faut pas négliger les messages implicites du programme, dont beaucoup ne sont pas intentionnels, mais qui peuvent avoir un effet important sur la compréhension, par les étudiants, des pratiques effectives de la science.

BIBLIOGRAPHIE

- AIKENHEAD G.S. & RYAN A.G. (1992). The development of a new instrument : «Views on Science, Technology, Society». *Science Education*, vol. 76, n° 5, pp. 477-491.
- AMERICAN ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF SCIENCE (1990). *Science for all Americans*. Oxford, Oxford University Press.
- BRICKHOUSE N. (1990). Teachers' beliefs about the nature of science and their relationship to classroom practice. *Journal of Teacher Education*, may-june, vol. 41, n° 3, pp. 53-62.
- BROWN J.S., COLLINS A. & DUGUID P. (1989). Situated Cognition and the Culture of Learning. *Educational Researcher*, n° 18, pp. 32-42.
- CHALMERS A.F. (1982). *What is this thing called science ?* Milton Keynes, Open University Press.
- DRIVER R., LEACH J.T., MILLAR R. & SCOTT P. (1996). *Young People's Images of Science*. Buckingham, Open University Press.
- FLEMING R. (1998). Undergraduate science students' views on the relationship between Science, Technology and Society. *International Journal of Science Education*, vol. 10, n° 4, pp. 449-463.
- GIERE R. N. (1991). *Understanding Scientific Reasoning 3rd Edition*. Fort Worth, Holt, Rinehart & Winston.
- HUTCHINS E. (1994). *Cognition in the Wild*. Cambridge, Massachusetts, MIT Press.
- LAROCHELLE M. & DESAUTELS N. (1991). 'Of course, it's just obvious' : Adolescents' ideas of scientific knowledge. *International Journal of Science Education*, vol. 16, pp. 175-190.
- LATOUR B. (1987). *Science in Action*. Cambridge, Harvard University Press.
- LEACH J., RYDER J. & DRIVER R. (1996). *ULISP Working Paper 2 : The Research Project Study : Design and methodology*. Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- LEDERMAN N. G. (1992). Students' and teachers' conceptions of the nature of science : A review of the research. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 29, n° 4, pp. 331-359.
- MATTHEWS M. R. (1994). *Science teaching : The role of history and philosophy of science*. London, Routledge.
- MILLAR R. (1989). *Doing Science : Images of science in science education*. London, Falmer Press.
- OGBORN J., KRESS G., MARTINS I. & MCGILLICUDDY K. (1996). *Explaining Science in the Classroom*. Buckingham, Open University Press.

- OPEN UNIVERSITY (1976). *Methods and Consensus in the Earth Sciences* – Course notes.
- POLANYI M. (1967). *The Tacit Dimension*. London, Routledge and Kegan.
- ROTH W.M. & LUCAS K.B. (1997). From «Truth» to «Invented Reality» : A discourse analysis of high school physics students' talk about scientific knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 34, n° 2, pp. 145-179.
- RYDER J. & LEACH J. (1996). Learning what it means to be a biochemist : case study of a tutorial on Glycolysis. *Biochemical Education*, vol. 24, pp. 21-25.
- RYDER J., LEACH J., & DRIVER R. (1996). *ULISP Working Paper 3 : Final Year Projects in Undergraduate Science Courses*. Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- RYDER J., LEACH J., & DRIVER R. (1996b). *ULISP Working Paper 4 : Undergraduate Science Research Projects : The student Experience*. Leeds, Centre for Studies in Science and Mathematics Education, University of Leeds.
- RYDER J., LEACH J. & DRIVER R. (1997). *Undergraduate Science Students' Images of the Nature of Science*, Paper presented at the symposium «New perspectives on Conceptual Change in Science and Mathematics Learning», American Educational Research Association Annual Conference, Chicago, March 1997.
- SAMARAPUNGAVAN A. (1992). *Scientists' conceptions of science : a study of epistemic beliefs*. Paper presented at the AERA Annual Meeting San Francisco, April 1992.
- SÉRÉ M.-G., JOURNEAUX R. & LARCHER C. (1993). Learning the statistical analysis of measurement errors. *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 4, pp. 427-438.
- TIBERGHEN A. (1996). Construction of prototypical situations in teaching the concept of energy. In J. Welford, J. Osborne & P. Scott (Éds), *Research in Science Education in Europe : Current Issues and Themes*. London, Falmer Press, pp. 100-114.
- TURNER J. (1994). Teaching science communication : Courses, curricula, theory and practice. *Public Understanding of Science*, n° 3, pp. 435-443.
- VAN HEUVELEN A. (1991). Learning to think like a physicist : A review of research-based instructional strategies. *American Journal of Physics*, n° 59, pp. 891-897.
- ZIMAN J.M. (1995). *Of one mind : The collectivisation of science*. Woodbury, New York, American Institute of Physics Press.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient tous les professeurs et les étudiants des départements de biologie, biochimie et biologie moléculaire, des sciences de la Terre et de chimie à l'université de Leeds qui ont contribué au travail présenté ici.

Nous remercions également la contribution significative du feu professeur Rosalind Driver du King's College de Londres, pendant la première phase de ce travail.

Ce projet a été financé à la fois par les départements de sciences de la «School of Education» et de l'«Academic Development Fund» de l'université de Leeds.



**Analyse comparative
de la gestion du mesurage
en TP de DEUG à Orsay
(biologie, chimie et physique)**

**Practice and organisation of measuring
in experimental work during the first
two years at the Paris XI – Orsay
University : Comparative analysis in
biology, chemistry and physics**

Françoise FONDÈRE, Christiane PERNOT,

DidaScO, bâtiment 333, Université Paris XI
avenue G. Clémenceau
91405 Orsay cedex, France.

Christine RICHARD-MOLARD,

Département de biologie, bâtiment 336
Université Paris XI
avenue G. Clémenceau
91405 Orsay cedex, France.

«L'observation scientifique n'est pas une observation neutre, ni une observation complète mais au contraire, une observation utilisant une grille de lecture... L'observation neutre, face à l'objet, est une fiction».
(Fourez, 1992, p. 34)

Résumé

Ce travail présente la comparaison de pratiques d'enseignement expérimental au niveau du premier cycle universitaire, en biologie, chimie et physique à Orsay (Université Paris Sud, France). Cette comparaison est effectuée en décrivant les activités offertes aux étudiants. Nous proposons une lecture de ces activités traduisant l'intention didactique d'une formation à la démarche expérimentale. Nous décrivons et analysons comment cette interprétation peut amener les étudiants à effectuer la mise en relation des différents éléments du mesurage : protocole expérimental, appareillage, résultats de mesure, lois ou modèles, valeurs de référence. Nous précisons ainsi les activités intellectuelles et pratiques, et les compétences et savoirs en jeu dans cette mise en relation. Ceci permet de dégager les similitudes des pratiques d'enseignement expérimental et les particularités disciplinaires. L'interprétation proposée fait apparaître une potentialité intéressante des TP : l'enseignant peut placer l'étudiant dans une situation de mise en relation critique des éléments du mesurage, l'amenant à porter un jugement argumenté sur ses résultats.

Mots clés : *mesurage (pratiques et gestion du), démarche expérimentale, savoirs et compétences, jugement argumenté, particularités disciplinaires.*

Abstract

A comparison is made between the teaching practices in experimental work in biology, chemistry and physics, during the first two years of University (Université Paris XI, Orsay, France). In order to make this comparison, the activities proposed to students are described. We suggest an interpretation of these activities which represents the didactical intention of the training in the experimental process. We describe and analyse how this interpretation leads the students to link the different elements involved in measuring : experimental procedure, apparatus, results obtained, laws or models, reference values. In this way, the intellectual and practical activities, as well as the skills and knowledge required for this linkage can be identified. Consequently, the similarities in experimental teaching practices and the disciplinary particularities become apparent. The proposed interpretation reveals an interesting potential in labwork : the teacher's guidance can lead the students to relate in a critical way the elements involved in the measurement process, and to argue for their judgments on the results.

Key words : *measuring (practice and organisation), experimental process, skills and abilities, argued judgment, disciplinary particularities.*

Resumen

Este trabajo presenta la comparación de prácticas de enseñanza experimental al nivel del primer ciclo universitario, en biología, química y física en ORSAY ("Université Paris Sud", France). Dicha comparación se efectúa a través de la descripción de las actividades propuestas a los estudiantes. Proponemos una lectura de dichas actividades que traduce la intención didáctica de una capacitación al proceso experimental.

Describimos y analizamos cómo esta interpretación puede llevar a los estudiantes a establecer una relación entre los distintos elementos de medición protocolo experimental, aparatos, resultados de las medidas, leyes o modelos, valores de referencia. Precisamos, así, las actividades intelectuales y prácticas y las capacidades y conocimientos interrelacionados. Esto permite destacar prácticas de la enseñanza experimental y las particularidades de la disciplina. La interpretación propuesta revela una potencialidad interesante de las clases prácticas : el maestro puede poner al estudiante en una situación de crítica respecto a los elementos de la experiencia, llevándole a emitir un juicio argumentado sobre los resultados.

Palabras claves : medición (prácticas), proceso experimental, conocimientos y capacitación, juicio argumentado, particularidades de la disciplina.

1. INTRODUCTION

Les recherches en didactique concernant les travaux pratiques (TP) en premier cycle universitaire (première et deuxième années post-baccalauréat) se font selon différents axes : les objectifs, les tâches, la formation à la démarche expérimentale, etc.

Dans des recherches récentes, centrées sur la possibilité d'utiliser les TP pour une formation à la démarche expérimentale, les auteurs étudient de nouvelles formes de séances : situation-problème, modélisation, projet (Guillon, 1995 ; Pernot, 1993 ; Pinelli & Lefèvre, 1993). Dans ce même axe de recherche, il nous semble intéressant d'analyser les activités proposées dans des TP «classiques» de premier cycle universitaire et de faire émerger leurs potentialités de formation à la démarche expérimentale. Pour faire émerger ces potentialités, nous nous sommes particulièrement attachées à décrire les choix auxquels les étudiants sont confrontés et les critères de décision. Dans l'explicitation de cette intention didactique de formation à la démarche expérimentale, notre position rejoint celle de G. Fourez concernant les démarches scientifiques, selon laquelle «*l'occultation systématique des choix, des critères et des situations permettant l'activité scientifique risque d'entraîner la dépendance des apprenants, de même qu'une profonde perte de sens... perte de sens, dans la mesure où se trouvent cachés la finalité et le contexte de l'activité* » (Fourez, 1994, pp. 65-66).

Les TP analysés ont été mis en place depuis plusieurs années, pour plusieurs centaines d'étudiants, à l'université de Paris XI, Orsay, en biologie, chimie et physique. Dans toutes les séances étudiées, les étudiants réalisent des mesures, ce qui est le cas pour la majorité des TP dans les trois disciplines. De plus, dans ces séances, le protocole expérimental et l'appareillage sont, en grande partie, choisis par l'équipe enseignante et les étudiants confrontent leurs résultats expérimentaux à ceux attendus dans le cadre de lois et modèles qu'ils doivent connaître.

Ces TP «classiques» proposent donc aux étudiants un ensemble d'activités de mesurage. Le mesurage est défini de façon internationale (International Organization for Standardization, 1984) comme l'ensemble des opérations ayant pour but de déterminer la valeur d'une grandeur. Ceci correspond à un ensemble d'activités auxquelles un ingénieur, un technicien ou un chercheur consacre une grande partie de son temps : ces activités concernent la réalisation des mesures, leur gestion, ainsi que l'exploitation et l'interprétation des résultats. Dans les trois disciplines (biologie, chimie et physique), notre analyse des activités de mesurage s'étend aux savoirs et compétences auxquelles elles font appel. Nous mettons en évidence et caractérisons les mises en relation possibles des éléments du mesurage que sont le protocole expérimental et l'appareillage, les résultats de mesures, les lois et modèles, les valeurs de référence. Cette analyse pluridisciplinaire nous semble présenter plusieurs avantages : d'une part, elle oblige à mieux préciser le sens des activités de mesurage pour chaque discipline et permet ainsi de dégager les spécificités disciplinaires ; d'autre part, un enseignant, conscient des pratiques dans les autres disciplines, peut mieux situer, présenter et justifier sa propre pratique.

Les deux questions suivantes ont guidé notre étude :

– comment peuvent être mis en relation les différents éléments du mesurage ? Quels sont les compétences et savoirs en jeu dans cette mise en relation ?

– quelles similitudes et quelles particularités peut-on mettre en évidence dans les pratiques d'enseignement expérimental et dans le traitement des résultats de mesure pour les trois disciplines ?

Dans la lecture que nous proposons pour les activités des étudiants, dans les TP décrits, nous montrons que les différents éléments du mesurage peuvent ne pas être simplement juxtaposés, mais s'organiser en un réseau. Cette lecture traduit des intentions didactiques, dont la principale consiste en une initiation à porter un jugement argumenté sur le résultat du mesurage, ce qui se fait lors d'allers et retours entre les différents éléments du réseau.

2. MÉTHODOLOGIE

Les auteurs, maîtres de conférences confirmées respectivement en physique, chimie et biologie, ont toutes les trois participé à des innovations ou été à l'origine de modifications notables dans les cursus expérimentaux de leur discipline en DEUG (Diplôme d'Études Universitaires Générales) à l'université Paris XI (Fondère & Séré, 1997 ; Pernot, 1991 ; Richard-Molard, 1996). Les informations nécessaires à l'analyse des pratiques d'enseignement ont été recueillies au cours d'entretiens semi-directifs entre les trois auteurs et à partir de documents écrits, produits entre deux entretiens consécutifs. La durée des entretiens est d'environ trois heures par séance, à raison d'une séance ou deux par semaine, pendant un an, ce qui porte à cent cinquante heures environ le total des heures d'entretien. Tout au long de l'étude, un texte consensuel a été élaboré à la fin de chaque séance, permettant de synthétiser l'avancée du travail de description et d'analyse des pratiques et de préparer la séance suivante.

Notre méthodologie de recherche est du type inductivo-hypothético-déductif (de Ketele & Roegiers, 1993). Dans la première phase, exploratoire, nous recherchons des éléments descripteurs communs aux pratiques d'enseignement dans les trois disciplines. Pour cela, chacune des auteurs, experte dans sa discipline, questionnée par les deux autres chercheurs en didactique, décrit et explicite l'ensemble des activités proposées aux étudiants ; cette description et cette explication sont également effectuées par l'intermédiaire de documents de travail, produits par l'experte de la discipline. Une recherche commune de descripteurs pertinents par rapport aux objectifs de la recherche est alors entreprise. Puis, pour chaque discipline, les activités sont reformulées en utilisant les descripteurs sélectionnés. Une analyse synthétique et comparative effectuée en commun permet enfin de valider les descripteurs sélectionnés.

Une première tentative a été effectuée à partir d'éléments descripteurs tels que les grandeurs mesurées, les difficultés rencontrées au cours des mesures, les outils utilisés (calculs d'incertitude et outil statistique), le nombre de mesures effectuées, la conduite de l'exploitation des résultats de mesure. Ces éléments ont été présentés en relation avec les apprentissages en jeu (par exemple : l'apprentissage de l'observation correcte ou celui d'un jugement sur la pertinence des résultats). Cette première étude a permis de mettre en évidence les relations possibles entre les éléments du mesurage et de préciser les questions de recherche telles que nous les présentons dans l'introduction. Une seconde lecture des pratiques nous est alors apparue plus pertinente pour répondre à ces questions et pour décrire et caractériser les mises en relation possibles : celle prenant les activités proposées aux étudiants comme éléments descripteurs. Les étapes du

mesurage sont ainsi avantageusement décrites avec la même structure pour les trois disciplines.

Cette phase exploratoire de la recherche nous a conduites, à partir de la description des activités proposées aux étudiants, à analyser les possibilités de mises en relation des éléments du mesurage. Ceci nous a permis d'émettre l'hypothèse que, dans les trois disciplines, les activités proposées aux étudiants impliquent la nécessité d'effectuer et de gérer ces mises en relation.

Dans la phase suivante de validation de cette hypothèse, nous utilisons une méthodologie identique à celle de la phase exploratoire : entretiens, production de documents écrits, recherche commune d'un classement des mises en relation possibles suivie d'une analyse synthétique.

Par ailleurs, au cours de la phase exploratoire, l'experte de la discipline précise les savoir-faire et compétences en jeu dans les relations décrites. Une analyse synthétique commune de ces savoir-faire et compétences, à partir des entretiens et des documents de travail, permet de présenter ceux-ci en parallèle avec les mises en relation des éléments du mesurage.

L'ordre alphabétique entre les disciplines (biologie, chimie, physique) a été choisi pour présenter les informations et l'analyse, sauf cas particulier.

3. DESCRIPTION DES PRATIQUES DE MESURAGE EN RELATION AVEC LES SAVOIRS ET COMPÉTENCES EN JEU

Nous décrivons ci-dessous les activités intervenant dans les différentes étapes du mesurage, en les reliant aux savoirs et compétences à mettre en jeu. Nous avons fait le choix de ne pas trancher entre «savoirs» et «compétences», les deux termes nous semblant appropriés à notre étude.

Après avoir défini, en les caractérisant, les objets de mesure dans les trois disciplines, nous analysons les différentes étapes du mesurage qui amènent les étudiants à déterminer des grandeurs ou des caractéristiques : réalisation puis gestion et enfin exploitation et interprétation des mesures. Au cours de cette description, nous montrons les relations qui existent entre les éléments du mesurage, protocole et appareillage, mesures, valeurs de référence, lois et modèles. Une synthèse de l'analyse de ces relations est reprise au paragraphe quatre.

3.1. Que mesurent les étudiants ?

En biologie et en chimie, nous avons sélectionné les TP au cours desquels les étudiants sont particulièrement confrontés aux activités de mesurage : en biologie, la génétique et la microbiologie, en chimie, les dosages et la cinétique. En physique, les étudiants sont confrontés dans toutes les expériences à ce type d'activités ; nous avons choisi deux domaines, l'un étudié en première année de DEUG (l'optique), l'autre en deuxième année (l'électromagnétisme). Les expériences retenues présentent toutes les caractéristiques de TP «classiques» pour le niveau d'enseignement considéré ici.

3.1.1. En biologie

En **génétique**, les étudiants déterminent les caractéristiques génétiques de souches mutantes de drosophiles : nombre de gènes mutés pour chaque caractère morphologique étudié, liaison au sexe ou non et localisation chromosomique de ces gènes. Chaque étudiant, analysant un croisement particulier, observe les caractères morphologiques et le sexe des descendants de première génération issue de deux souches mutantes. Cette observation permet à l'étudiant de choisir, en référence aux lois de la génétique, une hypothèse concernant le nombre de gènes. Pour tester cette hypothèse, l'observation de la deuxième génération (croisement entre individus de première génération) est nécessaire. Elle permet de classer et de **dénombrer** les drosophiles selon leurs différentes caractéristiques morphologiques et le sexe, et de comparer ces résultats avec ceux attendus dans le cadre de l'hypothèse. Cette comparaison nécessite un calcul à partir de ces résultats (voir paragraphe 3.4.)

En **microbiologie**, les étudiants déterminent l'effet sur la croissance bactérienne de différents milieux de culture. La population de bactéries, vivantes et mortes, dans un échantillon, étant proportionnelle à la turbidité (dans le cadre de la loi de Beer-Lambert), c'est cette dernière qui est **mesurée** par spectrophotométrie en fonction du temps. La croissance bactérienne suit différentes phases dont la courbe représentative est une sigmoïde. Le temps de génération (temps de doublement de la population) est déterminé graphiquement à partir de la phase exponentielle de croissance. Par comparaison entre les résultats obtenus dans les différentes conditions de culture, les étudiants déduisent l'effet de ces conditions sur la croissance (voir paragraphe 3.4.) En parallèle, pour déterminer la concentration de bactéries vivantes, une autre expérience est réalisée : étalement de bactéries sur boîte après dilution et incubation pendant 24 heures à 37°C et **dénombrement** des clones bactériens. Ce dénombrement permet de

calculer la concentration de bactéries vivantes à deux instants de la phase exponentielle de croissance.

3.1.2. En chimie

En **chimie des dosages**, deux méthodes sont utilisées, la volumétrie et l'absorptiométrie. Par la méthode volumétrique, il s'agit de déterminer la concentration C_i de l'acide éthanoïque dans le vinaigre en provoquant la réaction avec une solution d'hydroxyde de sodium de concentration C_0 connue. Le dosage est réalisé en présence d'un indicateur coloré, et la concentration est calculée en écrivant la conservation de la quantité de matière qui conduit, dans ce cas, à la relation : $C_0 V_0 = C_i V_i$ (cas particulier où tous les coefficients stoechiométriques de l'équation de réaction sont égaux). Les volumes V_0 et V_i sont **mesurés**, la concentration C_i est calculée.

En absorptiométrie, il s'agit de déterminer le coefficient d'extinction molaire ε et la concentration C_{col} d'un colorant en solution. Pour déterminer ε , les étudiants **mesurent**, à l'aide d'un spectrophotomètre, l'absorbance A en fonction de la longueur d'onde λ pour un produit dont la concentration en colorant est connue. Le tracé de la courbe d'absorption $A = f(\lambda)$ permet de déterminer la longueur d'onde λ_m du maximum d'absorption et de calculer ε à λ_m en utilisant la loi de Beer-Lambert $A = \varepsilon \lambda C$. Pour déterminer C_{col} , les étudiants **mesurent** l'absorbance, à $\lambda = \lambda_m$, d'une série de solutions de concentrations données en colorant. Le tracé de la droite d'étalonnage $A = g(C)$ correspondante permet de **déterminer graphiquement** la valeur de C_{col} à partir de la mesure de l'absorbance de l'échantillon. De plus, la pente de cette droite permet de calculer à nouveau ε à $\lambda = \lambda_m$ (voir paragraphe 3.4.)

En **cinétique**, les étudiants **mesurent** l'absorbance, proportionnelle à la concentration en bleu de bromophénol, en fonction du temps t . Selon l'ordre de la réaction : 0, 1 ou 2, l'une ou l'autre des courbes $C = f(t)$ déterminée, $1/C = f(t)$ ou $\ln C = f(t)$ est une droite. La pente de la droite, choisie d'après un processus décrit au paragraphe 3.4., leur permet de calculer la constante de cinétique.

3.1.3. En physique

En **optique**, les étudiants déterminent des distances focales de lentilles minces et l'indice de réfraction du plexiglas.

Pour déterminer les distance focales, ils alignent et centrent les éléments du montage (lentille, écran, objet) sur un banc d'optique, puis règlent leurs positions afin d'obtenir une image nette ; ils **mesurent** alors les positions des éléments, ce qui leur permet de calculer la distance focale f dans le cadre du modèle de l'optique géométrique (voir paragraphe 3.4.)

Pour déterminer l'indice n du plexiglas, les étudiants **mesurent** l'angle de réfraction r d'un faisceau laser à l'intérieur du plexiglas, pour plusieurs valeurs de l'angle d'incidence i . Leurs résultats doivent s'accorder à la loi de Descartes $\sin i = n \sin r$. Le tracé de la droite représentant la variation de $\sin i$ en fonction de $\sin r$, leur permet de calculer n .

En **électromagnétisme**, les étudiants déterminent les caractéristiques et les propriétés d'une onde électromagnétique, telles que sa longueur d'onde λ dans l'air ou dans un guide d'ondes, sa direction de polarisation, sa diffraction par un diaphragme.

Pour la détermination de la longueur d'onde, les ventres et les noeuds de l'onde stationnaire sont repérés à l'aide d'un voltmètre dans le cas de la propagation dans l'air, à l'aide d'un oscilloscope dans le cas de la propagation dans un guide d'ondes. Les **mesures** des positions des ventres et des noeuds permettent de déterminer λ par le calcul (voir paragraphe 3.4.).

Pour déterminer la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants **observent la variation du signal** reçu par un millivoltmètre relié à une antenne plongée dans le champ électrique de l'onde. Ils savent que ce signal est maximum quand les directions de l'antenne et du champ sont parallèles ; ils **déduisent** donc la direction du champ de celle de l'antenne, quand le signal observé est maximal.

Lors de l'étude de la diffraction d'une onde lumineuse par un diaphragme, les étudiants enregistrent, à l'aide d'une table traçante, la courbe de l'intensité de la lumière diffractée en fonction de la position du point d'observation du phénomène de diffraction. La **mesure** sur cette courbe, des positions correspondant aux minima de l'intensité diffractée, permet de calculer les dimensions des diaphragmes (voir paragraphe 3.4.).

Dans les TP décrits ici dans les trois disciplines, il apparaît que, pour certains cas, une étape qualitative existe préalablement aux mesures : en génétique, la reconnaissance des différences morphologiques des drosophiles ; en microbiologie, l'identification de clones bactériens ; en chimie des dosages par volumétrie, l'appréciation du changement de couleur de la solution ; en optique, l'appréciation de la netteté d'une image.

3.2. Réalisation des mesures

Dans les TP de DEUG que nous analysons, les étudiants effectuent deux types d'**observation** : l'observation visuelle, qualitative, du système ou l'observation, quantitative, d'un signal traduisant l'état du système. Par ailleurs, la gestion correcte des activités pratiques demande aux étudiants de **mettre en oeuvre leur savoir-faire technique**. Nous décrivons les

savoirs et compétences nécessaires, ainsi que les relations entre les éléments du mesurage qui apparaissent au cours de cette étape.

3.2.1. En biologie

L'observation qualitative correcte, préalable au comptage, consiste, en génétique, à repérer avec finesse les différences entre les caractères des drosophiles étudiés et ceux des drosophiles d'une souche de référence (système-témoin), en n'omettant pas de noter, pour chaque individu, l'ensemble des caractères observés, ce qui est nécessaire pour l'interprétation ultérieure des résultats. En microbiologie, l'observation qualitative correcte consiste à repérer, lors de la détermination d'une concentration de bactéries vivantes, des clones bactériens individualisés (c'est-à-dire non groupés en amas) et à les différencier d'éventuels clones contaminants dont les caractéristiques macroscopiques sont différentes.

Il apparaît que, pour arriver à une observation qualitative correcte, les étudiants ont besoin, en génétique, d'un entraînement assez long et d'un guidage important de la part des enseignants ; en microbiologie, cet entraînement est plus rapide.

Par ailleurs, **les observations quantitative et qualitative** correctes nécessitent la **mise en oeuvre de savoir-faire techniques**. Ceci consiste pour les étudiants à savoir :

- choisir le matériel approprié. Un choix pertinent de la verrerie et du système de pipetage est nécessaire (microbiologie) ;

- appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage. En microbiologie, la lecture du résultat d'une mesure sur un spectrophotomètre implique de régler le zéro et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe, puis de contrôler régulièrement ce zéro sur un échantillon-témoin avant toute mesure de turbidité de la culture bactérienne ;

- choisir les conditions d'utilisation du matériel, en fonction des observations. En génétique, le choix du grossissement adéquat et le centrage de l'éclairage de la loupe sont nécessaires pour détecter de faibles différences des caractères des drosophiles ;

- modifier les conditions d'utilisation du matériel en fonction des observations. En microbiologie, les étudiants doivent penser à diluer la culture de bactéries si la turbidité dépasse la valeur maximale (indiquée par l'enseignant) au-delà de laquelle la loi de Beer-Lambert n'est plus applicable ;

- maîtriser les spécificités techniques d'une expérience. En génétique, si l'éthérisation des drosophiles est trop forte, les différences des caractères peuvent être difficiles à observer ; si elle est trop faible, les drosophiles se

réveillent avant la fin des observations. En microbiologie, pour que le dénombrement des clones bactériens soit possible, les étudiants doivent respecter les conditions de stérilité afin d'éviter des clones bactériens contaminants, et effectuer un étalement correct pour empêcher des amas. La mise en oeuvre de cette technique nécessite un entraînement important, guidé par l'enseignant.

Nous notons ainsi, qu'au cours de cette étape, il est possible de mettre en relation les résultats de mesures avec le protocole expérimental et l'appareillage. Cette mise en relation suppose un jugement critique et une éventuelle remise en cause des éléments. Par exemple, dans le cas de dénombrement de colonies bactériennes, la non-lisibilité des résultats, absence ou non-individualisation de colonies, entraîne la critique de la mise en oeuvre des savoir-faire techniques et du protocole. Dans le cas des mesures de turbidité, si la valeur dépasse la valeur limite, le protocole de dilution doit être revu. Pour la génétique, la relation entre les résultats de mesure d'une part, le protocole et l'appareillage d'autre part, est guidée par l'enseignant : ainsi, par exemple, la qualité de l'éthérisation des drosophiles peut être remise en cause.

3.2.2. En chimie

L'observation qualitative correcte consiste à évaluer avec finesse l'aspect d'un milieu réactionnel (couleur), souvent par comparaison avec un échantillon-témoin.

L'observation quantitative correcte consiste à déterminer les paramètres d'observation pertinents tels que l'intensité ou la forme d'un signal, et à juger si leur ordre de grandeur permet de les exploiter ou non : quand les étudiants déterminent la longueur d'onde correspondant à l'absorbance maximale d'une solution de colorant, ils recherchent le maximum et jugent s'il est acceptable ou non d'après son intensité. Quand les étudiants déterminent la concentration en colorant de la solution, ils mesurent l'intensité de l'absorbance et jugent si cette intensité est exploitable ou non (dans ces deux cas, c'est l'enseignant qui guide les étudiants dans ce jugement qui prend en compte les limites de détection de l'appareil et la limite de validité du modèle).

Il faut noter qu'en chimie, la forte sensibilité du milieu réactionnel aux conditions externes implique que les étudiants observent les caractéristiques du milieu extérieur (luminosité, température, quantité de dioxyde de carbone, etc.) et en tiennent compte dans l'exploitation des mesures.

Par ailleurs, pour les étudiants, la **mise en oeuvre de leur savoir-faire technique** consiste à savoir :

– choisir le matériel approprié. Un choix pertinent de la verrerie et du système de pipetage est nécessaire ; un mauvais choix de l'indicateur coloré conduit à des résultats inexploitable en acidimétrie ;

– appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage. La lecture du résultat d'une mesure sur un appareil gradué implique de régler le zéro des appareils et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe (spectrophotomètre, burette) ; le zéro du spectrophotomètre doit être régulièrement contrôlé sur un échantillon-témoin avant toute mesure d'absorption d'une solution colorée. On note aussi l'importance de la propreté de la verrerie, qui doit être rincée préalablement avec le solvant ou la solution ;

– modifier les conditions d'utilisation du matériel en fonction des observations. Les étudiants doivent penser à vérifier que la solution la plus concentrée de la gamme-étalon a une absorbance inférieure à l'absorbance maximale mesurable ;

– maîtriser les spécificités techniques d'une expérience. Les étudiants doivent contrôler la bonne qualité des produits utilisés (un produit oxydé ou hydraté conduit à des résultats erronés).

Les relations possibles entre les éléments du mesurage au cours de cette étape de réalisation des mesures sont celles qui existent

– entre une loi et le protocole expérimental et l'appareillage ; par exemple, en chimie des dosages, les étudiants élaborent un protocole en choisissant la verrerie appropriée au dosage à effectuer ; ils utilisent pour cela la loi de conservation de la masse,

– entre les résultats de mesure et le protocole et l'appareillage ; par exemple, une mesure d'absorbance supérieure à la valeur de saturation d'un spectrophotomètre remet en cause les conditions d'utilisation de l'appareil ou le protocole. D'autre part, le jugement porté sur le protocole et l'appareillage permet d'accepter ou de rejeter les résultats des mesures ; par exemple, l'utilisation d'une pièce de verrerie de précision insuffisante entraîne le rejet de la mesure.

3.2.3. En physique

L'observation qualitative correcte consiste, en optique, à évaluer avec finesse la netteté d'une image.

L'observation **quantitative** correcte consiste à déterminer les paramètres d'observation pertinents, tels que l'intensité ou la forme d'un signal, et à juger si leur ordre de grandeur permet de les exploiter ou non. Par exemple, quand les étudiants déterminent la direction de polarisation d'une

onde électromagnétique, ils observent l'évolution du signal électrique avec l'orientation d'une antenne réceptrice. Les étudiants comparent ainsi entre eux les signaux correspondant à différentes orientations de l'antenne et jugent si le maximum obtenu est exploitable ou non d'après son intensité.

Par ailleurs, pour les étudiants, la **mise en oeuvre de leur savoir-faire technique** consiste à savoir :

– appliquer le mode d'emploi d'un appareil ou le mode opératoire d'un appareillage : la lecture du résultat d'une mesure sur un appareil gradué implique de régler le zéro des appareils et de chercher à éviter les erreurs de parallaxe (banc d'optique et tout appareil avec graduations). En ce qui concerne le mode opératoire d'un appareillage, il s'agit, en optique, d'aligner et centrer soigneusement chacun des éléments posés sur le banc pour obtenir l'image d'un objet ;

– modifier les conditions d'utilisation du matériel, en fonction des observations : pour la lecture d'un résultat sur un appareil sophistiqué, par exemple un microampèremètre, l'étudiant doit savoir choisir le calibre, puis l'échelle sur laquelle doit se faire la lecture (TP de caractérisation d'une onde électromagnétique) ;

– maîtriser les spécificités techniques d'une expérience : d'une façon générale, le savoir-faire technique est lié à l'application du mode d'emploi d'un appareil ou du mode opératoire d'un appareillage. Par exemple, pour étudier la diffraction d'une onde électromagnétique lumineuse, les étudiants ont à leur disposition un appareillage complexe dont ils doivent maîtriser les nombreux paramètres afin d'obtenir un enregistrement correct de la courbe de diffraction : vitesses de défilement du papier de l'enregistreur et de déplacement du récepteur, distance de l'objet diffractant au récepteur, coefficient d'amplification du signal etc.

Nous mettons en évidence la relation entre les lois et le protocole et l'appareillage : dans l'exemple, cité ci-dessus, de la détermination de la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants connaissent les lois régissant le fonctionnement de l'antenne réceptrice soumise au champ électrique de l'onde et celui du voltmètre récepteur ; ils utilisent ces lois pour effectuer et interpréter les mesures permettant de déterminer les grandeurs inconnues.

Dans le cas de l'optique, nous mettons en évidence la relation entre le protocole et l'appareillage et le modèle de l'optique géométrique : les étudiants connaissent ce modèle et doivent apprécier l'adéquation des conditions expérimentales aux conditions d'application de ce modèle ; par exemple, ce modèle ne s'applique que si les rayons lumineux sont paraxiaux et peu inclinés sur l'axe.

La relation entre les résultats de mesure et le protocole et l'appareillage apparaît aussi : pour l'exemple de la diffraction d'une onde lumineuse, l'obtention d'un enregistrement «correct» implique un choix pertinent des valeurs des paramètres de l'expérience, et donc un regard critique porté à la fois sur les conditions d'utilisation de l'appareillage, sur le protocole et sur les résultats des mesures.

En conclusion de ce paragraphe, il apparaît que l'initiation à une observation correcte en DEUG consiste en plusieurs étapes : préalablement à toute observation, le choix du paramètre pertinent ; l'observation simultanée du système étudié et du système témoin ou l'observation de l'évolution du système ; le jugement, après observation, sur la qualité de l'observation.

La qualité de l'observation est liée au savoir-faire technique : seul un savoir-faire performant peut produire les conditions optimales de l'observation, pour une évaluation fine de la différence de caractères morphologiques de drosophiles ou de clones bactériens (contaminants ou non), d'un changement de couleur, de la netteté d'une image. Par exemple, en optique, la netteté globale d'une image dépend de la qualité du montage (alignement et centrage des éléments) ; un étudiant qui modifie la position des éléments sur le banc améliore la netteté de l'image, mais si le montage n'est pas centré, cette netteté ne sera que partielle. Les étudiants sont donc amenés à gérer l'interactivité qui existe entre la qualité de l'observation et la maîtrise du savoir-faire.

Le schéma 1 présente, pour les trois disciplines, les relations que nous avons mises en évidence entre les éléments du mesurage. Pour ne pas alourdir la présentation de ce schéma (et des schémas suivants), l'élément «protocole expérimental et appareillage» sera systématiquement noté «PEA».

BIOLOGIE		Mesures ↔ PEA
CHIMIE	Dosages : loi de conservation de la masse →	Mesures ↔ PEA
	cinétique :	Mesures ↔ PEA
PHYSIQUE	Lois, modèles →	Mesures ↔ PEA

Schéma 1 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape de réalisation des mesures

Les éléments sont reliés par des flèches à sens unique ou à double sens : le sens de la flèche indique l'élément éventuellement remis en question au cours de la mise en relation. Par exemple, en chimie des dosages, l'utilisation de la loi de conservation de la masse permet de choisir le protocole et l'appareillage avant la manipulation, et/ou d'en justifier la mise

en oeuvre après celle-ci (d'où la flèche à sens unique entre l'élément loi et l'élément protocole expérimental et appareillage).

Nous constatons sur ce schéma que, pour tous les TP proposés ici, une double flèche relie l'élément mesures à l'élément protocole expérimental et appareillage. Il y a donc ici une remise en question des deux éléments mis en relation. Ceci traduit la possibilité d'allers et retours entre ces deux éléments, ces allers et retours étant guidés par le jugement critique porté sur chacun d'eux. Nous constatons que, pour la chimie des dosages et pour tous les exemples de la physique, un modèle ou une loi interviennent dans le choix ou la remise en cause des conditions de l'expérimentation.

3.3. Gestion des mesures

Nous parlons de gestion des mesures quand il y a plusieurs mesures d'une même grandeur.

Tout expérimentateur sait que, pour éviter les difficultés d'estimation des incertitudes liées à une mesure unique, pour augmenter la précision du résultat et pour contrôler l'absence d'erreur importante de calcul ou de manipulation, il est souhaitable de faire plusieurs mesures.

Nous allons montrer comment, dans les TP de DEUG proposés à Orsay, l'étudiant est conduit, d'une part, à réfléchir sur le nombre de mesures à effectuer et, d'autre part, à apprendre à gérer l'ensemble de ces mesures. Cette réflexion est à relier à la prise en compte des contraintes de l'expérience. La gestion consiste en l'observation et le traitement de la dispersion des mesures, ce qui permet de déterminer la valeur à retenir pour la grandeur étudiée.

Qu'en est-il dans la pratique pour les trois disciplines ?

Précisons que les étudiants sont groupés par deux et que de sept à douze binômes travaillent sur le même sujet.

3.3.1. En biologie

En génétique, les étudiants effectuent des classements et des comptages sur plusieurs échantillons d'une population de drosophiles issues d'un même croisement (individus de deuxième génération). Étant donné que le protocole expérimental est délicat à mettre en oeuvre pour des étudiants débutants et afin qu'ils ne passent pas trop de temps au comptage, les enseignants leur indiquent une taille d'échantillon qui tient compte des contraintes ; cette taille d'échantillon doit, en particulier, être suffisante pour permettre l'interprétation des résultats. En effet, à un effectif de taille trop

faible, correspondraient des fluctuations aléatoires très grandes et cet effectif ne serait pas représentatif de la population étudiée ; on aurait donc, dans ce cas, une perte d'information génétique. Les étudiants analysent de quatre à six échantillons d'une vingtaine d'individus chacun (taille d'échantillon conseillée) ; les résultats sont cumulés, puis exploités grâce à l'outil statistique (voir paragraphe 3.4.)

En TP de microbiologie, chaque binôme étudie la croissance bactérienne dans un milieu de culture donné et réalise une seule mesure de turbidité à différents instants de la croissance (la répétition des mesures entraînerait la consommation d'une trop grande quantité de milieu stérile).

Parallèlement, pour déterminer la concentration en bactéries vivantes, chaque binôme dispose des résultats de quatre dénombrements. En effet, étant donné que la dilution «adéquate» (entre 60 et 100 colonies par boîte) n'est définie qu'approximativement, elle est encadrée par deux autres dilutions s'en approchant – les dilutions sont indiquées par l'enseignant–. Deux dénombrements sont effectués à partir de la dilution «adéquate» et un seul pour chacune des dilutions l'encadrant. La répétition du dénombrement à partir de la dilution «adéquate» permet de tenir compte de la variation aléatoire du nombre de bactéries dans des échantillons de même volume. En raison des contraintes matérielles, cette répétition n'est pas réalisée pour les autres dilutions. Les étudiants ont à juger la cohérence des résultats obtenus pour ces quatre dénombrements (proportionnalité entre les dilutions et les dénombrements) et à décider de garder ou non ces résultats pour en faire la moyenne. En cas d'incohérence des résultats, les étudiants ne peuvent recommencer, car il faut vingt-quatre heures pour qu'une bactérie étalée donne un clone bactérien visible à l'oeil nu. Ils réfléchissent alors sur les conditions de leur mesurage : l'incohérence des résultats entraîne la critique sur les savoir-faire techniques et le protocole utilisés, et éventuellement le rejet de certains dénombrements.

En génétique et en microbiologie, la relation entre les éléments du mesurage se fait donc au cours de cette étape de gestion des mesures, entre l'élément mesures et l'élément protocole et appareillage.

3.3.2. En chimie

En TP de chimie de DEUG, il existe de nombreuses causes expérimentales pouvant conduire à de mauvaises mesures par manque de savoir-faire et il existe des contraintes de temps telles qu'on ne peut envisager de répéter plus de trois ou quatre fois un dosage. L'estimation classique de l'incertitude permet de délimiter un intervalle «raisonnable» de différence entre deux mesures. Si cette différence est supérieure à l'incertitude,

on considère qu'il y a probablement une erreur de manipulation et on recommence le dosage.

Dans l'exemple du dosage de l'acide éthanoïque par l'hydroxyde de sodium, les étudiants, au cours d'un premier essai, notent le changement de couleur de la solution pour un volume V_1 d'hydroxyde de sodium, déterminé classiquement à ΔV_1 près. Ils font un deuxième essai et notent V_2 et ΔV_2 . En général, les valeurs de V_1 et V_2 ne sont pas rigoureusement égales et les essais peuvent ne pas être concordants, c'est-à-dire qu'une des valeurs peut ne pas être incluse dans l'intervalle d'incertitude obtenu pour l'autre valeur. Un troisième essai est alors effectué, et éventuellement un quatrième, jusqu'à ce que les résultats concordent, c'est-à-dire que l'écart entre les valeurs mesurées soit inférieur à l'incertitude estimée. Les essais pour lesquels les résultats concordent sont alors conservés, et le volume retenu est obtenu en prenant la moyenne des résultats concordants. Au cours de cette étape, chaque binôme d'étudiants juge la cohérence interne de ses résultats.

De plus, une étude de la dispersion des résultats de tous les étudiants en permet une analyse globale : vérification que la plupart des résultats ne diffèrent entre eux que d'une valeur inférieure à l'incertitude classique, détermination de la valeur à retenir parce que la plus probable, remise en cause des résultats jugés trop éloignés de la valeur la plus probable. Au cours de cette étape, chaque binôme d'étudiants juge la cohérence entre ses résultats et ceux des autres étudiants de son groupe.

On peut ainsi conclure que, comme pour la biologie, de nombreuses contraintes interviennent pour limiter le nombre de mesures : temps nécessaire pour effectuer le dosage, nombre important d'opérations délicates à contrôler. La répétition des mesures par un binôme d'étudiants est donc arrêtée quand les résultats concordent. Par contre, pour décider de la valeur à retenir, les résultats de l'ensemble des binômes sont regroupés et une valeur unique est extraite de leur comparaison.

Cependant, dans la manipulation de DEUG concernant la détermination d'une constante de cinétique, chaque binôme d'étudiants a le temps de calculer plusieurs valeurs (au moins 4) de cette constante. Le traitement des résultats est alors effectué en utilisant l'outil statistique sur les résultats d'un binôme et sur les résultats du groupe, d'une façon similaire à celle décrite ci-dessous pour la physique.

Pour mettre à profit la grande similarité de la gestion de l'ensemble des mesures entre les exemples proposés pour la chimie et la physique, nous traitons la mise en relation des éléments du mesurage à la fin du paragraphe suivant.

3.3.3. En physique

Couramment, les étudiants effectuent une mesure, recherchent toutes les causes d'incertitude et estiment cette incertitude, afin de juger de la précision de leurs mesures (incertitudes de lecture, d'étalonnage, dues à la méthode utilisée, à l'expérimentateur ou à l'appareil). On peut donc, et c'est souvent le cas, se contenter de faire une seule mesure.

Cependant, pour les TP de DEUG, les problèmes de la durée et/ou du coût de la répétition des expériences se posent en physique de façon beaucoup moins cruciale qu'en biologie et en chimie : au cours de séances de durée raisonnable, on peut faire de 5 à 10 mesures de distance focale, de même que des mesures d'indice de réfraction, de résistances, de longueurs d'onde, car les grandeurs nécessaires à ces déterminations sont obtenues rapidement.

Pour utiliser la possibilité de multiplier les mesures indépendantes d'une même grandeur, une innovation a été mise en place récemment (Séré et al., 1993 ; Séré & Journeaux, 1995). Elle concerne, en particulier, les déterminations de distances focales et d'indice de réfraction. Cette innovation est basée sur le fait que tout résultat de mesure est porteur d'information et que l'échantillon constitué par l'ensemble des mesures suit une distribution se rapprochant de la distribution de Gauss (normale) si le nombre de mesures est suffisamment grand. Augmenter le nombre de mesures constitue un apport d'informations supplémentaires et permet d'accroître la précision du résultat en diminuant l'intervalle de confiance pour un taux de confiance donné. On doit, par conséquent, conserver tous les résultats, et la dispersion de ces résultats permet, en appliquant les lois de la statistique, de déterminer par le calcul la valeur qui représente au mieux l'ensemble des résultats.

Ainsi, en ce qui concerne les exemples en optique, deux pratiques sont utilisées : soit une seule mesure est effectuée et le calcul d'incertitude qui prend en compte toutes les causes d'erreur possibles est mené pour permettre l'appréciation du résultat du mesurage ; soit, pour contourner les difficultés de recherche et d'estimation des incertitudes et améliorer la précision du résultat, plusieurs mesures sont effectuées et un calcul statistique est mené. Dans les deux cas, toute mesure dont le résultat n'est pas visiblement aberrant est exploitée.

Dans le cas où plusieurs mesures sont effectuées, les étudiants, dans une première étape, calculent l'intervalle de confiance pour un taux de confiance donné ainsi que l'écart-type ; dans une deuxième étape, grâce à un logiciel de traitement de données, ils cumulent leurs résultats et ceux des autres étudiants sur un histogramme visualisé sur l'écran d'un ordinateur. Il s'agit donc, pour eux, de savoir utiliser un outil de traitement statistique de données, et de mettre en relation des grandeurs mathématiques et leur

signification physique. Les étudiants peuvent juger ensuite la qualité des résultats : dans une première étape, ils jugent la cohérence interne de leurs propres résultats ; dans une deuxième étape, celle de leurs résultats avec ceux de l'ensemble du groupe : ceci se fait en comparant l'écart-type obtenu pour les valeurs du groupe entier à la différence entre leur valeur moyenne et la valeur la plus probable. Ils peuvent enfin juger la qualité de la valeur finale retenue pour l'ensemble du groupe.

Examinons, en ce qui concerne la chimie et la physique, les relations entre les éléments du mesurage, apparaissant au cours de cette étape de gestion de l'ensemble des mesures. Quand une seule mesure est effectuée, les étudiants font un calcul d'incertitude et pour cela, portent un regard critique à la fois sur le protocole expérimental et l'appareillage employés, et sur le résultat obtenu, ce qui suppose à nouveau, comme au paragraphe 3.2., des allers et retours entre ces deux éléments du mesurage. Quand plusieurs mesures sont effectuées et un traitement statistique mis en oeuvre, les étudiants apprécient la cohérence interne de leurs résultats et la cohérence de ceux-ci avec les résultats des autres étudiants du groupe, ce qui les amène à porter un jugement sur le protocole et l'appareillage utilisés.

Au cours de l'étape de gestion de l'ensemble des mesures, les relations entre les éléments du mesurage peuvent être représentées par le schéma 2 ci-dessous pour les trois disciplines.

BIOLOGIE	PEA \longleftrightarrow mesures
CHIMIE	PEA \longleftrightarrow mesures
PHYSIQUE	PEA \longleftrightarrow mesures

Schéma 2 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape de gestion des mesures

Nous constatons sur ce schéma que, comme sur le schéma 1 correspondant à la réalisation des mesures, une double flèche relie l'élément mesures à l'élément protocole expérimental et appareillage (PEA), pour les trois disciplines. Le jugement critique porté sur les mesures entraîne un jugement sur le protocole et l'appareillage, et un jugement sur le protocole et l'appareillage ne se fait que par l'intermédiaire des mesures. Il faut remarquer cependant qu'en biologie, à cause des contraintes techniques, la remise en question de l'un ou l'autre des éléments ne se fait qu'à l'aide d'un guidage important de l'enseignant.

À la différence du schéma 1, nous constatons en chimie et en physique, l'absence de l'élément lois et modèles. Ceci traduit le fait que, au cours de cette étape de gestion d'un ensemble de mesures répétées dans les trois disciplines, ce sont surtout les savoir-faire techniques qui sont en jeu.

3.4. Exploitation et interprétation des résultats

3.4.1. En biologie

En génétique, les étudiants choisissent, en fonction des résultats d'observation de drosophiles d'une première génération, une hypothèse issue des lois de la génétique. Ils exploitent alors les résultats de dénombrements de drosophiles de deuxième génération dans le cadre de cette hypothèse. Pour cela, ils comparent leurs dénombrements aux effectifs attendus. L'hypothèse est validée ou rejetée grâce au test statistique du Chi-deux, avec un taux de risque de 5 %. Dans le cas où l'hypothèse est rejetée, les mêmes résultats servent à en tester une autre.

En microbiologie, l'analyse de la dispersion des mesures de turbidité par rapport à la courbe attendue (sigmoïde) permet un jugement sur la qualité de l'expérimentation. Cette analyse est effectuée en fin de cinétique ; ce n'est qu'ensuite, que les valeurs aberrantes sont repérées et éliminées après une discussion sur les causes possibles des écarts observés (comme par exemple des mesures sur une culture mal homogénéisée). Une relation peut se faire entre l'élément mesures et l'élément protocole et appareillage, par l'intermédiaire de la courbe attendue. Les étudiants exploitent les mesures de turbidité grâce à l'utilisation de la loi de cinétique du premier ordre : $\ln N = \mu t + \ln N_0$ (N = concentration de bactéries vivantes et mortes, $N_0 = N$ à $t = 0$, t = temps, μ = taux de croissance bactérien). L'exploitation des résultats de mesures en coordonnées semi-logarithmiques permet de déterminer graphiquement, dans la phase exponentielle de la croissance, le temps de génération (temps de doublement de la population). En parallèle, les résultats des dénombrements permettent de déterminer la concentration n , par ml, de bactéries vivantes. Celle-ci est calculée en moyennant les concentrations n_i obtenues pour chaque dilution à partir de la formule suivante : $n_i = x_i (1/d) \cdot (1/v)$ où x_i est la moyenne des dénombrements pour la i ème dilution ; d est la dilution (en puissances négatives de 10) ; v est le volume de la culture étalé (en ml). Chaque binôme compare, dans différentes conditions de milieu, les caractéristiques analysées (les différentes phases et leur durée, le temps de génération, la concentration de bactéries vivantes). Les élèves en déduisent l'effet de la composition du milieu sur ces caractéristiques et interprètent leurs résultats grâce aux connaissances acquises en cours.

Lors de l'étape d'exploitation des résultats de mesure, les relations entre les éléments sont les suivantes : en ce qui concerne la génétique, une relation à sens unique de l'élément «mesures» vers l'élément «hypothèse» ; en ce qui concerne la turbidité, une relation entre l'élément «loi» (courbe attendue, loi de cinétique du premier ordre), avec une flèche à sens unique vers les mesures ; cette remise en cause des résultats de mesures implique

celle du protocole et de l'appareillage utilisés. En ce qui concerne les dénombrements, l'interprétation utilise une relation mathématique indépendante des éléments du mesurage.

3.4.2. En chimie

En chimie des dosages, on utilise (à partir de la loi de conservation de la masse) la relation permettant de déterminer la concentration C_i d'une solution d'acide éthanoïque dans le vinaigre, soit $C_i = C_0 V_0 / V_i$ (voir paragraphe 3.1.2.) Les étudiants comparent l'écart entre la valeur obtenue et une valeur de référence, et discutent cet écart par rapport à l'incertitude estimée (voir paragraphe 3.3.)

En spectrophotométrie d'absorption, les étudiants déterminent la longueur d'onde correspondant à l'absorbance maximale du colorant en exploitant la courbe donnant l'absorbance en fonction de la longueur d'onde pour une concentration connue (voir paragraphe 3.1.2.) ; ils utilisent ensuite la loi de Beer-Lambert $A = \epsilon l C$, pour déterminer ϵ par la mesure de l'absorbance. Les mesures de l'absorbance en fonction de la concentration permettent de tracer la droite $A = g(C)$: les étudiants valident la gamme-étalon par comparaison entre les absorbances mesurées et celles attendues théoriquement, puis déterminent graphiquement, à partir de la valeur de la pente, le coefficient d'extinction molaire ϵ de la substance colorée étudiée. Cette valeur, comparée à celle tabulée, leur permet d'apprécier la qualité de cette mesure. La loi de Beer-Lambert, exploitée à travers la droite d'étalonnage, permet une détermination graphique de la concentration inconnue de l'échantillon de colorant à partir de la mesure de son absorbance. Cette concentration est comparée à la valeur de référence, fournie par des tables, le fabricant ou l'enseignant, et l'écart est discuté en référence à l'incertitude expérimentale.

Dans le cas de l'étude de cinétiques de réactions, les mesures d'absorbance en fonction du temps permettent de choisir entre plusieurs lois de cinétique. Les étudiants confrontent les résultats de leurs mesures aux différentes lois de cinétique et tranchent en faveur de l'une d'elles. Ce choix fixe l'ordre de la réaction, puis l'exploitation graphique des mesures à travers la loi retenue permet de calculer la constante de cinétique. Si la dispersion des points est telle qu'elle empêche un choix clair, les étudiants sont amenés à remettre en cause à la fois les mesures effectuées et le protocole et l'appareillage utilisés.

Les relations entre les éléments du mesurage au cours de cette étape d'exploitation des résultats sont les suivantes : pour les dosages, une relation apparaît entre la loi de conservation de la masse et les mesures mais sans qu'on puisse relier ces deux éléments par une flèche à sens unique ou

à double sens puisque aucun des deux éléments n'est remis en question. Il en est de même quand, en absorptiométrie, la loi de Beer-Lambert est utilisée pour déterminer ε d'un colorant de concentration connue. Par contre, quand la courbe d'étalonnage est utilisée pour déterminer ε et la concentration, la relation entre la loi de Beer-Lambert et les mesures implique une éventuelle remise en question des mesures et donc une flèche à sens unique vers cet élément. En ce qui concerne la cinétique, une relation à double sens s'établit entre les lois et les mesures.

3.4.3. En physique

En ce qui concerne la physique, chacun peut constater l'importance des entités abstraites et théoriques : dans le cadre de théories acceptées, les scientifiques ont construit des modèles et établi des lois. Les étudiants ne peuvent exploiter et interpréter leurs résultats expérimentaux que par l'intermédiaire de ces lois et modèles. Ils doivent comprendre que *«une expérience de physique est l'observation précise d'un groupe de phénomènes accompagnée de l'interprétation de ces phénomènes ; cette interprétation substitue aux données concrètes réellement recueillies par l'observation des représentations abstraites et symboliques qui leur correspondent en vertu des théories admises par l'observateur»* (Duhem, 1989, pp. 221-222). Il est ainsi nécessaire que les étudiants établissent le rapport entre d'une part, les phénomènes constatés et traduits par les grandeurs mesurées, et, d'autre part, les grandeurs inconnues qui rendent compte de ces phénomènes. Ils accèdent à ces grandeurs par l'intermédiaire d'un modèle. Par exemple, pour déterminer la direction de polarisation d'une onde électromagnétique, les étudiants analysent la variation du signal aux bornes d'une antenne linéaire recevant cette onde, variation qui dépend de la direction de cette antenne (voir paragraphe 3.2.3.) En s'appuyant sur un modèle et des lois utilisés en électromagnétisme, cette analyse permet de conclure sur la direction de polarisation ; il faut donc que les étudiants connaissent ce modèle et ces lois pour savoir relier la variation du signal observé et la direction du champ électrique.

Dans le cadre du modèle de l'optique géométrique, on établit la formule permettant de déterminer la distance focale f' d'une lentille par la méthode de Bessel, soit $f' = (D^2 - a^2) / 4D$ (D est la distance entre l'objet et l'écran, a est celle entre les deux positions de la lentille pour lesquelles l'image est nette sur l'écran). L'exploitation des résultats de mesures à travers cette relation permet aux étudiants de déterminer la distance focale. Les étudiants comparent l'écart entre la valeur obtenue et une valeur de référence donnée par le fabricant ou l'enseignant, et discutent cet écart par rapport à l'incertitude estimée (voir paragraphe 3.3.)

Pour déterminer l'indice de réfraction n du plexiglas, les étudiants utilisent la loi de Descartes $\sin i = n \sin r$. Cette loi entre à la fois dans la théorie de l'électromagnétisme et dans le modèle de l'optique géométrique. Les étudiants comparent les résultats des mesures à ceux attendus dans le cadre de la loi ; l'étude de la dispersion des points expérimentaux conduit à une éventuelle remise en cause des résultats des mesures. Une détermination graphique de l'indice (n) est alors effectuée par le calcul de la pente de la droite. La valeur obtenue est comparée à une valeur de référence, ce qui permet aux étudiants d'apprécier les qualités de la mesure (précision et exactitude).

En électromagnétisme, les connaissances théoriques nécessaires sont les suivantes : structure de l'onde plane progressive, de l'onde stationnaire et de l'onde guidée, phénomène de diffraction à l'infini par des diaphragmes rectangulaires. Pour déterminer la longueur d'onde d'une onde électromagnétique (centimétrique), les abscisses x_{N_n} des noeuds et x_{V_n} des ventres de l'onde stationnaire (n est le numéro du ventre ou du noeud mesuré) conduisent au calcul de λ : $\lambda = 2 (x_{N_n} - x_{N_{n-1}})$ ou $\lambda = 2 (x_{V_n} - x_{V_{n-1}})$.

La direction de polarisation d'une onde plane progressive électromagnétique est déterminée par l'intermédiaire d'une antenne linéaire (voir paragraphe 3.2).

La loi de Fraunhofer permet d'étudier la diffraction d'une onde électromagnétique lumineuse par un diaphragme constitué d'une fente étroite (sa largeur l vaut quelques dizaines de micromètres). Cette loi $I(\theta)$ fournit l'intensité diffractée dans la direction d'observation θ , repérée à partir de la direction de propagation de l'onde arrivant sur le diaphragme :

$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(\Phi/2)}{(\Phi/2)} \right)^2$ avec $\Phi = \pi l \sin\theta / \lambda$, où λ est la longueur d'onde et I_0 l'intensité maximum correspondant à $\theta = 0$. Les minima de la courbe $I(\theta)$ correspondent à des directions d'observation telles que $\sin\theta = n\lambda/l$. Les étudiants repèrent sur l'enregistrement de la courbe $I(\theta)$ les valeurs de θ correspondant à ces minima et en déduisent l .

En ce qui concerne les TP décrits, les modèles et les lois sont imposés ; la comparaison, entre les résultats des mesures et ceux attendus dans le cadre des lois, permet de discuter le domaine d'utilisation des lois et la qualité des mesures. La nécessité de fournir un jugement argumenté sur la qualité des résultats de mesure devrait inciter les étudiants à résister à la tentation d'«arranger» leurs résultats. L'éventuelle non-concordance entre leurs résultats et ceux prévus doit être considérée comme révélatrice d'un mesurage mal conduit ou d'un incident technique. Cette remarque s'applique aussi en chimie.

Ainsi, au cours de cette étape d'exploitation et d'interprétation, il existe en physique une relation entre une loi (ou une relation tirée d'une loi) et les

résultats de mesure. Dans certains cas, pour la détermination de l'indice de réfraction et pour l'étude de la diffraction, la relation entre les lois et les mesures suppose une remise en question éventuelle des mesures. Dans d'autres cas, par exemple pour la détermination de la distance focale et de la polarisation, cette relation est une simple application de la loi sans remise en question des mesures.

En conclusion du paragraphe 3.4., le schéma 3 présente, pour les trois disciplines, les relations mises en évidence au cours de cette étape d'exploitation des mesures. Nous illustrons la relation entre deux éléments du mesurage sans remise en cause de ceux-ci par un trait sans flèche : —.

BIOLOGIE	génétique	loi ←— mesures ↔ PEA
	microbiologie	loi —→ mesures ↔ PEA
CHIMIE	Dosages	loi —— mesures ↔ PEA
	Absorptiométrie	loi —— mesures ↔ PEA
		ou loi —→ mesures ↔ PEA
	cinétique	loi ↔— mesures ↔ PEA
PHYSIQUE		
	Polarisation	
	Longueur d'onde	loi —— mesures ↔ PEA
	Distance focale	
	Indice de réfraction	
	Diffraction	loi —→ mesures ↔ PEA

Schéma 3 : Relations entre les éléments du mesurage au cours de l'étape d'exploitation et d'interprétation des résultats

Dans les cas de la génétique et de la cinétique chimique, la flèche orientée vers l'élément loi indique que les étudiants doivent choisir une loi parmi plusieurs possibles : ce choix passe éventuellement par un rejet préalable des lois testées qui ne conviennent pas pour les faits expérimentaux analysés, mais ne passe pas par une remise en cause de ces lois.

Pour ne pas alourdir ce schéma, nous n'avons pas fait figurer ici la remise en cause éventuelle des résultats de mesures (et donc du protocole et de l'appareillage associés), par l'intermédiaire des valeurs de référence. Cette relation est présentée plus loin sur le schéma 4 de synthèse. Les valeurs de référence sont très souvent disponibles auprès des enseignants en chimie (concentration, coefficient d'extinction molaire, constante de cinétique) et en physique (distance focale, indice de réfraction, longueur d'onde, direction de polarisation, dimensions des objets diffractants). En ce qui concerne la biologie, l'objectif principal n'est pas de rechercher la

meilleure qualité possible des mesures, en termes de précision et d'exactitude, mais d'obtenir un accord jugé suffisant entre les valeurs mesurées et celles attendues dans le cadre d'une hypothèse ou d'une loi.

4. SYNTHÈSE DES RELATIONS ENTRE LES ÉLÉMENTS DU MESURAGE

Le schéma 4 présente les relations, telles que nous les avons analysées, entre les éléments du mesurage au cours des différentes étapes. Rappelons que l'étape 1 est celle de la réalisation des mesures, l'étape 2 celle de la gestion de l'ensemble des mesures, et l'étape 3 celle de l'exploitation des mesures et de l'interprétation des résultats.

mesures	BIOLOGIE	CHIMIE	PHYSIQUE
réalisation	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA	Loi → mesures ↔ PEA
gestion	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA	mesures ↔ PEA
exploita tion	Loi ← mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA	Loi — mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA Loi ↔ mesures ↔ PEA Valeur de référence → mesures ↔ PEA	Loi — mesures ↔ PEA Loi → mesures ↔ PEA Valeur de référence → mesures ↔ PEA

Schéma 4 : Relations entre les éléments du mesurage au cours des trois étapes

Ce schéma fait apparaître, pour ces TP, dans les trois disciplines et pour les trois étapes, une double flèche entre l'élément «mesures» et l'élément «protocole expérimental/appareillage». Rappelons la signification de cette double flèche : dans le sens protocole expérimental et appareillage vers mesures, elle signifie, pour l'étudiant, la remise en cause éventuelle de ses mesures après un jugement sur celles-ci et donc sur son savoir-faire technique (voir paragraphe 3.2.) ; dans le sens mesures vers protocole expérimental et appareillage, elle signifie la remise en cause éventuelle du protocole et de l'appareillage utilisés, après un jugement argumenté sur les performances de ceux-ci, en lien avec le savoir-faire technique (voir paragraphe 3.3.)

Dans les trois disciplines, quelle que soit l'étape, les mesures ne remettent pas en cause les lois ; en génétique et en cinétique chimique, il y a un choix à effectuer entre plusieurs hypothèses ou lois, mais sans remise

en cause de celles-ci. La mise en relation des mesures, avec les lois et avec les valeurs de référence, devrait permettre à l'étudiant de situer son savoir-faire technique et les performances de l'appareillage.

Les résultats obtenus ici mettent en lumière une intention didactique possible pour l'enseignement expérimental, celle «*d'apprendre un art que les scientifiques et les technologues ont développé d'une manière spécifique : celui de la négociation*» (Fourez, 1994, pp. 65-66). En effet, dans le schéma 4, cette négociation est traduite par la présence de flèches simples ou doubles : l'étudiant qui remet en cause un ou plusieurs éléments du mesurage cherche un compromis entre l'«économie manipuloire» (temps, produits et matériel utilisés, etc.) et la qualité du résultat.

5. SAVOIRS ET COMPÉTENCES EN JEU

5.1. Au cours de la mise en relation du PEA avec les mesures

Nous avons montré comment l'étudiant, dans les trois disciplines, est amené à porter un jugement sur la cohérence interne de ses résultats et à apprécier les performances de l'appareillage et du protocole utilisés (PEA), ainsi que son savoir-faire technique (paragraphes 3.2. et 3.3.) Dans les trois disciplines, l'étudiant peut ainsi prendre conscience qu'il existe une relation entre les performances d'un protocole et/ou d'un appareillage et la qualité des mesures. Ceci lui permet de porter un **jugement global sur les performances d'un appareillage et sur ses propres capacités à l'utiliser** ; ce jugement peut conduire à une remise en cause du protocole, de l'appareillage et de l'utilisation qui en est faite.

5.2. Au cours de la mise en relation du PEA et des mesures avec les lois et modèles

En physique, pour les TP décrits ici, le modèle théorique et les lois permettant l'exploitation des résultats sont imposés. Les étudiants doivent donc **les connaître**. Ils doivent mettre en oeuvre leurs **capacités d'observation** et leur **savoir-faire technique** pour **vérifier** les conditions d'adéquation de l'appareillage et du protocole expérimental au modèle de référence.

En chimie des dosages, pour **prévoir** les quantités de produits, la dilution et/ou l'indicateur adéquats, les étudiants doivent utiliser la loi de conservation de la matière. Ceci leur permet de **justifier le choix** du protocole et du matériel adaptés au dosage.

Ainsi, dans les deux disciplines, les étudiants doivent mettre en oeuvre leur **savoir-faire technique** et **connaître les lois et modèles** ; cela leur permet de remettre en cause éventuellement le protocole utilisé ; ils sont ainsi amenés à **porter un jugement fondé** sur le protocole expérimental et l'appareillage choisis.

Au cours de l'exploitation des résultats, les étudiants confrontent les résultats des mesures à des valeurs prévues par les lois. Ils comparent les écarts obtenus aux incertitudes sur les valeurs mesurées (qui dépendent du protocole expérimental). Pour comparer ces écarts, ils **mettent en oeuvre un calcul d'incertitude** ou **utilisent l'outil statistique**. Cet outil sert à quantifier la dispersion des résultats expérimentaux et à en estimer la précision. Ils **analysent** ensuite de façon critique la différence entre les écarts et les incertitudes. Dans le cas de la génétique, **l'outil statistique** sert à exploiter les résultats des dénombrements par comparaison avec les valeurs attendues dans le cadre d'une hypothèse (voir paragraphe 3.4.)

Dans les pratiques que nous avons décrites, un désaccord entre les résultats observés et les résultats attendus dans le cadre d'une loi ou d'un modèle ne remet pas en cause cette loi, ce dont les étudiants sont conscients. C'est seulement grâce à la **connaissance préalable de la loi** que l'accord résultats de mesure/modèle peut être discuté. Prenons comme exemples la loi de Descartes en physique, la loi de Beer-Lambert en chimie des dosages, la loi de cinétique du premier ordre en microbiologie. Les étudiants exploitent les résultats expérimentaux à l'aide de ces lois et modèles dont ils ont validé le domaine d'utilisation. Ils sont ainsi amenés à **porter un jugement** sur la qualité des mesures, qualité qui dépend du savoir-faire de l'expérimentateur et du protocole utilisé.

5.3. Au cours de la mise en relation du PEA et des mesures avec les valeurs de référence

En chimie et en physique, quand les étudiants comparent les résultats de leurs mesures aux valeurs de référence (fournies par un fabricant ou par l'enseignant), les écarts sont analysés de la même façon que ci-dessus (paragraphe 5.2.) : ces écarts sont comparés aux incertitudes sur les valeurs mesurées. Les étudiants sont amenés à **mettre en oeuvre un calcul d'incertitude** ou à **utiliser l'outil statistique**. Ils **analysent** ensuite de façon critique la différence entre les écarts et les incertitudes sur les valeurs mesurées et **portent un jugement** sur la qualité des mesures.

Dans notre description des pratiques, nous avons largement montré l'importance accordée à l'acquisition d'un **savoir-faire technique**. En effet, à chaque remise en cause d'un élément du mesurage, ce savoir-faire

intervient. Nous avons montré également que cette acquisition est indissociable de celle d'un **jugement fondé** sur la qualité du mesurage effectué. Ce jugement exige la mise en oeuvre de critères, ce qui conduit à des activités intellectuelles spécifiques liées à des capacités à développer au même titre que les habiletés manipulatoires. Ces capacités apparaissent au cours de l'analyse précédente : analyser des causes d'incertitude et quantifier ces incertitudes, prévoir, justifier un choix, analyser de façon critique des différences, apprécier l'adéquation des conditions expérimentales à un modèle.

6. CONCLUSION

À partir des activités proposées aux étudiants pour des TP «classiques» de DEUG, en biologie, chimie et physique à Orsay, l'analyse des mises en relation des éléments du mesurage a conduit à proposer une lecture particulière de l'ensemble des activités expérimentales. Celle-ci permet de considérer cet ensemble comme une gestion complexe et non linéaire des éléments du mesurage. Malgré les objets d'étude offerts aux étudiants et les techniques, différents dans les trois disciplines, il apparaît que la même interprétation peut être utilisée.

En décrivant les activités proposées au cours de ces TP, nous montrons que la gestion des éléments du mesurage est liée à la mise en oeuvre de savoirs et de compétences d'ordre à la fois pratique et intellectuel. La prise en compte des relations entre les éléments du mesurage, telle que nous la décrivons, permet de considérer les TP comme un ensemble interactif d'activités manuelles et intellectuelles. Un enseignement expérimental, utilisant au maximum les mises en relation entre les éléments du mesurage, pourrait ainsi être un cadre formateur à l'apprentissage de la démarche expérimentale, en guidant l'étudiant à la fois dans l'acquisition de savoir-faire techniques et dans la formation de son jugement et de son argumentation.

Notre étude pluridisciplinaire permet de préciser le sens que peuvent prendre les activités de mesurage proposées par les enseignants, en rapport avec un contexte, des choix et une finalité, éventuellement différents selon les disciplines. Cette prise de sens nécessite alors, de la part des étudiants, l'exercice d'un jugement argumenté sur les résultats du mesurage à chaque étape de celui-ci. Les spécificités disciplinaires mises en évidence portent en particulier sur les critères utilisés lors de l'exercice de ce jugement.

Notre travail sera prolongé en analysant dans quelle mesure une telle interprétation des activités expérimentales est utilisée par les enseignants

sur le terrain. L'étude des activités réelles des étudiants et de leurs productions écrites devrait permettre de valider cette interprétation. L'évaluation du travail de l'étudiant porterait alors, non seulement sur le résultat obtenu, mais également sur la qualité du travail expérimental effectué. En effet, un étudiant placé dans ce contexte devrait produire des comptes rendus témoignant de sa capacité à porter un jugement sur la qualité des résultats qu'il a obtenus. Ceci devrait permettre d'échapper à une évaluation réductrice souvent déplorée : « dans de nombreuses universités, les compétences pratiques sont évaluées seulement à partir des résultats fournis (comptes rendus) et sans aucun regard sur la qualité du travail expérimental. » (Meester & Maskill, 1995, p. 713).

BIBLIOGRAPHIE

- DE KETELE J.-M. & ROEGIERS X. (1993). *Méthodologie du recueil d'informations*. Bruxelles, De Boeck.
- DUHEM P. (1989). *La théorie physique, son objet, sa structure*. Paris, Vrin.
- FONDÈRE F. & SÉRÉ M.-G. (1997). An innovative sequence of laboratory work to teach data processing. À paraître dans *Ensenanza de las Ciencias*, vol. 15, n° 3, pp. 423-429.
- FOUREZ G. (1992). *La construction des sciences*. Bruxelles, De Boeck.
- FOUREZ G. (1994). *Alphabétisation scientifique et technique*. Bruxelles, De Boeck-Wesmael.
- GUILLON A. (1995). Démarches scientifiques en Travaux Pratiques de physique de DEUG à l'Université de Cergy-Pontoise. *Didaskalia*, n° 7, pp.103-116.
- I.S.O., O.I.M.L., I.E.C. & B.I.P.M. (1984). *Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*. International Organization for Standardization.
- MEESTER M.A.M., MASKILL H. & MASKILL R. (1995). First year chemistry practicals at universities in England and Wales : aims and scientific level of the experiments. *International Journal of Science Education*, vol. 17, n° 6, pp.705-719.
- PERNOT C. (1991). Apprentissage et évaluation dans des modules indépendants de chimie expérimentale. *Séminaire international «Evaluation Enseignement Expérimental»*, Pau.
- PERNOT C. (1993). Une gestion de l'apprentissage de la chimie expérimentale en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 2, pp. 101-119.
- PINELLI P. & LEFÈVRE R. (1993). «Etudiants-chercheurs» : une proposition en Electrocinétique. *Aster*, n° 17, pp. 65-87.
- RICHARD-MOLARD C. (1996). L'introduction des didacticiels « génétique » dans l'enseignement de Premier Cycle Universitaire : conditions d'utilisation, résultats d'observations et d'enquêtes. *Didaskalia*, n° 8, pp. 159-178.
- SÉRÉ M.-G., JOURNEAUX R. & LARCHER C. (1993). Learning the statistical analysis of measurement errors . *International Journal of Science Education*, vol. 15, n° 4, pp. 427-438.
- SÉRÉ M.-G. et JOURNEAUX R. (1995). Le traitement statistique des mesures en TP de physique de DEUG : une innovation à Orsay. *Didaskalia*, n° 6, pp.165-177.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Claudine Larcher, professeur à l'Institut National de la Recherche Pédagogique à Paris, pour ses conseils judicieux au cours de ce travail.



**Représentation des élèves
de l'école primaire
sur les changements des systèmes
physico-chimiques :
système de classification**

**Representations of primary school pupils
on the chemical systems :
A system of classification**

Vassilia HATZINIKITA

Université d'Égée
Département de Pédagogie
1, avenue de Dimocratias
85100 Rhodes, Grèce.

Vassilis KOULAÏDIS

Université de Patras
Département de Pédagogie
Panepistimioupoli Rio
26110 Patras, Grèce.

Résumé

Le but de cet article est d'étudier la manière dont les élèves âgés de 10 à 12 ans se représentent les changements de la matière. Les résultats permettent de construire

– un système de classification des catégories de changements telles qu'elles sont comprises par les élèves (changements dans la forme, l'arrangement, la constitution et la localisation des constituants du système ; changements macroscopiques, changements microscopiques) ;

– une grille conceptuelle qui met en relation les catégories des changements citées ci-dessus avec l'état physique des constituants du système et les facteurs sociaux (par exemple : familiarité, intention).

Mots clés : *changements de la matière, représentations, système de classification, école primaire.*

Abstract

The aim of this article is to study the way pupils 10 - 12 years old represent changes of matter. The results permit us to construct :

– a classification of categories of material changes as understood by pupils (changes in form, arrangement, location and construction of the systems' constituents ; macroscopic changes, microscopic changes) ;

– a conceptual grid which relates the above categories of changes with the physical state of the systems' constituents and social factors (e.g. familiarity, intention).

Key words : *changes of matter, representations, classification, primary school.*

Resumen

El objetivo de este artículo es estudiar el modo de representación de los cambios de la materia de los alumnos de 10 a 12 años. Los resultados permiten elaborar :

– un sistema de clasificación de las categorías de cambio tales como las entienden los alumnos (cambios en la forma, ordenación, constitución y localización de los constituyentes del sistema; cambios macroscópicos y microscópicos),

– un cuadro conceptual que pone en relación las distintas categorías de cambios arriba mencionadas con el estado físico de los constituyentes del sistema y los factores sociales (ej : familiaridad, intención).

Palabras claves : *cambios de la materia, representaciones, sistema de clasificación, escuela primaria.*

1. INTRODUCTION

Cet article a pour but de rechercher comment les élèves grecs âgés de 10 à 12 ans (des deux dernières classes de l'école primaire) se représentent les changements qui ont lieu dans les systèmes physico-chimiques binaires (dissolutions et réactions chimiques) dont les constituants se trouvent dans divers états physiques (solide, liquide, gaz).

C'est dans cette intention que nous avons établi une classification sur la manière dont les élèves se représentent les changements et que nous traitons les questions suivantes :

– l'utilisation par les élèves des diverses catégories de changements. L'étude de cette question permet de nous éclairer sur la fréquence d'utilisation qui semble révéler l'aspect fonctionnel des diverses catégories de changements qu'utilisent les élèves ;

– l'étude des corrélations entre les catégories de changements utilisées et (a) les systèmes que nous étudions, (b) l'état physique des constituants des systèmes étudiés, (c) le degré de familiarité des élèves avec les systèmes étudiés, (d) l'intention des élèves (description, explication des changements). Cet ensemble de variables caractérise certains aspects du contexte de cette étude et nous nous y référerons conventionnellement, dans la suite, comme variables du contexte. L'étude de ce deuxième groupe de questions vise à une éventuelle exploitation pédagogique des corrélations qui en découleront.

En plus il faut noter que l'étude systématique de la manière dont les élèves se représentent les changements de la matière et mettent en relation les catégories des changements avec les variables du contexte a d'importantes conséquences pédagogiques parce qu'elle constitue le premier pas pour la désignation, tant des associations que font les élèves et que nous devons modifier, que des points sur lesquels nous devons nous appuyer (Fabre, 1995) pour mener à bien des interventions didactiques.

En ce qui concerne les données bibliographiques nous avons constaté que la grande majorité des recherches relatives aux représentations des élèves sur les changements de la matière est classée, selon le regroupement proposé par Andersson (1990), dans le groupe de recherches auquel appartiennent celles qui sont centrées sur un seul problème. Cette étude, quant à elle, peut être incluse dans le deuxième groupe de recherches qui traitent de catégories fondées sur plus d'un problème et sur des descriptions générales. Dans ce dernier groupe on ne peut classer qu'un petit nombre de recherches (Andersson, 1986, 1990 ; Stavridou, 1990) qui ont la même orientation que la nôtre ; elles se réfèrent néanmoins à des groupes d'âges différents (niveau secondaire). Il faut en plus noter la construction, par un

travail bibliographique, d'un réseau de catégories de changements proposée par Brosnan (1991). Enfin, nous devons aussi souligner la nouvelle question que pose cette recherche concernant l'étude des corrélations entre les catégories de changements qu'utilisent les élèves et les variables du contexte.

2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE

L'instrument qui a été utilisé pour recueillir des données est constitué d'une série de six entretiens personnels, semi-structurés, avec des élèves. Plus précisément, chaque élève, après avoir observé l'évolution de chacune des situations expérimentales étudiées et présentées ci-après, était invité à répondre à une série de questions («*quels changements crois-tu qu'il y a eu ?*», «*pourquoi il y a eu ce changement ?*», «*de quelle manière crois-tu que se sont produits les changements dont tu as parlé ?*»). Chaque fois que cela a paru utile il a été demandé aux élèves de donner de plus amples explications sur leurs réponses, sans pour autant que cela signifie un changement dans la formulation des questions.

Chaque entretien évoluait sur la base d'une série de six expériences expérimentales effectuées par le chercheur. Les situations expérimentales étudiées étaient les suivantes :

- on met du sel dans l'eau. On obtient une solution transparente, incolore ;
- on met de la poudre de sulfate de cuivre hydraté dans l'eau. On obtient une solution de couleur bleue ;
- on met un comprimé d'aspirine effervescente dans l'eau. Il se dégage des bulles gazeuses. Le comprimé «disparaît» ;
- on verse de l'alcool dénaturé (de couleur bleue) dans l'eau. On obtient une solution de couleur bleue claire ;
- on met de la soude dans un tube à essais contenant de l'acide chlorhydrique. Il se dégage des bulles gazeuses et la soude «disparaît» ;
- on fait bouillir de l'eau sous un papier-filtre sur lequel on a mis de la poudre de sulfate de cuivre anhydre (de couleur blanche). On obtient une poudre de couleur bleue.

Dans la suite de l'article, ces situations expérimentales seront, pour des questions de brièveté, notées comme systèmes : [Sel+Eau], [Sulf.+Eau], [Asp.+Eau], [Alc.+Eau], [Soud.+Ac.Chl.], [Sulf.An.+Vap.].

Le choix de ces systèmes a été réalisé selon les critères suivants :

- l'étude de phénomènes physiques et chimiques ;
- l'état physique des réactifs et des produits de chaque système ;
- le degré de familiarité des élèves avec les systèmes étudiés. On a choisi comme critères de classification des systèmes en «familiers» et «non familiers» le fait que, selon notre estimation, les élèves avaient réalisé ou non ces situations dans leur vie quotidienne (systèmes familiers : [Sel+Eau], [Asp.+Eau], [Alc.+Eau] ; systèmes non familiers : [Sulf.+Eau], [Soud.+Ac.Chl.], [Sulf.An.+Vap.]) ;
- la mise à disposition d'une riche variété de stimuli visuels comme, par exemple, le changement radical de couleur, un dégagement important de gaz.

Un autre élément important concerne l'intention des élèves c'est-à-dire la différenciation qu'on fait entre la description et l'explication des changements. On parle de «description des changements» quand il s'agit d'une simple énumération des changements qui ont eu lieu dans les systèmes examinés (réponses des élèves à la question «*quels changements crois-tu qu'il y a eu ?*»). Pour «l'explication des changements», on estime qu'il s'agit des réponses des élèves qui consistent en explication des changements qu'ils ont décrits (réponses à la question «*pourquoi il y a eu ce changement?*») ou des mécanismes des changements (réponses à la question «*de quelle manière crois-tu que se sont produits les changements dont tu as parlé ?*»). Les changements énumérés par les élèves, quand ils en font la description, sont désignés directement par eux-mêmes comme des changements, alors qu'au contraire, les changements auxquels ils font appel pour l'explication de ces changements ou de leurs mécanismes, ne sont pas directement appelés changements par les élèves.

La population interrogée était composée de trente élèves (âgés de 10 à 12 ans) des deux dernières classes de l'école primaire en Grèce, pour l'enquête principale, et de dix élèves pour l'enquête préliminaire. La participation des élèves était volontaire et ils ont été sélectionnés en collaboration avec l'instituteur de la classe concernée, afin que soient représentés, dans l'échantillon, des élèves présentant différentes performances scolaires.

3. ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES DONNÉES RECUEILLIES

L'analyse et l'interprétation des données recueillies seront développées dans deux parties :

- développement du système de classification des changements de la matière selon les représentations des élèves,
- essai de délimitation et d'interprétation des corrélations entre les catégories du système de classification et les variables du contexte.

3.1. Analyse des données recueillies : système de classification des changements de la matière

Les réponses des élèves qui concernent les changements de la matière peuvent tout d'abord être classées selon quatre catégories de réponses ou catégories de changements. On établit cette classification en fonction de ce qui «est conservé et de ce qui change lors de ces changements». Il s'agit, comme le soulignent Piaget & Garcia (1971), des deux aspects qui caractérisent les changements : l'aspect de la production et l'aspect de la conservation (première classification). De plus, on classe les réponses d'élèves concernant les changements de la matière dans deux catégories en fonction du niveau macroscopique ou microscopique (deuxième classification).

La présentation de chaque catégorie de changements qui suit est accompagnée d'un certain nombre de réponses représentatives des élèves.

3.1.1. Première classification

(A) Changements dans la forme

Dans le cadre de cette catégorie de changements, bien que certaines propriétés de la substance soient modifiées, son existence et son identité demeurent intactes (c'est-à-dire qu'il s'agit de la même substance mais sous une forme modifiée). Dans les réponses d'élèves qu'on inclut dans ce type de changements, on trouve en général les expressions suivantes : «*le solide est devenu liquide*», «*le liquide est devenu de la vapeur*», «*il a changé de couleur, de goût ou d'odeur*».

Cependant, dans la catégorie de changements dans la forme, on distingue un certain nombre de sous-catégories :

- **(A1)** changement de l'état d'un constituant des systèmes étudiés de l'état solide à l'état liquide, ou «dissolution» (exemples de réponses : «*le sel, de solide est devenu liquide, c'est-à-dire qu'il s'est dissous*», «*la turquoise a fondu*», «*la soude s'est dissoute dans l'acide*», «*l'aspirine s'est dissoute ... elle a fondu... c'est-à-dire que de solide c'est devenu liquide*») ;
- **(A2)** changement dans la couleur des constituants des systèmes étudiés, (exemples de réponses : «*l'eau est devenue bleue*», «*l'acide a pris la couleur de la soude*», «*la pierre blanche est devenue bleue*») ;

– **(A3)** changement dans le goût des constituants des systèmes étudiés (exemples de réponses : *«l'eau a pris le goût de l'aspirine», «l'eau est devenue salée»*) ;

– **(A4)** changement dans l'odeur des constituants des systèmes étudiés (exemples de réponses : *«l'eau a pris l'odeur de l'alcool», «la soude a maintenant l'odeur de l'acide»*) ;

– **(A5)** changement dans la visibilité des constituants des systèmes étudiés, c'est-à-dire qu'un constituant du système de visible devient invisible (exemples de réponses : *«le sel ne se voit plus maintenant bien qu'il soit dans l'eau», «la turquoise semble disparaître, c'est-à-dire je ne la vois plus... mais c'est sûr que ça existe dans l'eau»*) ;

– **(A6)** production de bulles (exemples de réponses : *«l'aspirine pétille», «la soude dégage des bulles»*).

(B) Changements dans l'arrangement

Dans le cadre de cette catégorie de changements, l'arrangement d'un ensemble de substances change, tandis que l'existence et l'identité des substances demeurent intactes. Les réponses d'élèves qui sont incluses dans ce type de changements contiennent en général des expressions comme : *«se sont unis», «se sont mélangés», «ne font plus qu'un»* (exemples de réponses : *«les molécules de l'eau et du sel s'unissent pour ne former qu'une seule molécule», «l'eau et l'aspirine se mélangent... elles ne font plus qu'un», «cela devient un mélange, quand la turquoise entre en contact avec l'eau, ça se mélange... ensemble elles ne font plus qu'un»*).

(C) Changements dans la constitution

Dans cette catégorie de changements, il y en a un, dans la constitution de la substance, qui devient un ensemble de corpuscules microscopiques (non visibles) tandis que l'existence et l'identité de cette dernière demeurent intactes (exemples de réponses : *«l'eau le dissout (sucre), le fait fondre peu à peu, le fait fondre petit à petit et il devient plus petit... c'est-à-dire qu'il devient de petits petits morceaux invisibles qui ne se voient pas», «le sel s'est séparé de l'eau en molécules, en poussière et on ne les voit pas du tout»*).

(D) Changements dans la localisation

Cette catégorie est constituée par des changements où seule la localisation de la substance dans l'espace change, l'existence et l'identité de la substance demeurant intactes. Les réponses des élèves incluses dans ce type de changements contiennent généralement des expressions comme : *«a bougé», «est allé de... à...»* (exemples de réponses : *«... les molécules en lesquelles est devenu le sel sont parties et se sont déplacées et se sont mélangées à l'eau...», «les morceaux invisibles d'aspirine circulent dans l'eau...»*).

3.1.2. Deuxième classification

(I) Changements macroscopiques

Cette catégorie inclut les changements où les substances qui se transforment correspondent à des entités de l'univers macroscopique (exemples de réponses : «*l'alcool n'a plus fait qu'un avec l'eau... euh! c'est-à-dire qu'ils se sont unis*», «*... le sel, de solide est devenu en liquide, je veux dire qu'il s'est dissous*», «*l'eau est devenue bleue, d'incolore elle a pris la couleur de la turquoise*», «*la turquoise blanche est devenue bleue*»).

(II) Changements microscopiques

Dans cette catégorie de changements les substances qui se transforment correspondent à des entités de l'univers microscopique (exemples de réponses : «*la turquoise est devenue maintenant de tout petits morceaux, si petits que je ne peux les voir qu'au microscope... ces morceaux invisibles s'unissent ensuite avec ceux de l'eau*», «*les petits morceaux invisibles... les molécules de la turquoise... se dispersent dans l'eau*», «*les molécules de la soude s'unissent aux molécules de l'acide*»).

À propos des catégories citées ci-dessus il est opportun de noter les constatations qui suivent.

(a) La comparaison des catégories de changements qui ressortent de la classification des données recueillies dans cette recherche avec celles qui sont décrites dans la bibliographie correspondante, fait apparaître que

– la catégorie de changements dans la «forme» est similaire à la catégorie «modification» proposée par Andersson (1990). Rappelons que les recherches d'Andersson concernent les élèves du secondaire ;

– deux catégories («forme», «arrangement») du réseau de Brosnan (1991), construit par un travail bibliographique, sont similaires aux catégories de changements dans la «forme» et dans «l'arrangement» de notre système de classification. Une autre catégorie du réseau, la «localisation», bien qu'elle ait le même titre que la catégorie des changements dans la «localisation» diffère complètement dans le contenu ; en effet, elle se réfère à des changements dans la localisation des propriétés des substances. Notons que Brosnan étend l'application de son réseau des enfants de 6 ans jusqu'à des étudiants d'université.

(b) À propos du problème que soulève la première classification et qui concernait ce que les élèves considèrent comme se transformant, et ce qu'ils considèrent comme se conservant lors de l'évolution des systèmes étudiés (siège des phénomènes physiques ou chimiques), on note que dans son ensemble la population étudiée (et il est intéressant de constater que tous les élèves partagent cette opinion) considère que lors du passage

des systèmes étudiés de leur état initial à leur état final, la forme (par exemple la couleur, le goût, l'odeur), l'arrangement, la localisation et la constitution de leurs constituants peuvent changer, mais ni leur existence ni leur identité, qui, elles, demeurent intactes. Donc, malgré les conditions favorables soulignées par Laval (1985), dont nous avons pris soin de tenir compte pour ces deux dispositifs expérimentaux (dégagement de gaz visible, non implication de plusieurs phénomènes successifs) en vue de la reconnaissance des phénomènes chimiques (cf. systèmes [Asp.+Eau] et [Soud.+Ac.Chl.]) les élèves semblent finalement interpréter les informations que donnent les dispositifs sous des conditions qui leur sont propres et non en termes d'interactions chimiques. Bref, les élèves utilisent d'autres catégories de changements par rapport aux catégories que propose la science scolaire¹ (changements physiques, changements chimiques). Les conséquences didactiques de ce résultat, avec lequel s'accordent les recherches de Solomonidou & Stavridou (1994), seront discutées dans la dernière partie de cet article (conclusions et conséquences didactiques).

Il est, par ailleurs, particulièrement intéressant de noter que les élèves, dans le cadre des changements dans la couleur, le goût, ou l'odeur, semblent ajouter plutôt que soustraire les propriétés physiques. Plus précisément, les élèves parlent de changement dans la couleur, le goût ou l'odeur d'un constituant du système qui, d'après eux, a «gagné» de la couleur, du goût ou de l'odeur, respectivement, lors de l'évolution du système. C'est-à-dire qu'ils raisonnent selon une logique préférentielle, celle du «gain» de couleur, de goût ou d'odeur.

(c) Enfin, dans le cadre de la distinction des changements selon leur niveau (macroscopique, microscopique), nous devons préciser que, même si les élèves se rapportent à des changements de niveau microscopique, cela n'indique, en aucun cas, qu'ils ont acquis un modèle de la structure particulière de la matière (Andersson, 1990 ; Nussbaum, 1985) et ceci pour les trois raisons qui suivent.

Le raisonnement des élèves à propos des entités microscopiques se forme selon l'idée que la matière continue peut parfois être fractionnée (les élèves rapportent des changements dans la constitution des constituants) en petits corpuscules invisibles, qui ne préexistent pas dans la matière en tant qu'éléments structuraux mais qui ressortent de cette matière continue sous certaines conditions (Pfundt, 1981).

La différence essentielle que les élèves considèrent entre les entités microscopiques et les entités macroscopiques ne concerne pas l'identité de ces entités, mais leur dimension.

1. Les termes «science scolaire» signifient la version du savoir scientifique qui est enseignée à l'école. Cette version est le résultat d'un processus de recontextualisation (Berstein, 1977) plutôt que de simplification du savoir scientifique.

L'aspect du modèle corpusculaire de la matière (existence de corpuscules non visibles) qu'évoquent les élèves, a un champ d'application restreint puisqu'ils y font appel dans des contextes très précis (tableau 3).

En ce qui concerne la fréquence de l'utilisation des catégories de changements, on a procédé à la construction des tableaux 1 et 2 qui montrent combien leur utilisation est systématique chez les élèves. Plus précisément :

- la première colonne présente la fréquence de l'utilisation «non systématique» des catégories de changements. Avec les termes utilisation «non systématique» nous désignons la référence des élèves à aucun, un ou, au maximum, deux systèmes ;

- à la deuxième colonne est présentée la fréquence de l'utilisation «semi-systématique» qui concerne la référence à trois ou quatre systèmes au plus ;

- la troisième colonne montre la fréquence de l'utilisation «systématique» des catégories de changements, c'est-à-dire la référence à cinq ou six systèmes.

	Utilisation non systématique (référence à 1 ou 2 systèmes)	Utilisation semi-systématique (référence à 3 ou 4 systèmes)	Utilisation systématique (référence à 5 ou 6 systèmes)
Changements dans la forme	0	1	29
Changements dans l'arrangement	19	7	4
Changements dans la constitution	26	4	0
Changements dans la localisation	30	0	0
Changements macroscopiques	0	0	30
Changements microscopiques	23	4	3

Tableau 1 : Fréquence d'utilisation des catégorie des changements (nombre d'élèves = 30)

	Utilisation non systématique (référence à 1 ou 2 systèmes)	Utilisation semi-systématique (référence à 3 ou 4 systèmes)	Utilisation systématique (référence à 5 ou 6 systèmes)
Dissolution	9	18	3
Changements dans la couleur	1	29	0
Changements dans le goût	22	8	0
Changements dans l'odeur	30	0	0
Changements dans la visibilité	30	0	0
Production des bulles	30	0	0

Tableau 2 : Fréquence d'utilisation d'après les sous-catégories des changements dans la forme (nombre d'élèves = 30)

À partir de l'étude du tableau 1 et pour les systèmes en question, on constate que la grande majorité des élèves (97 %) se réfère de façon «systématique» aux changements dans la forme.

Par contre, les changements dans la localisation, la constitution et l'arrangement sont rapportés de façon «non systématique». Plus précisément, tous les élèves (100 %) se réfèrent de façon «non-systématique» à des changements dans la localisation. Pour les changements dans la constitution, le pourcentage des élèves est de 87 % et pour les changements dans l'arrangement de 63 %.

En plus, on remarque que tous les élèves (100 %) rapportent de façon «systématique» des changements macroscopiques tandis que la majorité des élèves (77 %) rapporte parallèlement et de façon «non-systématique» des changements microscopiques. Le nombre total des changements macroscopiques rapportés par les élèves pour chaque système étudié est constamment plus élevé que celui des changements microscopiques.

Ensuite, on constate que les changements dans la couleur et la dissolution sont rapportés de façon «semi-systématique» par un pourcentage d'élèves respectivement de 97 % et de 60 % (tableau 2). Les changements dans le goût, l'odeur, la visibilité et la production des bulles, quant à eux, sont rapportés de façon «non systématique» par des pourcentages, respectivement de 73 %, 100 %, 100 % et 100 % (tableau 2).

3.2. Etude des corrélations : essai de délimitation du champ de significations

Dans le tableau suivant (tableau 3) on voit apparaître les corrélations statistiquement significatives. Le contrôle de l'existence de ces corrélations est effectué à l'aide du test χ^2 (Erickson & Nosanchuk, 1985 ; Blalock, 1987).

La première colonne du tableau 3 se réfère aux variables corrélées entre elles. La deuxième indique le niveau de signification de chaque corrélation. La troisième présente un code pour chaque corrélation. Ce code est reporté au schéma 1.

Variables	Seuil de signification	Code
Catégories de changements (changements dans la forme, l'arrangement, la localisation ou la constitution vs. système étudié	$p < .001$	A.C.1
Catégories de changements (changements dans la forme, l'arrangement, la localisation ou la constitution) vs. état physique des constituants du système étudié	$p < .001$	A.C.2
Catégories de changements (changements dans la forme, l'arrangement, la localisation ou la constitution) vs. degré de familiarité des élèves avec le système étudié	$p < .001$	A.C.3
Catégories de changements (changements dans la forme, l'arrangement, la localisation ou la constitution) vs. intention (description, explication des changements)	$p < .001$	A.C.4
Catégories de changements dans la forme vs. état physique du constituant-porteur du changement	$p < .001$	A.C.5
Catégories de changements dans la forme vs. degré de familiarité des élèves avec le système étudié	$p < .001$	A.C.6
Catégories de changements dans la forme vs. intention (description, explication des changements)	$p < .001$	A.C.7
Niveau de changements (macroscopique, microscopique) vs. système étudié	$.001 < p < .01$	B.C.1
Niveau de changements (macroscopique, microscopique) vs. degré de familiarité des élèves avec le système étudié	$.001 < p < .01$	B.C.2
Niveau de changements (macroscopique, microscopique) vs. intention (description, explication de changements)	$p < .001$	B.C.3
Niveau de changements (macroscopique, microscopique) vs. catégories de changements	$p < .001$	A.B.C.

Tableau 3 : **Corrélations entre les catégories des changements utilisées par les élèves et les variables du contexte**

On pourrait représenter schématiquement les corrélations du tableau 3 sur le schéma 1. Le schéma 1 se divise en deux grands groupes de variables : variables I et variables II. Le groupe de variables I se réfère aux catégories de changements de la matière et à leurs niveaux. Le groupe de variables II est constitué de variables qui correspondent aux caractéristiques du contexte de cette étude. Les flèches indiquent l'existence des corrélations entre les variables. À chaque flèche correspond un code rapporté au tableau 3 (par exemple la flèche entre la variable «forme» et la variable «familiarité» porte le code A.C.6 qui, suivant le tableau 3, nous indique que ces deux variables sont corrélées à un seuil de signification $p < .001$).

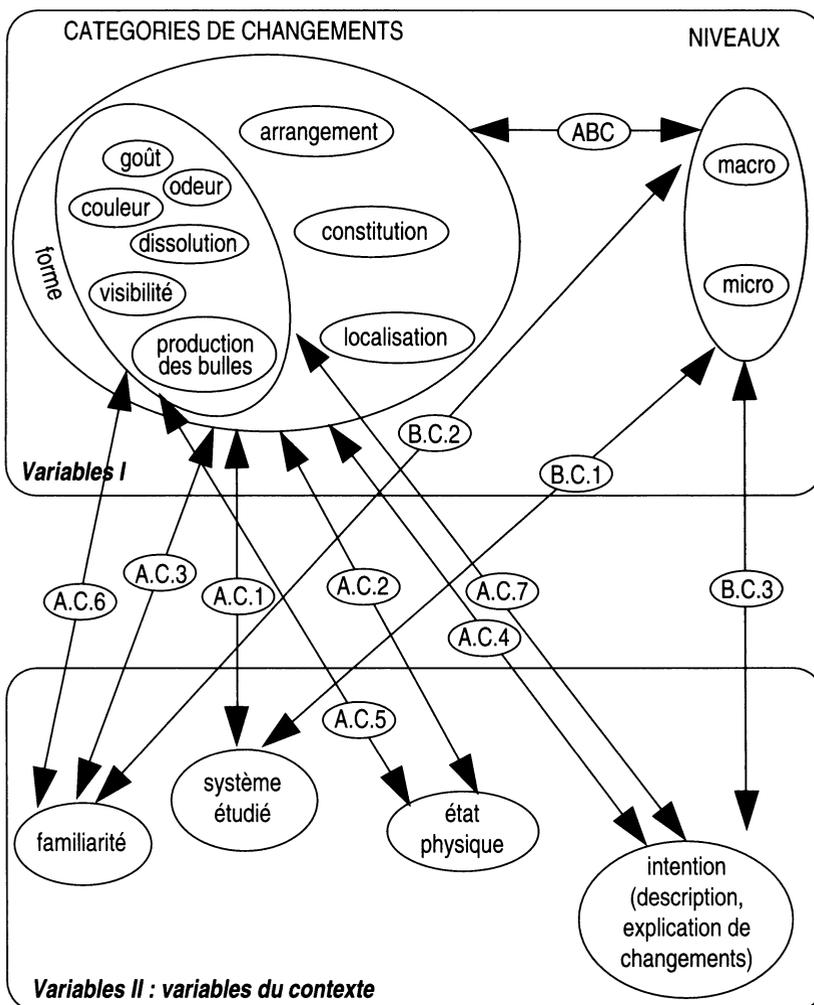


Schéma 1 : Représentation des corrélations entre les catégories des changements que les élèves utilisent et les variables du contexte

L'interprétation des corrélations précédentes est basée sur la valeur des résidus standardisés, c'est-à-dire sur l'idée admise que la corrélation est établie principalement à partir des cellules dont le résidu standardisé est élevé – on admet comme élevé un résidu standardisé supérieur à 2 (Erickson & Nosanchuk, 1985 ; Blalock, 1987) –. Donc, en se basant sur ce critère, il résulte que les corrélations suivantes sont dues aux tendances des élèves décrites après (*) chaque corrélation.

Corrélation A.C.1 (variables : systèmes et catégories de changements)

* changements dans la forme concernant les systèmes [Sulf.An.+Vap.], et non le système [Sel+Eau],

* changements dans la constitution concernant les systèmes [Sel+Eau], [Asp.+Eau], et non les systèmes [Alc.+Eau], [Soud.+Ac.Chl.], [Sulf.An.+Vap.],

* changements dans l'arrangement concernant le système [Alc.+Eau], et non le système [Sulf.An.+Vap.],

* changements dans la localisation concernant le système [Asp.+Eau], et non les systèmes [Soud.+Ac.Chl.], [Sulf.An.+Vap.].

Corrélation A.C.2 (variables : état physique et catégories de changements)

* changements dans la forme concernant des systèmes composés d'un constituant solide et d'un liquide,

* changements dans la constitution concernant des systèmes composés d'un constituant solide et d'un liquide, et non de deux liquides ou d'un solide et d'un gaz,

* changements dans l'arrangement concernant des systèmes composés de deux constituants liquides et non d'un solide et d'un gaz,

* changements dans la localisation ne concernant pas des systèmes composés d'un constituant solide et d'un gaz.

Corrélation A.C.3 (variables : familiarité et catégories de changements)

* changements dans la forme concernant des systèmes qui ne sont pas familiers et non des systèmes qui sont familiers,

* changements dans la constitution et la localisation concernant des systèmes qui leur sont familiers et non des systèmes qui ne sont pas familiers.

Corrélation A.C.4 (variables : intention - description, explication des changements - et catégories de changements)

* changements dans la forme, dans le contexte de description et non d'explication des changements,

* changements dans la constitution, l'arrangement et la localisation dans le cadre de l'explication, et non de la description des changements.

Corrélation A.C.5 (variables : état physique et sous-catégories de changements dans la forme)

* changements dans la couleur et le goût quand il s'agit de constituants liquides et non solides,

* dissolution, production de bulles et changements dans la visibilité concernant des constituants solides et non liquides.

Corrélation A.C.6 (variables : familiarité et sous-catégories de changements dans la forme)

* changements dans la couleur quand il s'agit de systèmes qui ne sont pas familiers et non de systèmes qui sont familiers,

* changements dans le goût quand il s'agit de systèmes qui sont familiers et non de systèmes qui ne sont pas familiers.

Corrélation A.C.7 (variables : intention et sous-catégories de changements dans la forme)

* changements dans la couleur et le goût dans le contexte de la description et non de l'explication de changements,

* dissolution et changements dans la visibilité dans le contexte de l'explication et non de la description,

* production de bulles dans le contexte d'explication des changements.

Corrélation B.C.1 (variables : système et niveau macro, micro)

* changements microscopiques concernant les systèmes [Sel+Eau], [Asp.+Eau], et non les systèmes [Soud.+Ac.chl.], [Sulf.An.+Vap.].

Corrélation B.C.2 (variables : familiarité et niveau macro, micro)

* changements microscopiques concernant des systèmes qui sont familiers et non des systèmes qui ne sont pas familiers.

Corrélation B.C.3 (variables : intention et niveau macro, micro)

* changements macroscopiques dans le contexte de description et non d'explication des changements,

* changements microscopiques dans le contexte d'explication et non de description des changements.

Corrélation A.B.C. (variables : catégories de changements et niveau macro, micro)

* changements dans la forme et non dans la constitution en ce qui concerne le macrocosme,

* changements dans la constitution, l'arrangement ou la localisation, et non changements dans la forme en ce qui concerne le microcosme.

La mise en relation des interprétations précédemment citées peut donner naissance à une première série de commentaires.

Corrélations A.C.2, A.C.4 et A.B.C.

Bien que les élèves aient tendance à choisir le cadre de l'explication des changements quand ils choisissent les changements dans l'arrangement (A.C.4) et des entités microscopiques quand ils décrivent des changements dans l'arrangement (A.B.C.), ils n'arrivent finalement pas à utiliser cette catégorie de changements en des termes de science scolaire (A.C.2). Cette constatation est importante puisque les changements dans l'arrangement des corpuscules microscopiques sont systématiquement utilisés dans le cadre de descriptions et d'explications scientifiques des phénomènes physiques et chimiques.

Corrélations : A.C.5 et A.C.7

On constate que le raisonnement des élèves, en ce qui concerne la dissolution, se caractérise par deux phénomènes inverses. Les élèves semblent, d'une part, poser des limites dans la mise en application de la dissolution - dans la mesure où, quand ils s'y réfèrent, ils la mettent en rapport avec des caractéristiques précises du contexte, comme par exemple l'intention des élèves (A.C.7), l'état physique du «constituant-porteur» (A.C.5) - ; d'autre part, ils semblent étendre la mise en application de la dissolution à des phénomènes que la science scolaire inclut dans les réactions chimiques - puisqu'ils utilisent «*des notions* (par exemple : dissolution, changement d'état, changements chimiques) *qui ne sont pas différenciées*» (Driver et al., 1985).

Corrélations : A.C.2, A.C.3 et B.C.2

Il est également intéressant de souligner la tendance des élèves à choisir des systèmes familiers et des systèmes composés d'un solide et d'un liquide quand ils choisissent des changements de niveau microscopique (B.C.2) et des changements dans la constitution parmi les autres catégories de changements (A.C.2, A.C.3). Dans le cadre de ces corrélations, les élèves semblent surtout attribuer les changements dans la constitution et les changements microscopiques au constituant solide des systèmes et non au liquide. On peut rechercher une interprétation de cette différenciation, dans la théorie de Piaget (Piaget & Garcia, 1971), à savoir dans la relation de dépendance qui existe entre la construction des notions et le mode des activités propres. C'est ainsi que la manipulation des objets qui comporte un réglage actif entraîne rapidement l'idée que les solides sont composés de parties collées ensemble et les liquides de parties mobiles. De plus, en ce qui concerne les liquides, «*leur caractère continu*» (Piaget & Garcia, 1971) contribue probablement à ce que les élèves aient des difficultés à les considérer comme discontinus. Cependant à la problématique concernant les causes éventuelles de l'origine de cette représentation des élèves - corrélation des changements dans la constitution et des corpuscules microscopiques avec des constituants solides - s'ajoutent finalement, en plus des facteurs précités, les manuels scolaires, en raison de leur approche de la constitution corpusculaire de la matière (Koulaïdis et al., 1995).

Corrélations : A.C.4, A.C.3, A.C.7, B.C.3 et A.B.C.

Il est extrêmement important de commenter le fait que, lorsqu'on demande aux élèves de décrire les changements, ils focalisent leur attention sur des changements qui sont directement observables. Cela mène seulement à la reconnaissance de certaines catégories de changements qui correspondent à des changements d'entités macroscopiques (A.C.4, B.C.3) et plus exactement à celle(s) de leurs sous-catégories qui correspond (-ent) chaque fois aux changements les plus manifestes du système étudié (A.C.7 : changement dans la couleur, le goût). Les élèves ont donc tendance, au départ, à ne tenir compte que des aspects limités des situations qu'ils explorent ; leur attention dépend de l'aspect saillant de certaines données perceptuelles issues du dispositif expérimental. Cela est, par ailleurs, une indication de «*focalisation limitée*» (Driver et al., 1985) des élèves lors du premier décodage de la situation dans le cadre de la description des changements.

Par la suite cependant, quand les élèves doivent affronter le problème de l'explication des changements qu'ils ont décrits, ils arrivent dans une certaine mesure, en essayant de construire une explication, à déconcentrer

leur attention des données perceptuelles les plus saillantes de la situation étudiée (A.C.4 : référence à des changements dans l'arrangement, la constitution ou la localisation) et à faire une recherche à un niveau «caché» d'approche de la réalité (microcosme) ; ils en arrivent donc à mentionner aussi des changements de niveau microscopique (B.C.3) qui correspondent à des changements différents de la forme (A.B.C.).

Enfin, il faut noter que les conséquences de la dominance de la perception et de la saillance des caractéristiques de la situation dans la focalisation limitée des élèves, apparaissent encore plus clairement quand ils approchent des systèmes non familiers, limitant ainsi exclusivement leur attention à des changements dans la forme (A.C.3).

Les constatations précédentes, en ce qui concerne les changements dans la forme, l'arrangement, la constitution et la localisation, révèlent une caractéristique essentielle et générale des représentations des élèves qui indique leur dépendance par rapport au contexte, puisque l'évocation de toutes les catégories de changements est soumise à des restrictions ; il s'agit de leurs dépendances aux facteurs du contexte.

4. CONCLUSIONS ET CONSÉQUENCES DIDACTIQUES

Le premier résultat concerne la manière dont les élèves se représentent les changements de la matière. Précisément, on a constaté qu'ils conçoivent les changements de la matière en termes de changements dans la forme, l'arrangement, la constitution et la localisation. Donc, les catégories de changements de la matière utilisées par les élèves ne correspondent pas aux catégories proposées par le curriculum et les manuels scolaires (changements physiques et chimiques).

Le traitement de la question concernant la fréquence d'utilisation des diverses catégories de changements a mis en évidence que la population étudiée se réfère plus fréquemment à la catégorie des changements dans la forme d'entités du macrocosme plutôt qu'aux autres catégories de changements.

En ce qui concerne les conséquences didactiques des résultats précédents, il semble que l'accès des élèves à la distinction fondamentale relative de la science scolaire (distinction entre phénomènes physiques et chimiques) est empêché par le fait qu'ils mettent en catégories les phénomènes en se basant sur les données directement observables (cf. la dominance de la catégorie «changements dans la forme»). On peut associer cet obstacle à deux autres obstacles qui découlent de l'analyse

des représentations des élèves : l'obstacle qui constitue la conservation de l'identité des substances, indépendamment du type de phénomène (phénomène physique ou chimique), et l'obstacle qui résulte de l'incapacité à coupler entre les substances et leurs propriétés. Ici, il est opportun de rappeler Bachelard (1986, p. 23) : «[...] l'expérience première ne peut, en aucun cas, être un appui sûr [...] l'esprit scientifique doit se former contre la nature [...] contre le fait coloré et divers.»

Selon la logique de la science scolaire, la construction du concept d'identité et le processus d'identification constituent des conditions *sine qua non* pour acquérir la distinction entre transformation physique et transformation chimique. Ainsi les élèves doivent se rendre compte que l'on ne sélectionne qu'une partie des propriétés des corps matériels parmi leur grande variété et, pour les élèves, les propriétés des corps matériels coïncident avec les caractéristiques extérieures. De plus, on doit, autant que possible, sélectionner un petit nombre de propriétés. Le processus d'identification doit être acquis en se basant sur ces propriétés et non sur d'autres caractéristiques saillantes des corps. Ce point constitue très exactement le point de conflit, (en d'autres termes, il constitue un obstacle à dépasser), entre la manière selon laquelle les élèves se représentent les changements de la matière et la connaissance scientifique.

Enfin, on a mis en évidence et on a interprété les corrélations entre les catégories de changements et certaines variables du contexte (le système étudié, l'état physique des constituants du système examiné, la familiarité et l'intention des élèves). Dans la suite, on va essayer de déduire les conséquences pédagogiques de ces corrélations.

L'analyse des données a mis en évidence la dominance, dans la pensée des élèves, d'une représentation continue et statique de la matière. Comme le montre l'étude des corrélations concernant les changements dans la constitution et les changements microscopiques, les élèves, dans plusieurs cas, disposent aussi d'une représentation correspondante sur les corpuscules issus des sectionnements successifs de la matière continue et statique. De plus, c'est avec cette représentation continue et statique de la matière que l'on peut associer les faits suivants :

- le mode d'utilisation, par les élèves, des diverses catégories de changements (par exemple leur tendance à mentionner des changements dans l'arrangement des constituants de systèmes composés de deux liquides),

- les limitations auxquelles est soumise leur référence à des changements microscopiques des systèmes étudiés (ils font, par exemple, appel à des entités du microcosme dans le cas de l'explication des changements ou quand il s'agit d'un système familier composé d'un solide et d'un liquide).

Finalement, on peut associer la représentation continue et statique de la matière à la dépendance des élèves par rapport à des données directement perceptibles.

On peut considérer comme un nouvel objet de recherche l'hypothèse que l'exploitation des éléments, acquis par les élèves et compatibles avec le savoir scolaire, pourrait faciliter le dépassement de la représentation continue et statique de la matière. On considère comme tels les éléments suivants :

- l'utilisation de la catégorie des changements dans l'arrangement des entités microscopiques, quand les élèves expliquent les changements, a comme conséquence de leur permettre d'expliquer les phénomènes physiques ;

- l'idée admise qu'une nouvelle relation se crée entre les constituants du système examiné est une première base qui mènera à la compréhension du concept de l'interaction chimique.

Enfin, mis à part les deux résultats précédemment présentés, on peut tirer de l'étude des corrélations deux catégories de conclusions :

- des conclusions concernant la spécification des interventions dans l'enseignement,

- des conclusions générales à propos du rôle des facteurs sociaux (familiarité, intention) dans la formation des représentations des élèves.

Comme nous l'avons rapporté, la première catégorie se réfère à des éléments concernant la spécification des interventions dans l'enseignement. Nous allons présenter deux exemples caractéristiques de ce type d'éléments :

- l'extension de l'explication des changements en termes de «changements dans l'arrangement», ne concernant pas seulement des systèmes composés de deux constituants liquides ;

- le fait que les élèves comprennent que la dissolution ne concerne pas seulement les substances solides mais aussi les liquides et les gaz.

En ce qui concerne la deuxième catégorie des conclusions on a d'abord constaté, à partir de l'étude des corrélations, que les catégories des changements utilisées par les élèves sont associées aux facteurs suivants : le système étudié, l'état physique des constituants du système en question, le degré de familiarité des élèves avec ce système et l'intention des élèves (description, explication des changements). En plus, on a constaté que les facteurs qui ont un caractère social (familiarité, intention) sont impliqués dans plus de corrélations avec les catégories utilisées par les élèves que les facteurs qui concernent les systèmes eux-mêmes (le système étudié et l'état physique des constituants de ce système). De ce fait, il résulte que les

facteurs sociaux semblent se corrélérer tant avec les catégories des changements qui ne sont pas compatibles (changements dans la forme, la constitution et la localisation) avec celles de la science scolaire, qu'avec des catégories que traite le savoir scolaire (changements macroscopiques, microscopiques).

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSSON B. (1986). The experimental gestalt of causation : A common core to pupils' preconceptions in science. *European Journal of Science Education*, vol. 8, n°2, pp. 155-171.
- ANDERSSON B. (1990). Pupils' conception of matter and its transformations (age 12-16). *Studies in Science Education*, vol. 18, pp. 53-85.
- BACHELARD G. (1986). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- BLALOCK H. M. (1987). *Social statistics*. Singapore, McGraw-Hill.
- BROSNAN T. (1991). Categorising macro and micro explanations of natural change. In P.L. Lijnse, P. Licht, W. de Vos & A.J. Waarlo, *Proceedings of the seminar «Relating Macroscopic phenomena to Microscopic particles»*. Utrecht, C.D.B., pp. 198-211.
- DRIVER R., GUESNE E. & TIBERGHENA A. (1985). *Children's ideas in science*. Milton Keynes, Open University Press.
- ERICKSON B. & NOSANCHUK T. (1985). *Understanding data*. Milton Keynes, Open University Press.
- FABRE M. (1995). L'idée d'obstacle et ses obstacles. In M. Fabre, *Bachelard éducateur*. Paris, PUF, pp. 78-89.
- KOULAIDIS V., HATZINIKITA V. & KOKKOTAS P. (1995). Primary science curricula : Changes of matter. In *Proceedings ATTI, 3rd European Conference on Research in Chemical Education*. Pologne - Lublin, pp. 144-147.
- LAVAL A. (1985). Premiers contacts avec la chimie. In collectif, Chaud ... froid ... pas si simple. *Recherches Pédagogiques*, n°3, Paris, INRP, pp. 89-111.
- NUSSBAUM J. (1985). The particulate nature of matter in the gaseous phase. In R. Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Éds), *Children's ideas in science*. Milton Keynes, Open University Press, pp. 124-144.
- PFUNDT H. (1981). The atom - The final link in the division process or the first building block? *Chimica didactica*, n°7, pp. 75-94.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1971). *Les explications causales*. Paris, PUF.
- STAVRIDOU H. (1990). *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Etude des conceptions des élèves*. Thèse de doctorat. Paris, Université Paris 7.
- SOLOMONIDOU C. & STAVRIDOU H. (1994). Les transformations des substances, enjeu de l'enseignement de la réaction chimique. *Aster*, n°18, pp. 75-95.

Comme nous l'indiquions dès le premier numéro de DIDASKALIA, cette rubrique vise à présenter des «points de vue» de personnes qui s'intéressent à l'enseignement et la formation scientifiques et techniques de différentes manières. Nous envisageons que ces articles puissent être à l'origine de débats.

Le point de vue qui suit est celui d'un chercheur en chimie théorique qui s'intéresse de très près à l'enseignement et a en charge la formation de futurs enseignants, candidats au concours de l'agrégation. Il analyse l'évolution des modèles de liaison chimique en termes de fonctionnalités et d'activités de modélisation associées, ceci dans l'enseignement français du second degré et du premier cycle universitaire.

Ce qui est défendu ici va bien au delà de la chimie, et nous souhaiterions qu'à l'occasion de cet article, un débat puisse s'établir sur l'apprentissage de la modélisation dans la formation scientifique. Certains aspects de la modélisation semblent être peu pris en charge dans l'enseignement, même pendant les travaux pratiques. Par exemple, la variété des rôles que l'expérience peut jouer est grande, elle peut être l'occasion de poser de nouvelles questions mais aussi elle est cruciale dans la validation d'une théorie. Cette variété semble encore peu exploitée. Ainsi nos connaissances sur la mise en oeuvre dans l'enseignement des divers aspects de la modélisation et sur l'apprentissage de ce fonctionnement des connaissances scientifiques sont encore faibles. Ces questions nous concernent tous. N'hésitez donc pas à réagir.

Andrée TIBERGHEN

Enseignement des modèles de liaison chimique

Teaching Chemical Bond Models

Daniel SIMON

Laboratoire de Chimie Théorique
École Normale Supérieure de Lyon
46, allée d'Italie
69364 Lyon cedex 07, France.

Résumé

Nous examinons les divers modèles de liaison chimique en vigueur dans l'enseignement du second degré et du premier cycle universitaire français. Ils sont basés sur une représentation des densités électroniques associées aux liaisons, ainsi que sur des modèles moléculaires, et constituent des modèles descriptifs. En premier cycle universitaire et en classe préparatoire aux grandes écoles, la méthode de Hückel offre un modèle opérationnel avec lequel l'étudiant peut avoir une véritable activité de modélisation prédictive, dans le domaine des structures géométriques et électroniques des molécules conjuguées, ainsi que dans l'approche de la réactivité de ces molécules.

Mots clés : *modélisation, liaison chimique, modèle moléculaire, méthode de Hückel, réactivité chimique.*

Abstract

Various chemical bond models, used in the secondary school and in the first year university are investigated. First, they are based on both a representation of the

bond electron density, and molecular models, and they form descriptive models. Then, in the first year university, the Hückel method provides an operational model, which the students can perform as a predictive modelisation, in the area of geometrical and electronic structures of conjugated molecules, as well as in the approach of the chemical reactivity of these molecules.

Key words : *modelisation, chemical bond, molecular model, Hückel method, chemical reactivity.*

Resumen

Examinamos los distintos modelos de enlace químico vigentes en la enseñanza de segundo grado y primer ciclo universitario francés. Se basan en una representación de las densidades electrónicas asociadas a los enlaces, así como en modelos moleculares, y constituyen modelos descriptivos. En primer ciclo universitario y en "classe préparatoire aux grandes écoles" (sistema francés), el método de Huckel ofrece un modelo operativo con el cual el estudiante puede mantener una verdadera actividad de modelización predictiva, en el campo de las estructuras geométricas y electrónicas de las moléculas asociadas, así como en el acercamiento a la reactividad de dichas moléculas.

Palabras claves : *Modelización, enlace químico, modelo molecular, método de Huckel, reactividad química.*

1. INTRODUCTION

Comme le soulignent les programmes des classes du second degré (BOEN, 1992, 1995a), l'enseignement de la chimie au lycée a de nombreux objectifs. Parmi les objectifs de type pédagogique, retenons les suivants :

– raisonner : *«la chimie est par excellence le domaine du **raisonnement qualitatif** où il s'agit [...] de déceler, sous le phénomène complexe, les facteurs prédominants ...»* ;

– modéliser : *« [...] Toute la rigueur d'une discipline expérimentale est dans la bonne utilisation des modèles qu'elle utilise pour décrire une réalité souvent complexe ... »*

Ce sont ces deux points, alliant la nécessité de la modélisation et le raisonnement qualitatif, que nous souhaiterions développer ici, dans le domaine particulier de la modélisation des liaisons chimiques dans les molécules. Rappelons tout d'abord que, dans ce domaine, l'enseignant met à la disposition des élèves des outils qui entrent dans les catégories suivantes :

– des **représentations de la liaison chimique**, basées essentiellement sur des conventions de partage des électrons entre les atomes constituant la molécule ;

– des **modèles moléculaires**, qui sont des objets matériels, se présentant comme un « jeu de construction », et dont les techniques infographiques reproduisent souvent des images ;

– des **théories** utilisant les principes de la mécanique quantique, dans le cadre de modèles bien définis.

L'objet de cet article est d'analyser les activités de modélisation que nous offrent les représentations des liaisons chimiques, les modèles moléculaires et les modélisations basées sur un modèle théorique, comme la méthode de Hückel, introduite récemment dans les nouveaux programmes de classes préparatoires (BOEN, 1995b, 1996). En effet, si l'on revient aux programmes du second degré des lycées, on lit que « *l'enseignement de la chimie peut être l'occasion idéale de développer l'utilisation d'un modèle, d'en montrer ses limites, de le sophistiquer en fonction des besoins* ». L'introduction de la théorie de Hückel va tout à fait dans ce sens et semble être un aboutissement nécessaire de la démarche de modélisation qu'il convient d'adopter dans l'enseignement de la chimie.

Après avoir fait état des modèles de liaisons enseignés, nous discuterons de l'utilisation des modèles moléculaires et de leur impact dans le second degré. Ensuite, nous nous attacherons à montrer en quoi l'utilisation d'une théorie comme la méthode de Hückel permet de dépasser la simple représentation des liaisons dans les molécules, constituant ainsi une étape essentielle dans l'évolution de la démarche conceptuelle, au niveau de la modélisation de la liaison chimique.

2. REPRÉSENTATION DES LIAISONS CHIMIQUES

La première étape de modélisation concerne les liaisons chimiques, avant même la présentation de modèles moléculaires. En effet, dès la classe de quatrième, et en classe de seconde, on fait état de la représentation de Lewis des atomes, puis des molécules. Rappelons qu'il s'agit d'un modèle purement descriptif, dans lequel les électrons sont appariés, les paires ainsi constituées étant soit partagées entre les atomes, pour former des liaisons simples, doubles ou triples, suivant que le nombre de paires est respectivement égal à un, deux, ou trois, soit localisées sur l'atome, jouant ainsi le rôle de paires libres (figure 1).

Ce modèle descriptif s'affine en classe de terminale scientifique (S), où la méthode VSEPR (Valence Shell Electron Pair Repulsion) est présentée,

pour justifier la géométrie des molécules simples. En effet, cette méthode VSEPR permet d'attribuer à chaque paire d'électrons, telle que la définit la théorie de Lewis, une distribution électronique spatiale localisée entre les deux atomes s'il s'agit d'une liaison, ou à proximité immédiate de l'atome concerné, s'il s'agit d'une paire libre (figure 1). Autour de chaque atome, la géométrie est définie par le fait que les paires d'électrons subissent une répulsion mutuelle. Les directions des différentes distributions spatiales des paires d'électrons sont donc les plus éloignées possibles les unes des autres, induisant ainsi une topologie linéaire s'il y a deux paires, triangulaire pour trois paires, tétraédrique pour quatre paires, etc. Le modèle devient alors prédictif, puisqu'on peut, pour toute molécule dont on aura identifié les paires entourant chaque atome, prévoir une géométrie autour de chacun d'eux.

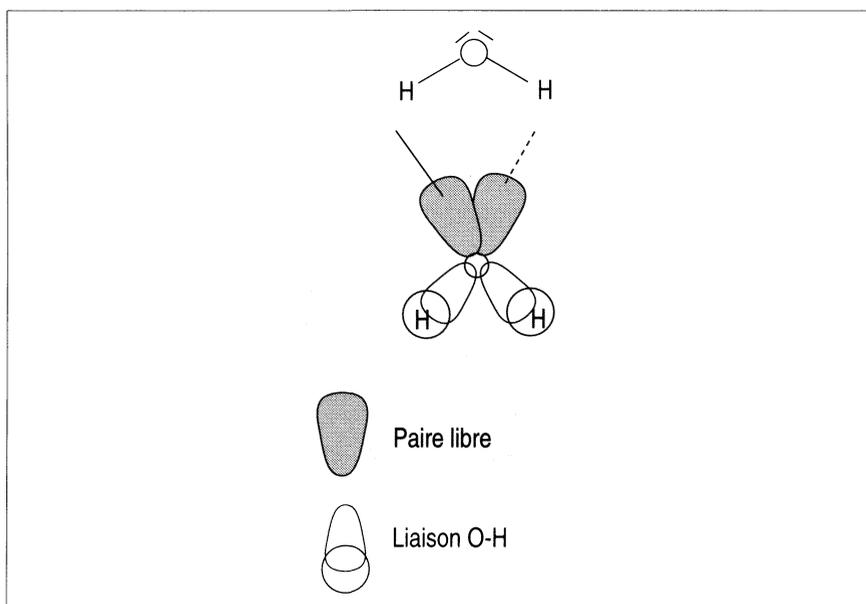


Figure 1 : Dans la molécule H_2O les paires d'électrons (paires libres et liaisons) prennent des directions formant une topologie tétraédrique dont O est le centre. Les directions prises par les paires libres sont indiquées par des traits allant vers l'avant et vers l'arrière

En premier cycle universitaire (DEUG ou classes préparatoires aux grandes écoles), un autre modèle est présenté. Il s'agit du modèle des orbitales moléculaires, pour les molécules diatomiques. La différence conceptuelle est notable : alors que dans le modèle de Lewis (ou son extension sous la forme VSEPR), les électrons sont appariés et localisés, dans le modèle des orbitales moléculaires, les électrons sont considérés

comme indépendants les uns des autres (leur répulsion est prise en compte de façon moyenne, en considérant qu'ils font écran à la charge nucléaire), et il sont placés dans des orbitales qui s'étendent **sur l'ensemble de la molécule**. Cette délocalisation s'exprime, sur le plan formel, comme une combinaison linéaire d'orbitales atomiques des atomes constituant la molécule.

Notons que, dans la démarche qui anime cette présentation des liaisons, la notion de délocalisation est introduite, même avec le modèle de Lewis, au moyen de formes mésomères en « résonance », censées traduire le fait qu'il y a interaction entre les paires électroniques constituant le système π des molécules conjuguées (Granger, 1997). On voit ainsi que ce modèle de Lewis suggère un traitement différent suivant que les électrons appartiennent au système σ de la molécule, (ce système détermine le squelette moléculaire), ou au système π , lorsque celui-ci existe (figure 2).

Cette présentation de ces différents modèles est indispensable pour que les élèves acquièrent une première connaissance de la liaison chimique. Néanmoins, l'inconvénient majeur de la présentation qui en est faite, est d'être limitée, dans une large mesure, à une modélisation descriptive de la liaison chimique. Dans ce domaine, où la démarche expérimentale est difficile à aborder (on ne « voit » les molécules que par des techniques indirectes, largement basées sur la spectroscopie), il semble nécessaire que l'activité de modélisation, en tant que telle, soit beaucoup plus opérationnelle, comme le soulignent certains auteurs (Winther, 1993).

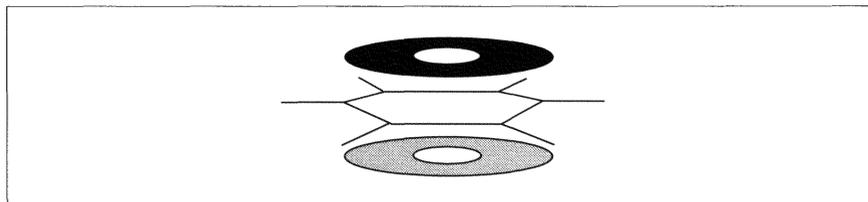


Figure 2 : Schéma représentant le squelette σ (traits pleins), et le nuage électronique π de la molécule de benzène

3. CONCEPTUALISATION DES LIAISONS CHIMIQUES À PARTIR DES MODÈLES MOLÉCULAIRES

Avant de développer l'intérêt que présente, pour la modélisation, l'utilisation de la théorie de Hückel, il nous faut revenir aux modèles moléculaires.

Les modèles moléculaires sont souvent présentés comme donnant la forme et l'extension spatiale des molécules. Cette conception est très générale puisqu'elle est utilisée dans le grand public pour illustrer ce qu'est une molécule. Notons que les manuels des classes de lycée sont plus éclectiques, puisqu'ils utilisent des photographies de modèles moléculaires pour illustrer les molécules au programme, et qu'ils montrent aussi des représentations (en général sur l'écran d'un ordinateur comme dans Dahringer et al., 1993) adoptant des conventions différentes, par exemple des visualisations de la densité électronique (Bouland et al., 1993).

Rappelons les caractéristiques de ces modèles moléculaires utilisés dans l'enseignement du second degré. Tout d'abord, ces modèles sont basés sur une conception de la molécule (Paolini, 1985) dans laquelle les atomes gardent leur identité (ce qui peut paraître évident, puisque ce sont les noyaux qui les définissent), et possèdent des caractéristiques **invariantes** d'une molécule à une autre, comme la taille avec laquelle ils sont représentés.

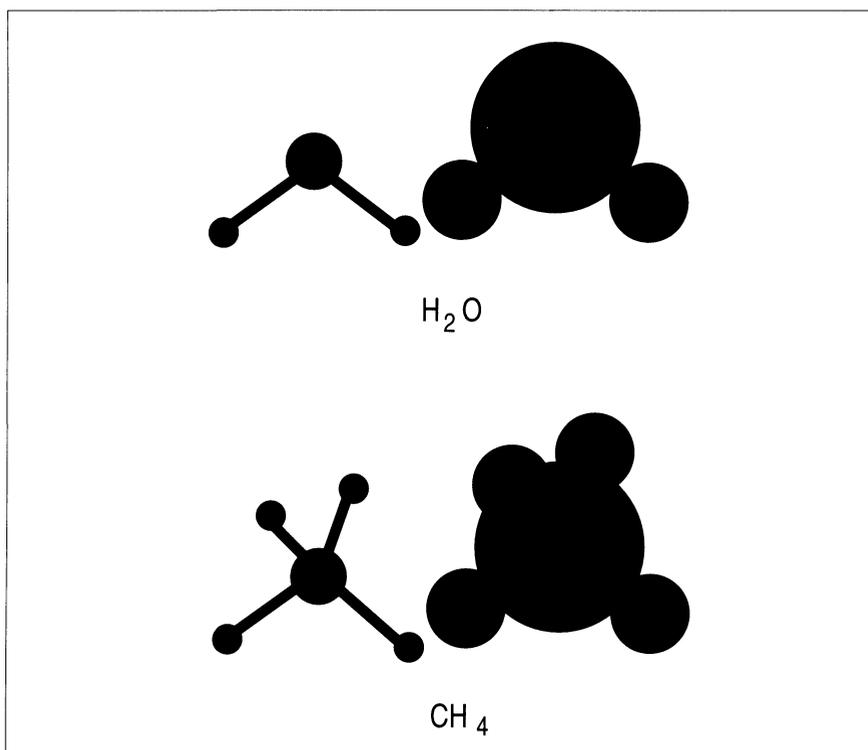


Figure 3 : Modèles éclatés et compacts de H_2O et de CH_4

Il existe deux types de modèles (Nuffield Chemistry, 1967) : les modèles éclatés et les modèles compacts (figure 3). Par convention, chaque atome possède une taille caractéristique du rayon de son nuage électronique. Le rayon choisi est généralement celui de Van der Waals. Le modèle compact est le plus représentatif de la taille de la molécule, puisqu'il utilise une échelle identique pour le rayon atomique et pour la distance entre les noyaux. La conséquence en est que les nuages atomiques s'interpénètrent dans le modèle compact, mettant ainsi en évidence la différence entre le rayon de Van der Waals et le rayon covalent. Le modèle éclaté adopte une convention hybride entre une représentation du squelette moléculaire et une visualisation du nuage électronique. Les directions et les longueurs des liaisons sont matérialisées par des tiges, simples, doubles ou triples suivant leur nature, et les atomes ont la forme d'une sphère dont le rayon rappelle qu'ils sont entourés d'un nuage électronique. Ce modèle est celui qui permet le mieux de visualiser la géométrie de la molécule dans la mesure où la direction des liaisons est explicite (Durupthy, 1995). C'est le modèle que l'on rencontre le plus souvent.

Ces modèles moléculaires ont fait l'objet d'enquêtes très détaillées auprès des élèves (Besson & Davous, 1991) et des professeurs (Boilevin et al., 1996), et nous renvoyons le lecteur à ces publications pour une discussion approfondie. Deux points méritent néanmoins d'être soulignés. Premièrement, ces enquêtes font très nettement ressortir le fait que les conventions d'utilisation de ces modèles sont souvent peu développées et font, la plupart du temps, l'objet d'une simple présentation orale auprès des élèves. La notion de modélisation est pratiquement absente de cette présentation. On retrouve d'ailleurs, dans une large mesure, ce type d'approche dans les ouvrages du second degré où, à quelques exceptions près (par exemple, dans Durandeu et al., 1993 et Tomasino & Lorrin, 1993, les modèles moléculaires donnent lieu à une fiche spécifique), les modèles sont présentés sans explication, considérés comme allant de soi. Deuxièmement, les modèles moléculaires sont considérés comme des « maquettes » de molécules. Ils sont perçus comme une reproduction de la molécule, à une échelle agrandie. Pourtant, l'utilisation de conventions de représentation, associées aux propriétés que le modèle moléculaire exclut, comme par exemple le vide intramoléculaire, ou la distribution continue de densité électronique, devraient militer très nettement en faveur du statut de modèle, et non de maquette.

La différence est importante, et nous voudrions la souligner en mettant en évidence trois critiques fondamentales quant à la perception qu'ont les élèves des modèles moléculaires :

– les atomes sont matérialisés par une sphère, ce qui définit leur rayon. En fait, il faudrait parler en termes de densité électronique, ou plus simplement

d'extension du nuage électronique, avec une convention fixant la surface frontière entourant l'atome et à l'extérieur de laquelle les électrons ont une probabilité quasi nulle de se trouver ;

– une confusion courante existe entre la représentation de la molécule et la modélisation des liaisons : dans le modèle éclaté, les tiges reliant les atomes acquièrent une réalité intrinsèque, alors qu'elles correspondent à la densité électronique entre les atomes. De plus, l'utilisation de tiges simples doubles ou triples induit un mélange avec l'écriture d'une formule développée, basée sur la théorie de Lewis ;

– une autre confusion est liée aux conventions de représentation des atomes par une couleur et une taille qui les différencient dans le modèle, alors que la densité électronique n'est pas de nature différente suivant l'élément chimique considéré.

En conclusion de cette discussion sur les modèles moléculaires, il nous semble essentiel de faire ressortir les implications de l'utilisation des modèles quant à la conception de la liaison chimique. Ces modèles moléculaires devraient donc faire l'objet d'une véritable activité de modélisation, dans le cadre de la construction de molécules, et non d'une simple reproduction, à une échelle macroscopique, des molécules étudiées.

4. VERS UN MODÈLE OPÉRATIONNEL : LA THÉORIE DE HÜCKEL

La théorie de Hückel, abordée depuis plusieurs années dans certains premiers cycles des universités (Jean & Volatron, 1994), vient de faire, à l'occasion des nouveaux programmes, son entrée dans les classes préparatoires. Nous profitons de cette occasion, qui constitue un « petit événement », pour souligner tout l'intérêt que présente cette théorie quant à la modélisation des liaisons. Comme on l'a vu précédemment, il semble important, en chimie, de faire, de l'activité de modélisation, une activité à part entière, en particulier dans le domaine des liaisons chimiques où la conceptualisation est essentielle.

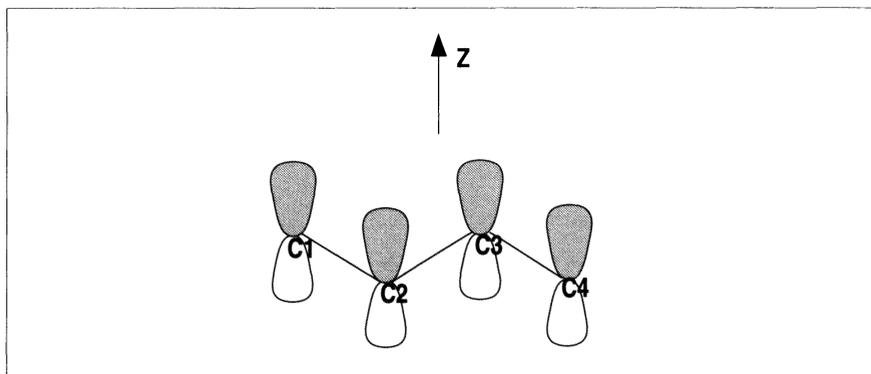


Figure 4 : Orbitales $2p_z$ du butadiène

La théorie de Hückel repose sur une conception de la structure électronique des molécules conjuguées dans laquelle le système σ et le système π sont indépendants. Ceci est réalisé si l'on considère uniquement des molécules planes (Coulson, 1952). La théorie de Hückel traite le système π par la méthode des orbitales moléculaires, dans laquelle sont données les orbitales atomiques $2p_z$ servant de base à la combinaison linéaire (figure 4), l'énergie α de ces orbitales $2p_z$, et l'énergie d'interaction β entre orbitales $2p_z$ adjacentes. Le problème est ensuite résolu de manière formelle : en mécanique quantique, on peut montrer que les orbitales moléculaires et leurs niveaux d'énergie sont les fonctions propres et les valeurs propres de l'hamiltonien qui représente l'énergie. Ce dernier a la forme d'une matrice, écrite dans la base des orbitales atomiques $2p_z$, dont les éléments diagonaux sont les énergies α des différentes orbitales atomiques, et dont les éléments non diagonaux sont les énergies d'interaction b entre les orbitales atomiques. Cet aspect formel ne pose aucun problème aux étudiants, puisqu'il constitue une partie importante de leur cours de mathématiques (Basili & Peskine, 1995). Lorsque les orbitales moléculaires et leurs énergies sont déterminées, il est très simple d'obtenir la configuration électronique du système π de la molécule, en remplissant les orbitales selon les mêmes règles que celles qui sont utilisées pour l'atome isolé (figure 5). Cette théorie permet alors d'obtenir une représentation fine de la distribution de la densité électronique (Rivail, 1994), qu'il convient de comparer aux représentations de type Lewis. Ceci est possible en évaluant les charges portées par les atomes et l'indice de liaison entre deux atomes. Enfin, cette méthodologie permet de prédire certaines propriétés de la molécule, relative à sa géométrie (longueurs de liaison) et à sa réactivité (vue comme l'interaction entre les orbitales de deux fragments moléculaires).

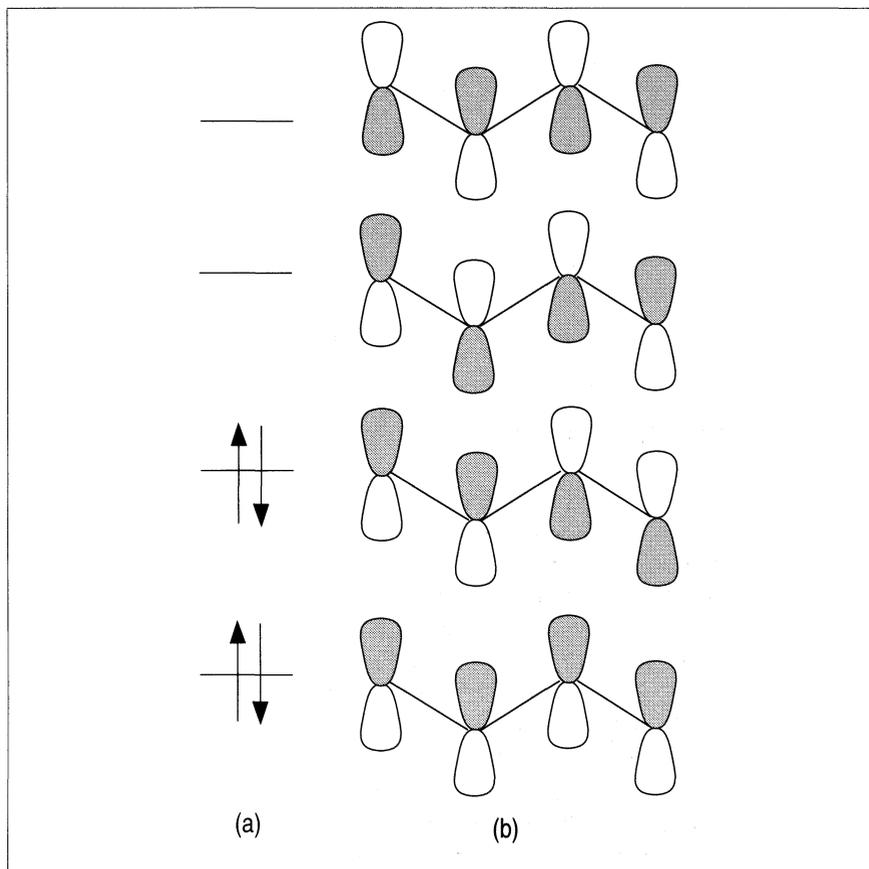


Figure 5 : **Configuration électronique du système π du butadiène** : (a) les niveaux d'énergie et leur remplissage ; (b) les orbitales moléculaires correspondantes

Ainsi, la mise en œuvre de la méthode de Hückel répond à trois critères qui en font une technique de modélisation opérationnelle :

- le modèle est élaboré sur la base des énergies des orbitales et de leurs interactions réciproques ;
- la résolution formelle conduit à une représentation de la distribution électronique sous forme d'orbitales moléculaires ;
- on peut tirer du modèle des propriétés physiques caractéristiques de la molécule.

4.1. Du modèle savant au modèle enseigné

Revenons sur l'introduction de la méthode de Hückel, dans le but de la comparer aux techniques évoluées de détermination de la structure électronique des molécules. Il est clair que ce modèle, basé sur la résolution de l'équation de Schrödinger, reste particulièrement simple. Par rapport aux calculs que l'on rencontre maintenant de façon courante dans les laboratoires de recherche (Rivail, 1994), de nombreuses approximations ont été faites :

- la répulsion électrostatique entre les électrons a été négligée : cette prise en compte impliquerait tout d'abord des calculs itératifs [méthode SCF (Self-Consistent Field), du champ autocohérent] puisque l'énergie d'un électron placé dans une orbitale nécessite la connaissance de la distribution spatiale associée aux autres orbitales (Ducasse et al., 1985), et également une description correcte des interactions de répulsion, qui, lorsque l'on maintient une description orbitalaire, se manifestent de façon relativement complexe, par des termes coulombiens, d'échange et de corrélation ;

- la base d'orbitales atomiques choisie est particulièrement restreinte. Dans les calculs plus poussés on utilise couramment des bases comprenant plusieurs fonctions orbitales (par exemple des fonctions gaussiennes) pour représenter chacune des orbitales du système. En outre, dans la méthode de Hückel, la base d'orbitales $2p_z$ choisie est considérée comme orthogonale, les termes de recouvrement entre orbitales adjacentes étant supposés nuls. Ce dernier point est un artifice purement technique, car la formation d'une liaison est liée, de manière essentielle, à l'interpénétration des orbitales atomiques ;

- aucune variation de géométrie, rendant la molécule non plane, n'est envisageable. Les seules variations de géométrie considérées de manière courante pour ce type de technique sont des variations de longueurs de liaison.

Néanmoins, la méthode de Hückel garde certaines spécificités des calculs relatifs aux orbitales constituant les liaisons chimiques. Tout d'abord, il est possible d'effectuer des calculs de type prédictif. Donnons deux exemples.

Premier exemple : les longueurs de liaison

La théorie de Hückel permet de prévoir les indices de liaison du butadiène : 0,89 et 0,45 respectivement pour les liaisons C1–C2 (ou C3–C4) et C2–C3, pouvant être reliés, au moyen d'une formule phénoménologique, aux longueurs de liaison : 1,357 Å (valeur expérimentale 1,337 Å) et 1,437 Å (valeur expérimentale 1,483 Å) (Anh, 1994).

Deuxième exemple : les réactions chimiques

La base de la compréhension et de la prévision des réactions chimiques faisant intervenir le système π des molécules conjuguées est la notion d'orbitales frontières (BOEN, 1995 b, 1996). Il s'agit de l'orbitale la plus haute occupée (HOMO, Highest Occupied Molecular Orbital), qui peut intervenir dans une réaction en tant que donneur d'électrons, et de l'orbitale la plus basse vacante (LUMO, Lowest Unoccupied Molecular Orbital), qui, puisqu'elle est vide, peut recevoir des électrons. La forme de ces orbitales HOMO et LUMO, en particulier leur répartition sur les différents atomes de la molécule, ainsi que leur position énergétique sont les éléments dominant la réactivité de ce type de molécule. Par exemple (Anh, 1994), la théorie de Hückel permet de prévoir que l'attaque de la liaison carbonyle C=O par un nucléophile s'effectue sur l'atome de carbone, avec un angle d'attaque d'environ 105° par rapport au plan de la molécule contenant la fonction carbonyle (figure 6).

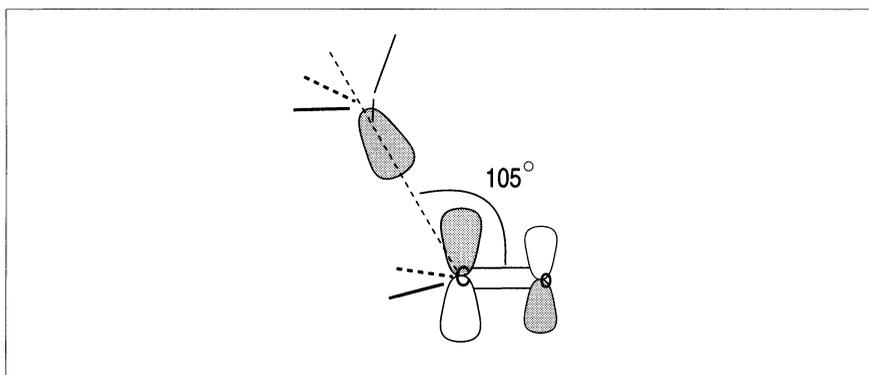


Figure 6 : **Attaque nucléophile de la liaison C=O lors de la réaction d'addition d'un nucléophile (ici, une amine).** La formation de la liaison N–C se fait à environ 105° , pour optimiser les interactions liantes entre les orbitales de N et de C, et antiliantes entre les orbitales de N et de O (d'après Anh, 1995)

En conclusion, cette technique, telle qu'elle doit être enseignée, est donc mise en valeur en tant qu'outil prédictif.

4.2. Technique de modélisation

Comment l'étudiant peut-il utiliser cet outil ?

Bien sûr, on conçoit facilement que cette méthode puisse s'appliquer à un grand nombre de molécules, d'autant plus qu'il est facile de tenir

compte d'atomes autres que le carbone, dont l'électronégativité est prise en compte en donnant une valeur particulière à l'énergie α de l'orbitale $2p_z$. Certains ouvrages proposent d'ailleurs un très grand nombre de résultats de calculs et d'applications (Anh, 1995).

En outre, l'étudiant peut facilement se poser ses propres problèmes : par exemple, « *Que se passe-t-il au niveau de l'énergie de l'orbitale HOMO, si j'ajoute sur la chaîne carbonée un substituant susceptible de donner des électrons ?* » ou « *Faut-il ajouter un substituant plus électronégatif pour déstabiliser les électrons placés dans l'orbitale HOMO ?* ». La réponse à ces questions permet de prédire la réactivité de molécules substituées, par rapport à celles d'une molécule conjuguée non substituée. Il est également possible d'aborder des problèmes où la structure électronique joue un rôle déterminant, comme la spectroscopie des molécules colorées (Bahnick, 1994). Ainsi, on a affaire à une véritable activité de modélisation, ce que ne permettait pas une technique comme la méthode VSEPR, dont le caractère opérationnel est très limité.

De plus, si l'on a pris soin de bien expliquer en quoi cette théorie de Hückel est un modèle et quelles sont les hypothèses qui en constituent la base, il devient très facile de dépasser ce modèle, en proposant d'autres hypothèses. L'une des théories dérivées de la théorie de Hückel, appelée méthode de Hückel étendue (ou EHT, Extended Hückel Technique), est abordée dans certains ouvrages de premier cycle universitaire (Jean & Volatron, 1994). La méthode EHT est un prolongement naturel de la théorie de Hückel, car elle permet l'application des mêmes concepts (configuration orbitalaire, notion d'orbitales frontières) à la description de la totalité de la structure électronique (système σ comme système π) de n'importe quelle molécule, alors que la théorie de Hückel est strictement limitée à l'étude du système π des molécules conjuguées. Cette technique a été à l'origine de nombreux travaux dans le domaine de la chimie orbitalaire (Eisenstein, 1996).

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Nous avons défendu l'idée que la théorie de Hückel, étudiée en premier cycle universitaire, en particulier dans les classes préparatoires où son introduction vient d'avoir lieu à la faveur d'un changement de programme, est un modèle opérationnel et prédictif, permettant donc une activité de modélisation des liaisons chimiques. Nous pensons qu'il est important de bien faire ressortir le lien entre ce type de théorie, les autres modèles de liaisons que sont la représentation des distributions électroniques (méthode de Lewis, méthode VSEPR et méthode des orbitales moléculaires), et l'utilisation de modèles moléculaires.

Une des motivations importantes de l'enseignement de modèles opérationnels de la liaison chimique est la parution récente de logiciels permettant, de façon relativement simple, de déterminer la structure électronique des molécules au moyen de calculs poussés (Suidan et al., 1995). Ces auteurs donnent un exemple intéressant, puisqu'il s'agit de s'appuyer sur des calculs réalisés sur un ordinateur de type PC à l'aide du logiciel Gaussian 92, pour apporter une vision critique de la représentation habituelle de Lewis de certaines molécules (ion sulfate, ion phosphate, etc.) La démarche de modélisation que suppose ce type d'étude est de même nature que celle que permet l'utilisation de la méthode de Hückel, tout en autorisant une analyse beaucoup plus fiable des propriétés structurales des molécules. D'autre part, la méthode de Hückel permet également d'introduire, sur une base théorique dont le formalisme est relativement simple, la notion de densité électronique, dont l'utilisation est croissante dans l'enseignement (Shusterman & Shusterman, 1997).

Nous voudrions également profiter de cette occasion pour rappeler à quel point nous sommes convaincu de l'importance de l'attitude critique de l'enseignant vis-à-vis des concepts et des modèles introduits. Malgré la déclaration d'intentions du préambule au programme du second degré, nous ne sommes pas toujours sûr que l'utilisation de modèles ressorte clairement de l'enseignement proposé en chimie. En physique, par contre, la notion de modèle nous semble mieux mise en évidence dans les programmes. Par exemple, dans le programme de physique des classes de terminale S (BOEN, 1995a), on trouve les thématiques «*Systèmes oscillants [...] modèles*» ou «*Lumière, modèle ondulatoire*», qui font explicitement appel à la notion de modèle. Enfin, l'étude de la structure électronique des molécules est l'occasion de rappeler qu'en chimie la représentation des molécules reste un problème difficile pour les élèves, car plusieurs modèles sont nécessaires pour introduire le concept de liaison chimique.

BIBLIOGRAPHIE

- ANH N. T. (1994). *Introduction à la chimie moléculaire*. Paris, Ellipses.
- ANH N. T. (1995). *Orbitales frontières. Manuel pratique*. Paris, InterÉditions / CNRS Éditions.
- BAHNICK D. A. (1994). Use of Hückel molecular orbital theory in interpreting the visible spectra of polymethine dyes. *Journal of Chemical Education*, vol. 71, n° 2, pp. 171-173.
- BASILI B. & PESKINE C. (1995). *Algèbre*. Paris, Diderot Éditeur, Arts et Sciences.
- BESSION M.-A. & DAVOUS D. (1991). Modèle moléculaire ou maquette de molécule ? *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 85, n° 736, pp. 1107-1126.
- BOEN (1992). Programmes de physique et de chimie de la classe de seconde générale et technologique. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série du 24/9/92, tome I. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.

- BOEN (1995a). Programmes de physique et de chimie de la classe de terminale S. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, spécial n° 3 du 16/2/95. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BOEN (1995b) Organisation et programmes des classes préparatoires aux grandes écoles. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série du 24/7/95, vol. 1, n° 1. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BOEN (1996) Organisation et programmes des classes préparatoires aux grandes écoles. *Bulletin Officiel de l'Éducation Nationale*, hors série du 18/7/96, vol. 5, n° 3. Paris, Ministère de l'Éducation Nationale.
- BOILEVIN J.-M., DAVOUS D. & THIBAUT J. (1996). Modèles moléculaires et nouveaux programmes au lycée. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 90, n° 786, pp.1289-1306.
- BOULAND A. et al. (1993). In J.-P. Lecardonnel & B. Proust (Éds), *Physique Chimie 2^{de}*. Paris, Bordas.
- COULSON C.A. (1952). *Valence*. Oxford, Oxford University Press.
- DAHRINGER F. et al. (1993). In R. Gentric (Éd.). *Physique Chimie 2^{de}*. Paris, Hatier.
- DUCASSE A., LALANNE J.-R., LALANNE P. & RAYEZ J.-C. (1985). Concepts modernes sur la structure électronique des molécules et la liaison chimique. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 80, n° 678, pp. 129-220.
- DURANDEAU J.-P. et al. (1993). *Physique Chimie 2^{de}*. Paris, Hachette.
- DURUPHTY A., CASALOT A., JAUBERT A. & MESNIL C. (1995). *Chimie I (1^{ère} année PCSI)*. Paris, Hachette.
- EISENSTEIN O. (1996). La méthode de Hückel étendue. Comment s'en servir à bon escient. *L'Actualité Chimique*, n° 7, pp. 5-9.
- GRANGER P. (1997). *Panorama des liaisons chimiques*. Paris, Masson.
- JEAN Y. & VOLATRON F. (1994). *Structure électronique des molécules. Volume 2 : géométrie, réactivité et méthode de Hückel*. Paris, Édiscience International.
- NUFFIELD CHEMISTRY (1967). *Handbook for teachers*. Londres, The Nuffield Foundation/ Longmans Penguin Books, chapitre 14, pp. 202-233.
- PAOLINI L. (1985). La représentation des molécules en chimie : une image de la réalité ou la réalité d'une image ? *L'Actualité Chimique*, n° 5, pp. 47-52.
- RIVAIL J.-L. (1994). *Éléments de chimie quantique à l'usage des chimistes*, 2^e édition. Paris, InterÉditions / CNRS Éditions.
- SHUSTERMAN G.P. & SHUSTERMAN A.J., (1997). Teaching Chemistry with Electron Density Models. *Journal of Chemical Education*, vol. 74, n° 7, pp. 771-776.
- SUIDAN L., BADENHOOP J.K., GLENDENING E.D. & WEINHOLD F. (1995). Common textbook and teaching misrepresentations of Lewis structures. *Journal of Chemical Education*, vol. 72, n° 7, pp. 583-586.
- TOMASINO A. & LORRIN C. (1993). *Physique Chimie 2^{de}*. Paris, Nathan.
- WINTHER J. (1993). Activités de modélisation dans l'enseignement des sciences physiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, vol. 87, n° 755, pp. 841-863.

COMPTES RENDUS D'INNOVATIONS

Reports of innovation

Projets de physique et simulation numérique en licence de physique : compte rendu d'innovation

Projects in physics and numerical simulation in «licence de physique» (3 years university) : report of innovation

Jacques LE BOURLOT

Université Denis Diderot - Paris 7
DAEC, Observatoire de Paris, section de Meudon
92195 Meudon cedex, France.

Résumé

L'université Denis Diderot propose, en licence de physique, un module optionnel de modélisation et simulation numérique. Les étudiants peuvent ainsi aborder un problème de physique (quelconque) sur une durée assez longue (un semestre) et avec des outils permettant de dépasser la présentation axiomatique et scolaire habituelle de la physique. Ils apprennent ainsi à formaliser un problème, à émettre, tester et éventuellement rejeter des hypothèses, et découvrent par la pratique que la physique n'est pas une science achevée et qu'il est souvent utile de comparer plusieurs approches complémentaires d'une même question. Au passage, ils acquièrent la maîtrise de techniques utiles à tout physicien : maniement des outils

informatiques, rudiments d'analyse numérique et de programmation, bibliographie et travail en équipe.

Mots clés : *physique, modélisation, projets.*

Abstract

Denis Diderot University (Paris 7) offers a pre-graduate optional one-semester physics course devoted to computational physics and simulations. Students tackle a full scale physical problem in real life conditions using tools unavailable during usual theoretical courses. They learn to set up a question and to formulate, test and reject hypotheses. They discover through experience that physics is still a lively and evolving science, and that different points of view help uncover various aspects of a problem. Meanwhile, they learn various skills useful to any physicist : a practical use of computers, introductory level numerical analysis, bibliography and team work.

Key words : *physics, modelling, projects.*

Resumen

La Universidad Denis Diderot propone, en "licencia de física" (sistema francés), una enseñanza opcional de modelización y simulación numérica. Así pueden los estudiantes tratar una cuestión de física (cualquiera que sea) durante un período bastante largo (un semestre) y con instrumentos que les permitan ir más allá de la presentación axiomática y escolar habitual de las ciencias físicas. De esta manera, aprenden a "formalizar" un problema, formular, controlar y eventualmente rechazar una hipótesis, y descubren por la práctica que las ciencias físicas no son una disciplina acabada, y que a menudo resulta útil comparar varios planteamientos complementarios de una misma cuestión. De paso, adquieren la dominación de técnicas útiles a todo físico : manejo de material informático, bases en análisis numérica y en programación, bibliografía y trabajo de equipo.

Palabras claves : *física, modelización, proyectos.*

1. INTRODUCTION

Il est banal de constater que la pratique de la physique s'écarte sensiblement de la manière dont elle est enseignée. L'aller-retour permanent entre les faits expérimentaux et leur interprétation, le progrès par essais et erreurs sont loin des exercices types, bien calibrés et à solution unique que les étudiants travaillent habituellement en travaux dirigés (TD).

L'introduction de travaux pratiques, pour utile qu'elle soit, ne résout pas le problème. En effet, une après-midi de travail permet tout juste d'utiliser une expérience déjà montée (une boîte noire), mais rarement de

comprendre son fonctionnement détaillé, et jamais les motivations qui ont conduit à choisir tel ou tel arrangement précis au détriment d'un autre, *a priori* aussi raisonnable.

L'introduction de «projets expérimentaux» dans la plupart des cursus universitaires répond en partie à ce souci de confronter les étudiants à la pratique vivante d'une discipline. En travaillant plusieurs semaines sur un même sujet, ils peuvent le découvrir progressivement, monter eux-mêmes les expériences nécessaires et, surtout, assimiler progressivement les notions nouvelles qu'ils auront découvertes.

Le projet purement expérimental laisse cependant de côté un aspect de plus en plus important de l'activité des physiciens aujourd'hui. En effet, qu'il s'agisse d'expérimentateurs ou de théoriciens, il est rare de rencontrer des scientifiques qui n'utilisent jamais, à un titre ou un autre, un ordinateur. Que ce soit pour l'acquisition de données expérimentales, leur traitement statistique, pour accélérer un petit calcul d'ordre de grandeur ou au contraire développer un modèle lourd au sein d'une équipe, une certaine familiarité avec la pratique du numérique fait maintenant partie du bagage obligatoire de l'honnête scientifique au même titre que l'anglais ou les techniques de recherche bibliographiques.

Tenter d'enseigner ce type de connaissance dans l'absolu, lors d'une série de cours magistraux, est aussi absurde que de vouloir apprendre à nager par correspondance. La pratique seule, concrète et répétée, peut permettre de dépasser l'appréhension qu'ont beaucoup d'étudiants face à un clavier et un écran (malgré le nombre toujours croissant de ceux qui ont un micro-ordinateur chez eux), et d'atteindre le stade où cet outil aide à acquérir des connaissances nouvelles, en physique ou dans d'autres disciplines.

Un module de projet se prête bien à ces différents objectifs. En proposant aux étudiants de travailler quatre mois sur un même sujet, on peut se permettre d'aborder des problèmes plus réalistes, dont l'étude est impossible dans le cadre restreint d'un TD. En choisissant d'étudier ces problèmes à l'aide de l'outil numérique, on s'affranchit également des contraintes expérimentales : coût du matériel, difficultés techniques, temps.

Les difficultés intrinsèques à la simulation numérique ne se laissent cependant pas oublier. Au-delà du langage de programmation lui-même et de l'utilisation des logiciels et du matériel, il faut des semaines (voire des années) pour acquérir l'esprit critique nécessaire à l'interprétation de résultats bruts : il n'est que trop tentant de croire qu'un résultat est vrai parce que «l'ordinateur l'a dit». Cet article fait le bilan d'une telle expérience de projets de «physique et simulation numérique» en licence de physique.

2. DESCRIPTION

Notre expérience en matière de projets de simulation numérique s'étend sur six ans. Les projets se déroulent sur un semestre, à raison de deux demi-journées par semaine avec les enseignants. Les étudiants travaillent en binôme et disposent d'un accès à des stations de travail UNIX (IBM RS/6000) *via* des terminaux X. Ces terminaux sont accessibles en libre service en dehors des heures de cours. Le déroulement du semestre est le suivant :

– **première séance** : présentation des sujets par les enseignants et choix par les étudiants. Dans la mesure du possible une liste de sujets a été distribuée à l'avance,

– **semaines 1 à 3** : en parallèle, prise en main du matériel pour les étudiants qui ne le connaissent pas, et surtout analyse «théorique» du problème physique (bibliographie, mise en équations, choix de paramètres) afin de bien cerner et préciser la question posée. Les étudiants présentent alors, devant l'ensemble du groupe, un exposé d'une vingtaine de minutes, décrivant la problématique et comment ils ont l'intention de travailler. Cet exposé permet de vérifier qu'ils ont bien compris ce que l'on attend d'eux (les questions des autres étudiants sont, à cet égard, très éclairantes), et constitue, également, un exercice de présentation orale que la plupart dominant encore très mal,

– **semaines 4 à 10** : construction du modèle numérique, tests, validations. Les imprévus sont en général nombreux, et il n'est pas rare qu'il soit nécessaire de réorienter légèrement le sujet en fonction des difficultés rencontrées. Un deuxième exposé, présentant les résultats provisoires, permet de préparer la soutenance finale et de détecter les défauts de présentation majeurs. Cet exposé n'est pas noté afin de limiter le «trac» des étudiants,

– **semaines 11 à 13** : exploitation du modèle et rédaction du rapport. C'est le moment où l'on peut réellement «faire de la physique» et aller au-delà de ce que l'on aborde habituellement en licence. Dans quelques cas favorables, les étudiants peuvent également rencontrer des spécialistes du problème étudié (dans leurs laboratoires). Une soutenance d'une demi-heure (notée) et la remise d'un rapport concluent le module. De façon très classique, les résultats les plus intéressants sont souvent obtenus la veille au soir de la soutenance, et beaucoup d'étudiants se plaignent d'avoir manqué de temps.

Techniquement, la plupart des étudiants ont, au départ, des connaissances à peu près nulles en matière de programmation ou même

d'utilisation du matériel. Lorsque les projets se déroulent au deuxième semestre, on peut profiter du premier pour inciter les élèves à s'auto-former s'il n'y a pas d'enseignement spécifique de prévu. Si les projets démarrent dès la rentrée, on est contraint de s'attaquer simultanément au fond et à la forme, ce qui demande un effort important de la part des étudiants et limite significativement les objectifs que l'on peut se donner.

Nous n'imposons pas de langage de programmation particulier : si les étudiants en connaissent un, ils l'utilisent. Le travail d'apprentissage est diminué d'autant. S'ils n'en connaissent pas, le choix se porte le plus souvent sur «Pascal» qui reste répandu en premier cycle (et donc évoque «quelque chose» pour beaucoup). Nous avons, depuis l'origine, la tentation d'imposer le C à tous, mais l'effort nécessaire nous a toujours paru trop important.

Indépendamment du langage, l'accent est mis sur la nécessité de structurer le programme en isolant soigneusement les parties spécifiques au problème (entrées-sorties) des outils généraux (algorithmes numériques), en commentant au mieux le code numérique, et en gardant une syntaxe et une présentation cohérente du début à la fin du texte du programme. La pratique montre que ces efforts restent souvent des vœux pieux : ce n'est que le jour où ils ne comprennent plus eux-mêmes ce qu'ils ont écrit que les étudiants admettent que l'effort demandé est une nécessité vitale et non une perte de temps.

Nous travaillons sur des terminaux X reliés à un serveur UNIX (IBM RS/6000). Passée la période d'accoutumance à un système d'exploitation complexe, ceci présente un double avantage. D'une part, la compétence technique ainsi acquise est directement valorisable auprès d'un employeur éventuel (ce type de poste de travail constitue un standard du marché). D'autre part, il existe toute une gamme d'outils d'analyse et de traitement dans le domaine public, ce qui permet de disposer de moyens sophistiqués pour un coût défiant toute concurrence. Concrètement, nous utilisons «gnuplot» ou «xmgr» pour les tracés de graphiques, «LaTeX» pour la rédaction et présentation de rapports (ce dernier est facultatif étant donné l'effort d'apprentissage nécessaire), les bibliothèques numériques standard peuvent être explorées sur le «Web» grâce à «Netscape» (procédures tirées de Mathews (1992), voire de la «netlib» pour les cas les plus difficiles).

Afin de pallier le manque d'enseignement spécifique, toutes les informations nécessaires au bon déroulement du projet ont été rassemblées sur un serveur «Web» accessible à tous (<http://ibm4.cicrp.jussieu.fr/~lebourlo>). On y trouve un manuel de prise en main de base (rudiments d'UNIX, éditeur «vi», une bibliographie, une introduction à l'analyse numérique), des pointeurs vers d'autres ressources similaires sur le «Web»,

les informations pratiques sur l'année en cours (calendrier, liste des étudiants), et quelques projets réalisés les années précédentes.

3. CHOIX DES SUJETS

Nous n'imposons que deux contraintes dans le choix des sujets : un sujet ne doit pas avoir été traité auparavant (contrainte de nouveauté), un enseignant, au moins, doit se sentir apte à le dominer correctement (contrainte de viabilité). La deuxième contrainte se comprend aisément : il n'est pas raisonnable d'entraîner des étudiants de licence dans des domaines aventureux qui, soit font appel à des connaissances très spécialisées (par exemple : calcul de structure par éléments finis), soit auraient l'ampleur d'une thèse. La première se révèle une nécessité à l'usage : face à un sujet qu'il connaît déjà, dont il a éventuellement une solution dans ses archives, l'enseignant se montre trop pressé et trop directif. Très rapidement les étudiants prennent une attitude passive et se contentent d'appliquer des recettes dont ils n'ont pas eu l'initiative et dont ils ne voient pas forcément la motivation. En revanche, face à un sujet neuf, les hésitations (voire les erreurs) de l'enseignant laissent à l'étudiant la possibilité d'apporter des idées originales et de choisir l'orientation que prend son projet.

Cette obligation de se renouveler chaque année oblige, bien sûr, l'enseignant à rassembler en permanence de nouvelles idées et de nouveaux sujets. Les sources sont multiples mais rentrent pour la plupart dans quatre grandes catégories :

- articles de journaux scientifiques : «Pour la science», «American journal of physics», «Journal des physiciens», etc.,
- ouvrages spécialisés : par exemple «Gould & Tobochnik» (1996), ou «Eminyan & Rubin» (1994),
- travaux de recherche personnels : sous une forme simplifiée, évidemment,
- enseignement : version élaborée de problèmes d'examens ou de TD.

Un peu d'imagination est souvent nécessaire pour extraire une question simple et stimulante d'un problème trop complexe s'il est pris dans toute sa généralité.

(Une liste partielle de sujets traités ces dernières années est donnée en annexe.)

On peut distinguer quelques grands types de sujets qui montrent qu'en fait un petit nombre seulement d'outils numériques est nécessaire.

A) Problèmes se ramenant à un système d'équations différentielles

C'est le champ d'application par excellence de la mécanique classique (problème à trois corps, voile solaire, pendules variés, gyroscopes, etc.), mais aussi de la cinétique chimique, de l'optique géométrique en milieu inhomogène, etc.

L'outil de base est un bon intégrateur à pas variable (un Runge-Kutta est souvent suffisant) en étant attentif à deux difficultés numériques possibles :

- le système d'équation peut être «raide», ce qui nécessite un algorithme spécifique (et un peu d'expérience de la part de l'enseignant),
- d'éventuelles intégrales premières du système peuvent être délicates à conserver (cas de la mécanique céleste où, là encore, il existe des algorithmes spécifiques).

B) Problèmes basés sur une méthode statistique

C'est le cas, bien sûr, de la physique statistique proprement dite (marche au hasard, etc.), mais aussi de tous les problèmes abordables par des méthodes de type «Monte-Carlo». Nous avons ainsi traité la formation de halos atmosphériques par diffraction dans des cristaux de glace orientés aléatoirement dans la haute atmosphère.

C) Problèmes à base d'automates cellulaires ou de systèmes sur réseau

Techniquement très simples, ces outils permettent d'aborder beaucoup de problèmes (souvent à la pointe de la recherche) de façon intuitive. Par exemple, les feux de forêts (modèle de percolation) ou les mécanismes de réaction-diffusion qui sont à l'origine des motifs tachetés des pelages se modélisent très bien de cette façon.

Nous avons choisi de n'accepter qu'exceptionnellement des problèmes faisant appel à des systèmes d'équations aux dérivées partielles (fluides, transferts). L'aspect proprement numérique est trop lourd pour le peu d'expérience de nos étudiants et ces problèmes ne devraient être réservés, au plus tôt, qu'à une fin de maîtrise.

4. CONCLUSION

Le bilan est très positif : les étudiants apprécient l'autonomie qui leur est laissée et se passionnent généralement pour leur sujet. À plus long terme, l'expérience qu'ils ont acquise est souvent utile aussi bien dans le reste de leur second cycle que comme élément de réflexion au moment de choisir leur orientation définitive. C'est également un élément apprécié par beaucoup de responsables de DEA.

Il faut, cependant, bien évaluer le prix à payer pour un tel module. Nous avons la chance, à l'université Paris 7, de pouvoir profiter des services du CICRP (Centre Interrégional de Calcul de la Région Parisienne), qui nous fournit «clé en main» les services informatiques dont nous avons besoin (maintenance logicielle, salles en libre-service, etc.). C'est un travail de professionnel, qu'un enseignant ne peut assurer seul au-delà d'une vingtaine d'étudiants. Malgré tout, il n'est pas rare que les projets les plus ambitieux saturent la puissance de calcul disponible. Une bonne gestion des ressources relève alors autant de la diplomatie que de la technique, et la difficulté croît très vite quand le nombre d'étudiants augmente.

L'investissement en temps des étudiants eux-mêmes est, paradoxalement, parfois excessif. Profitant du libre-service ou de micro-ordinateurs personnels, certains en viennent à négliger les autres enseignements, avec des résultats globaux très dommageables. Ce phénomène reste minoritaire, mais ne doit pas être oublié.

Enfin, la principale contrainte reste l'absence de formation initiale des étudiants aux techniques de programmation et aux méthodes de l'analyse numérique. Ils sont ainsi trop souvent bloqués par des problèmes de forme qui les empêchent de s'intéresser au fond. Dans un monde scolaire idéal, cette formation préalable devrait être acquise dès le DEUG (dans le cadre d'un module de mathématiques appliquées, par exemple).

S'il faut exprimer un regret, il concerne certainement, pour l'instant, l'isolement relatif dans lequel ces projets se sont déroulés. De nombreux problèmes abordés se prêtent aussi bien à l'expérimentation traditionnelle qu'à une modélisation numérique. Nous n'avons pu qu'exceptionnellement proposer le même sujet à un binôme d'expérimentateurs et à un binôme de numériciens. La confrontation est cependant passionnante, et la synergie éclairante pour tout le monde, y compris les enseignants. C'est dans cette voie que nous cherchons à faire évoluer cet enseignement.

BIBLIOGRAPHIE

- EMINYAN M. & RUBIN K. (1994). *Introduction à la simulation des systèmes physiques*. Paris, InterÉditions.
- GOULD H. & TOBOCHNIK J. (1996). *An introduction to computer simulation methods - Applications to physical systems*. Paris, Addison-Wesley Pub. Co.
- MATHEWS H. (1992). *Numerical methods for mathematics, science and engineering*. Londres, Prentice Hall.

REMERCIEMENTS

Cette expérience pédagogique est le fruit d'un travail d'équipe. Elle doit en particulier beaucoup à Gérard Rebmann (université Paris 7) que je remercie de m'avoir initié à ce type de problèmes.

ANNEXE

Exemples de sujets traités

- modèle statistique de la conduction thermique,
- configuration à l'équilibre d'un polymère en solution diluée,
- tracé d'un faisceau laser à l'interface entre deux liquides diffusant l'un dans l'autre,
- rebond d'une balle sur un sol oscillant et chaos,
- modélisation par automate cellulaire de la formation de spirales dans une galaxie,
- le régulateur à boules,
- le refroidissement d'atomes par lasers,
- le billard ovale,
- le modèle d'Ising du ferromagnétisme,
- la voile solaire,
- dynamique d'une population d'insectes,
- propagation d'un paquet d'ondes quantique Gaussien 2D,
- écoulement hydrodynamique par gaz sur réseau,
- croissance de dendrites,

- dynamique d'un pendule magnétique,
- mouvement d'une boussole dans un champ magnétique oscillant,
- croissance de spirales végétales,
- y-a-t'il criticalité auto-organisée dans le jeu de la vie ?,
- les halos atmosphériques.

Un stage «Communication scientifique» pour les moniteurs de l'enseignement supérieur : compte rendu d'innovation

Training in communication skills for PhD students : report of innovation

Gérard TORCHET

Laboratoire de Physique des Solides
Bâtiment 510
Université Paris-Sud
91405 Orsay cedex, France.

Résumé

Un stage de formation à la communication est proposé depuis plusieurs années aux moniteurs scientifiques du Centre d'Initiation à l'Enseignement Supérieur (CIES) de l'académie de Versailles. Divers types de communication scientifique sont abordés par le biais de conférences-débats, mais la majeure partie du stage est consacrée à l'élaboration, par chaque moniteur, d'une affiche présentant son sujet de thèse. Ces affiches, qui doivent être compréhensibles par les moniteurs de toutes les disciplines, sont finalement commentées oralement suivant la pratique des congrès (poster sessions).

Mots clés : *communication scientifique, vulgarisation scientifique, affiche, enseignement supérieur, pluridisciplinarité.*

Abstract

The Center for Introduction to Academic Teaching of the Versailles' Academy has, for several years, offered training in communication skills for PhD students in Science. Various aspects of scientific communication are covered but the major part of the training is devoted to the preparation, by each student, of a poster dealing with the subject of his/her thesis work. This poster, which must be comprehensible to students in other scientific fields, is the basis for an oral presentation like those in the poster sessions at scientific meetings.

Key words : *scientific communication, scientific popularization, poster, academic teaching, pluridisciplinarity.*

Resumen

El Centro de Iniciación a la Enseñanza Superior de la academia de Versailles propone desde hace años una estancia sobre comunicación a los estudiantes que preparan un doctorado científico. Se consideran varios aspectos de la comunicación científica pero la mayor parte de la estancia consiste en la elaboración, por cada estudiante, de un póster tratando de su trabajo de tesis. El póster, que debe ser comprensible para los estudiantes de las otras especialidades científicas, esta la base de una presentación oral, tal y como se practica en los congresos científicos.

Palabras claves : *comunicación científica, divulgación científica, póster, enseñanza superior, pluridisciplinaridad.*

1. LES MONITEURS SCIENTIFIQUES DU CIES DE L'ACADÉMIE DE VERSAILLES

Pendant la durée de leur thèse, en principe trois ans, les moniteurs effectuent un service d'enseignement égal, chaque année, au tiers de celui d'un maître de conférences. Ils reçoivent une rétribution qui vient en complément de leur allocation de recherche. Ils bénéficient en outre, à raison d'une dizaine de jours par an, d'une formation à l'enseignement supérieur – c'est là l'originalité du monitorat – sous forme de stages organisés par le CIES. Une équipe pédagogique s'est constituée à Orsay, composée d'enseignants-chercheurs en biologie, chimie, géologie, informatique, mathématiques et physique. Cette équipe a la responsabilité d'organiser et d'animer, le cas échéant, les stages destinés aux moniteurs des disciplines scientifiques répartis dans divers établissements de l'académie : universités de Cergy-Pontoise, Versailles-St Quentin-en-Yvelines, Paris-Sud, Évry-Val-d'Essonne et, en partie, Nanterre, École Normale Supérieure de Cachan, Écoles Centrale et Polytechnique.

Le stage décrit dans cet article s'adresse aux moniteurs de deuxième et troisième années et est suivi, en totalité, par une cinquantaine d'entre eux.

2. PLURIDISCIPLINARITÉ ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES

Exposer par affiche son travail de thèse, telle était la proposition d'atelier pluridisciplinaire, faite par un moniteur physicien, à la suite d'une rencontre sur «l'utilisation des mathématiques dans les autres disciplines». L'idée fut étoffée en y ajoutant la conception et la réalisation, sur place, de l'affiche. Avec les suggestions de collègues et de quelques moniteurs, l'ensemble a pris la forme d'un stage auquel, après quelques années de fonctionnement, on peut assigner trois objectifs principaux :

- depuis la création du monitorat, en 1989, les moniteurs demandent qu'une place importante soit accordée aux rencontres pluridisciplinaires. Au delà d'une information sur la diversité des sujets de thèse, ce stage vise à favoriser un échange sur les pratiques de recherche des laboratoires et des disciplines,

- la diffusion des connaissances fait partie des missions des chercheurs et des enseignants-chercheurs. Ce stage permet d'apprécier concrètement la difficulté de la tâche, dès que l'on sort du domaine restreint de sa spécialité. Composé de spécialistes de disciplines variées, le public du stage n'est, en fait, pas très éloigné de ce «grand public» qui va généralement de pair avec l'idée de vulgarisation. Étant donné l'éventail et le caractère **pointu** des sujets abordés, chaque étudiant se trouve, tour à tour, auteur et destinataire d'un travail de vulgarisation,

- l'utilisation d'affiches comme support de communication est maintenant généralisée dans la plupart des congrès scientifiques. Ce stage se propose de fournir une méthodologie pour élaborer une affiche et de rendre ainsi l'étudiant autonome par rapport aux habitudes de son entourage.

3. LES SIX SÉQUENCES DU STAGE

Le stage dure trois jours consécutifs. Les moniteurs n'ont aucun travail préalable à effectuer. Ils reçoivent, en même temps que la convocation, des indications sur le but à atteindre et sur le contenu des six demi-journées dont l'organisation est détaillée ci-après.

Les membres de l'équipe pédagogique pluridisciplinaire participent, suivant leur disponibilité, à tout ou partie des activités. Même si leur

assistance scientifique est parfois sollicitée, pour le choix d'un mot, d'un titre, ou pour un avis sur une mise en page, leur rôle consiste surtout à assurer l'organisation matérielle du stage (constitution des groupes, préparation du matériel, etc.) car les moniteurs savent rapidement se prendre en charge.

3.1. Séquence n  1

Deux conférences-débats introduisent certains aspects de la communication scientifique :

– «la vulgarisation scientifique : besoins, formation et réalisations», par un membre du centre de vulgarisation de la connaissance (CVC 11, université Paris-Sud). Le débat permet, en particulier, d'établir une liste des raisons qui peuvent pousser les scientifiques à vulgariser leur travaux ;

– un journaliste scientifique apporte son témoignage. Qu'ils aient fait des études scientifiques ou non, les intervenants insistent toujours sur le fait qu'ils sont avant tout journalistes. Le débat tourne autour des contraintes de la profession, des relations entre journalistes et chercheurs et de la place de la science dans les média. Les possibilités d'accès à ce métier sont aussi abordées. Les journalistes invités jusqu'à présent venaient de la presse écrite : *Libération*, *Sciences actualités La Villette*, *Eur ka*, *Le Monde*.

3.2. Séquence n  2

Des groupes pluridisciplinaires, de 6   8 étudiants, sont constitués. Chaque moniteur expose oralement son sujet de thèse, pendant environ 20 minutes, en s'aidant d'un tableau-papier. Il est convenu que chaque auditeur peut (et doit) demander des explications dès qu'un mot, une méthode ou un concept lui sont inconnus. C'est aussi l'occasion de vérifier que des mots tels que «phase», «modèle», «variété» ou «fonction» n'ont pas le même sens, selon les spécialités. Le groupe aide ainsi chacun à déterminer les quelques idées directrices à retenir pour son affiche, les mots clés qu'il convient d'explicitier et ceux qu'il vaut mieux abandonner, ou encore les images et les analogies facilitant la compréhension. Pour certains sujets très abstraits, il peut apparaître que seule la **problématique** de l'équipe de recherche, voire de la spécialité, soit susceptible d'être présentée. Au cours des échanges, les étudiants sont parfois surpris de constater que des techniques ou des concepts semblables sont utilisés pour aborder des sujets *a priori* complètement différents.

Gr ce à ce travail en petits groupes, chaque étudiant a pu identifier les informations que son affiche doit contenir pour avoir des chances d'être comprise par l'ensemble des participants au stage.

3.3. Séquence n° 3

Une conférence (par l'auteur de ces lignes) présente quelques aspects généraux de la communication et précise la spécificité et les modalités de la communication scientifique. Quelques règles à suivre pour la réalisation de l'affiche sont suggérées, dont certaines sont transposables à la réalisation de transparents : l'organisation des informations suivant un parcours logique, la mise en évidence initiale des résultats, le choix de titres apportant une information, l'utilisation des figures et tableaux, ou encore l'importance des « blancs ». Il convient d'insister sur la structuration d'un espace à deux dimensions, destiné d'abord à être vu, alors que les étudiants sont plutôt habitués à rédiger des textes destinés à être lus. Cette conférence s'inspire largement des idées qui ont donné naissance au concept de *fiche synoptique de synthèse* (Pétroff, 1995).

Chaque moniteur réalise ensuite une (ou plusieurs) maquette(s) de son affiche en format réduit (A4). Les groupes pluridisciplinaires sont reconstitués, ce qui permet à chacun de vérifier que les informations retenues demeurent compréhensibles par tous. Comme lors des exposés oraux, le rôle du groupe, qui constitue un échantillon du public, est déterminant.

3.4. Séquence n° 4

Vient alors la réalisation de l'affiche (1,0 m x 1,2 m environ). Feuilles de papier (blanc) et marqueurs (3 couleurs) sont mis à disposition. Cette étape dure environ 3 heures, le temps nécessaire dépendant étroitement de la qualité de la maquette et des aptitudes, très variées, à l'écriture et au dessin à main levée. Il est clair qu'un traitement de texte pourrait, dans certains cas, améliorer la lisibilité des textes (courts), mais n'aiderait pas à structurer l'affiche de façon logique, plaisante et, pourquoi pas, originale.

Les affiches sont installées sur des panneaux en évitant les regroupements disciplinaires.

3.5. Séquence n° 5

Pendant la matinée, une moitié des moniteurs présente son travail alors que l'autre moitié circule d'affiche en affiche, à la manière des congressistes.

Lors de l'examen d'une affiche, le moniteur-spectateur dispose d'une fiche sur laquelle il indique sa propre discipline et évalue la clarté du contenu, du langage utilisé sur l'affiche et du commentaire oral de l'auteur.

Ce dernier prend connaissance de cette évaluation dès qu'elle a été effectuée.

3.6. Séquence n  6

L'après-midi, les rôles des deux moitiés du public sont inversés.

4. ÉVALUATION DES AFFICHES PAR LES MONITEURS

Les titres des affiches, les noms des auteurs ainsi que les évaluations et commentaires correspondants sont diffusés à tous les participants, quelques semaines après le stage.

Le contenu des fiches d'évaluation n'est pas surprenant : le public apprécie les affiches aérées et illustrées ainsi que les exposés oraux clairs et enthousiastes. Les critiques négatives vont aux affiches surchargées, au manque de dessins ou au vocabulaire trop complexe. Certaines appréciations sont nuancées : «*Affiche peu attractive. Super commentaires*». Quelquefois, le commentaire est plus précis :

– «**marche vers le chaos**» (affiche en physique) :

«*Sujet présenté de façon progressive, illustré avec différents domaines d'application, ce qui attire l'intérêt.*» (commentaire en biologie),
«*Peut-être une possibilité d'un rapprochement maths/physique*» (commentaire en physique) ;

– «**stabilisation de collo ides hydrophobes dans l'eau grâce à des polymères associatifs**» (affiche en chimie) :

«*Intéressant de voir comment travaillent les chimistes et les applications possibles en biologie.*» (commentaire en biologie) ;

– «**génération de traces pour la simulation de processeurs superscalaires**» (affiche en informatique) :

«*J'ai mieux compris un outil que j'utilise tous les jours mais qui restait plus qu'une boîte noire.*» (commentaire en biologie) ;

– «**stimulation de la thyro ide**» (affiche en biologie) :

«*Veut à tout prix qu'on se souvienne de ses cours de bio de terminale. Sinon très bien.*» (commentaire en physique).

5. ÉVALUATION DU STAGE PAR LES MONITEURS

Il n'a paru ni opportun ni pratiquement réalisable de distribuer un questionnaire d'évaluation en fin de stage, alors qu'était déjà demandée l'évaluation des affiches. L'ambiance studieuse et conviviale de ces trois jours prouve, au moins, que les participants sont intéressés. De plus, des commentaires explicites figurent, mais pas systématiquement, dans les rapports de fin d'année que les moniteurs doivent rédiger sur l'enseignement effectué, les stages suivis, et le profit qu'ils ont pu en tirer. Quand elles existent, ces remarques, écrites plusieurs mois après le stage, montrent que plusieurs objectifs ont été atteints. On constate, d'autre part, que les appréciations diffèrent peu selon les disciplines. Les citations suivantes en fournissent un aperçu.

«Je dois dire d'abord que j'ai remarqué que certains thésards ont été vraiment emballés par l'idée et ont fait des affiches à la fois artistiques et pédagogiques qui m'ont beaucoup impressionnée. Pour moi, le simple accès à ces affiches justifiait largement l'intérêt du stage. Sans compter l'intérêt de connaître ce qui est dans le vent en termes de recherche scientifique dans un sens large. J'ai fait ce stage au début à reculons car je ne savais pas en fait comment vulgariser mon sujet. Une fois le travail fait, j'ai réalisé qu'il m'a permis d'ancrer dans ma tête quelques points didactiques sur ma recherche, et j'ai trouvé la démarche fort utile.» (remarque en informatique)

«Cela permet de remettre en cause et d'améliorer ma manière de présenter/expliquer des sujets scientifiques difficiles aux personnes qui sont novices en la matière, notamment mon sujet de thèse.» (remarque en informatique)

«La demi-journée au cours de laquelle des groupes de 5 ou 6 d'entre nous, tous de disciplines différentes, se sont réunis pour tenter d'expliquer aux autres sur quoi portait leur thèse s'est révélé un exercice tellement intéressant que nous avons organisé plusieurs séances du même genre, par la suite, entre thésards de disciplines différentes.» (remarque en informatique)

«De façon anecdotique, ce stage m'a permis d'apprendre que la présentation des résultats ne se déroule pas du tout de la même façon selon les disciplines. Il m'a aussi permis de voir le travail que nécessite la vulgarisation scientifique, même si en biologie elle est plus facile que pour d'autres matières, car plus répandue aussi, et de m'apercevoir qu'elle s'effectuait un peu au détriment de la présentation détaillée du sujet.» (remarque en biologie)

«Ce stage m'a semblé très formateur car il m'a permis de communiquer avec des moniteurs d'autres disciplines. J'ai beaucoup aimé le fait de parler de son sujet à l'oral, puis au travers de l'affiche. L'évaluation des affiches et le fait d'être évalué à son tour permet d'avoir un retour du travail effectué.» (remarque en biologie)

«Le stage était un très bon exercice de résumé du travail de recherche. Il m'a permis, personnellement, de prendre un certain recul par rapport à mon travail, de simplifier la rédaction de l'introduction générale de ma thèse et de la réintégrer dans le vaste domaine de la biologie.» (remarque en biologie)

«Ce stage est vraiment très utile pour apprendre à évaluer le niveau et les connaissances de son public, et à réfléchir sur la manière de s'adapter à lui ; mais outre son objectif d'initiation à la vulgarisation et à la communication, ce stage a présenté pour moi un autre intérêt : présenter mon travail de thèse devant un public scientifique (donc rigoureux, on peut l'espérer !) mais "débutant" en la matière m'a permis de prendre un recul qu'il n'est pas facile d'avoir lorsqu'on discute avec des chercheurs dans le même domaine ; j'ai d'ailleurs eu droit à des questions qui paraissaient «triviales» mais n'étaient pas toujours dénuées d'intérêt... Dommage seulement qu'il n'y ait pas eu plus de retour d'appréciations.» (remarque en biologie)

«J'ai apprécié le stage car la vulgarisation est un problème permanent tant en enseignement qu'en recherche. Mais c'est dur pour moi de me débrouiller avec du papier et des crayons : je suis informaticienne.»

«Ce qui était un vrai plaisir, c'était de voir les moniteurs présenter leur affiche : tous des passionnés qui avaient une réelle envie de communiquer.» (remarque en informatique)

«La présentation sur affiche de son activité de recherche à des moniteurs d'autres filières apporte beaucoup en termes de pédagogique. Le stage m'a permis d'améliorer notablement mes affiches et même de clarifier certaines choses vis-à-vis de ma thèse.» (remarque en physique)

«J'ai beaucoup apprécié ce stage qui constitue pour moi l'exemple même de ce qu'il faut faire en formation pédagogique, à savoir une approche pragmatique, fondée sur l'exemple, directement orientée vers un but concret. Bien qu'étant théoricien, je trouve que la formation pédagogique se prête mal à toute théorisation trop formelle. [...] Par la réalisation pratique d'affiches individuelles enrichie par des discussions animées au sein de petits groupes, nous avons pu profiter du regard des autres, ce qui fait trop souvent défaut lorsque l'on essaie de faire passer un message. Les solutions adoptées par chacun, en fonction de sa personnalité et du sujet abordé peuvent être très satisfaisantes tout en étant, on l'a vu, très différentes.» (remarque en physique)

6. COMMUNIQUER : LE PROPRE DE L'ENSEIGNANT-CHERCHEUR

Une grande partie des activités proposées par le CIES vise à améliorer la transmission de connaissances établies ou en cours d'élaboration. Il faut cependant noter que la conception des stages a progressivement évolué au cours des dernières années. En effet, plus que leurs aînés, les futurs candidats à un poste d'enseignant-chercheur sont très sensibles aux cloisonnements vécus habituellement dans l'enseignement supérieur, entre équipes d'enseignement ou de recherche, entre filières d'études ou laboratoires, et bien sûr, entre disciplines – ce qui se conçoit, à la rigueur, entre laboratoires de recherche, mais moins à l'intérieur d'équipes d'enseignement –. Le stage «affiches» a rencontré un écho favorable car il répondait à l'attente (justifiée) d'ouverture de la part des moniteurs. Par la suite, d'autres stages ont été conçus en favorisant une approche pluri- ou inter- disciplinaire (connaissances des bacheliers, histoire des sciences, théâtre, techniques audio-visuelles, etc.)

Le choix de l'affiche comme support de communication peut provoquer des réticences. Les remarques qui suivent montrent qu'elles ne paraissent pas insurmontables.

Dans la plupart des disciplines scientifiques, apprendre à faire une affiche ou un transparent constitue une formation directement utilisable par un moniteur, qu'il s'agisse de congrès, de soutenances de thèse ou d'auditions par une commission de recrutement. Ce n'est cependant pas le cas des mathématiques «pures» dont beaucoup pensent qu'il est impossible de les vulgariser et dont l'habituel support visuel est le tableau noir. Certains étudiants mathématiciens acceptent de participer au stage sans réaliser ou exposer une affiche, d'autres parviennent, aux prix d'images ou de métaphores originales, à faire entrevoir un aspect de leur travail. Aucun ne semble être sorti déçu de cette expérience.

Dans les disciplines qui n'appartiennent pas aux sciences «dures», la communication orale utilise rarement les supports visuels – une tradition qui pourrait évoluer puisqu'un colloque de philosophie avec affiches s'est tenu l'année dernière, en France –. Quelques moniteurs de ces disciplines (littérature contemporaine, sciences politiques ou économiques) se sont joints récemment à leurs collègues scientifiques, et tous ont apprécié cette participation. Au printemps 1997, une version concentrée du stage (trois demi-journées) a été intégrée à une semaine de formation destinée aux moniteurs des universités de l'Ouest (CIES du Grand Ouest, Rennes). Sur les 83 affiches réalisées, 20 % environ ont été produites par des moniteurs «non scientifiques». Au début du stage, certains d'entre eux ont critiqué une

activité qui ne leur était, disaient-ils, d'aucune utilité pratique. L'ambiance générale et le travail en petits groupes aidant, ils ont réalisé des affiches parfois très originales, ce qui a été remarqué par les scientifiques. En outre, les discussions ont pu faire apparaître concrètement les conditions de travail très différentes des thésards dans les diverses disciplines représentées.

Il est clair que la barrière du langage spécialisé s'élève en même temps que s'ouvre l'éventail des disciplines. L'histoire est *a priori* plus accessible à un biologiste que la physique ne l'est à un juriste. C'est sans doute pourquoi la demande est plus forte des sciences «dures» vers, par exemple, les sciences humaines que dans le sens inverse. L'expérience, jusqu'ici limitée, montre simplement que lorsque des étudiants parlent d'un sujet qui leur tient particulièrement à cœur, à savoir «leur» sujet de thèse, une communication peut facilement s'établir entre eux. L'affiche peut n'apparaître ici que comme un prétexte. Il est pourtant permis de penser que tous, un jour, auront recours à elle, même ceux qui, dans l'immédiat, en doutent.

BIBLIOGRAPHIE

PETROFF A.-J. (1995). Structuration du savoir et communication. Le rôle de la fiche synoptique de synthèse dans les systèmes hypermédias. *Revue Informatique et Statistique dans les Sciences humaines*. Belgique, Université de Li ge, 31^e année, pp. 155-171.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier André-Jean P troff pour les nombreuses discussions que nous avons eues à Orsay, lors de la création, en 1990, d'un module de communication scientifique en maîtrise de sciences physiques. Mes remerciements vont aussi aux collègues de l'équipe pédagogique qui contribuent avec enthousiasme à la réussite de ce stage : J. Laurent (biologie), C. Pernet et A. Haudrechy (chimie), J.-M. Quenardel (géologie), V. Zissimopoulos (informatique), F. Pascal (mathématiques) et A. Sarfati (physique), ainsi qu'à J.-P. Michaut (CVC 11).

Book reviews

BERNARDINI C., TARSITANI C., VICENTINI M. (Éds) (1995). *Thinking Physics for Teaching*. New York, Plenum Press, 453 p.

Sous le titre de ce livre on découvre les actes d'une conférence qui s'est tenue à Rome en septembre 1994. La volonté des organisateurs était de faire rencontrer des physiciens et ce qu'on a l'habitude d'appeler, dans le monde francophone, des didacticiens de la physique, et que M. Vicentini appelle les «*chercheurs en enseignement de la physique*» (*researchers in physics education*). Cette rencontre devait jeter les bases d'un enseignement rénové de la physique au lycée et à l'université, enseignement qui tiendrait compte à la fois des résultats de la recherche des didacticiens et des exigences de la discipline.

Le livre comprend 40 communications sans compter le chapitre final de conclusions. La taille des articles est éminemment variable puisque le plus court fait quatre pages, tandis que le plus long en a quarante, ce qui nous amène à poser la question de la politique éditoriale choisie par les trois éditeurs. La variété des pays d'origine des articles est grande puisqu'ils sont écrits par des auteurs travaillant dans 12 pays. Toutefois 40 % des articles viennent d'Italie, ce qui se comprend mieux lorsque l'on sait que la conférence était organisée sous les auspices du Conseil National de la Recherche italien. On trouvera ensuite 6 articles américains, 3 français et 3 brésiliens.

Avant d'aborder le contenu du livre, il est nécessaire de préciser que ce livre n'a pas été relu attentivement par un anglophone, alors qu'il est publié chez un éditeur américain, car

il y subsiste de grosses fautes d'anglais dans des articles écrits par des non anglophones, dont certaines liées à la graphie italienne (*armonic* pour *harmonic*, *igrometer* pour *hygrometer*, etc.) On trouvera même une citation manquante d'une phrase de Galilée (p. 19) où l'auteur (ou les éditeurs ?) écrit en gras «*è una traduzione ? oppure trovare il testo originale*¹». Cela fait désordre ! Si un non spécialiste de l'anglais est capable de repérer de telles erreurs, cela prouve qu'elles sont vraiment flagrantes.

Au-delà de ces négligences qui ne donnent pas une bonne image du livre, à la seule question que l'on doit se poser quand il s'agit d'actes de colloque : y a-t-il du nouveau ? je répondrais «Pas vraiment» pour la communauté des didacticiens de la physique. Peut-être y a-t-il du nouveau pour les physiciens, et là je ne peux pas répondre à leur place. Les articles couvrent à la fois des questions classiques de didactique et des questions qui sont liées à un travail sur les concepts mêmes de la physique. Ainsi plusieurs articles sont relatifs à une réflexion sur l'entropie sous ses diverses variétés, sur des propositions d'enseignement de la «physique moderne» : physique quantique, relativité etc. À titre d'exemple, F. Herrmann (université de Karlsruhe) propose de remplacer l'électron particulaire par l'*électro-nium* substance continue qui entoure le noyau et dont la densité est le carré de la fonction d'onde. Quant aux articles directement reliés au travail didactique, on en retrouve sur les conceptions (il n'y a pas que de la mécanique ! les conceptions sur la physique quantique sont aussi explorées, par exemple par I. Galili de l'université d'Oxford), les raisonnements et la modélisation et des articles plus épistémologiques.

1 Y a-t-il une traduction ? ou bien trouver le texte original.

Parmi les différents articles au contenu plus didactique, il me semble que le didacticien au courant des questions de recherche ne devrait être intéressé que par bien peu d'articles. D'abord j'ai noté que les questions de modélisation sont enfin à l'ordre du jour dans le monde anglo-saxon avec l'article de D. Hestenes (université de l'état d'Arizona) où il plaide pour un enseignement basé sur des activités de modélisation et sur des modèles. Mais manifestement il ne connaît pas les travaux français sur le sujet. Un autre article au titre provocateur (*Should physicists preach what they practice? Constructive modeling in doing and learning physics*) de N.J. Nersessian (Georgia Institute of Technology), historienne des sciences, étudie à travers le cas de physiciens (par exemple, Maxwell), comment ceux-ci modélisent, quels sont les processus qu'ils mettent en jeu dans cette activité en soulignant l'importance des représentations visuelles internes ou externes dans la modélisation, et propose que cette activité centrale chez le chercheur soit introduite dans l'enseignement.

Dans un autre registre, A. Cromer de la Northeastern University (Boston) livre un article roboratif qui montre tous les dangers de «l'idéologie du constructivisme» (c'est l'expression qu'il emploie) lorsqu'il devient la référence dominante², et donc officielle, pour la construction de nouveaux curricula (National Standards in Science and Mathematics aux USA) aux dépens des références disciplinaires. Dans son article il va opposer deux communautés : les professeurs de physique, tenants d'une approche scientifique, et les *science educators*, partisans du constructivisme. Il n'a pas de mots assez durs pour fustiger le constructivisme radical qui rend l'entreprise scientifique subjective et relative. Il est bon, de temps en temps, de lire un papier d'humeur qui s'élève, avec juste raison, contre certains discours en vogue qui remettent en cause au nom du relativisme post-moderne l'approche scientifique des phénomènes étudiés à l'école.

À part ces quelques articles, le livre n'a pas grand intérêt pour le chercheur en didactique. Publié en anglais, il n'intéressera pas les

formateurs de maître qui trouveront dans la littérature francophone ce dont ils ont besoin. La question d'un nouvel enseignement de la physique à la lumière des travaux des didacticiens reste entièrement posée. Du reste, dans sa conclusion, M. Vicentini montre bien que la conférence n'a pas réglé les problèmes de communication entre les deux communautés, à savoir réconcilier les discours des physiciens et ceux des didacticiens mais optimiste, elle croit que «des graines pour une future communication ont été plantées».

M. Caillot

CHARPAK G. (1996). *La main à la pâte, les sciences à l'école primaire*. Paris, Flammarion, 160 p.

Le titre de l'ouvrage présenté par Georges Charpak (présenté, car il s'agit d'un ouvrage à plusieurs mains) évoque la cuisine ... pour faire venir l'eau à la bouche – et connote la valeur du travail – mettre la main à la pâte nécessite de remonter les manches.

Fruit d'un collectif de seize personnes (scientifiques de renommée internationale, enseignants, formateurs ; représentants des sciences expérimentales et des sciences humaines ; physiciens et biologistes), l'ouvrage «ne se veut ni une charte, ni un programme, mais un recueil d'idées fortes et simples» susceptibles «d'encourager des initiatives, de justifier des prises de risque, de lever des inhibitions bien compréhensibles et (de) voir se développer l'accompagnement dont les maîtres ont besoin pour s'engager dans cette aventure».

Un ouvrage didactique et militant qui répond aux questions du pourquoi et du comment enseigner des sciences à l'école primaire.

La première partie «Les enfants» précise les visées d'un enseignement scientifique permettant à partir d'un matériel simple, de manipuler pour comprendre et d'accéder ainsi progressivement par la compréhension du réel, à la découverte de la vérité. Comment ? En étant guidé dans les découvertes, en

² Cromer indique que le constructivisme de Glaserfeld est devenu la doctrine officielle de la NSF (National Science Foundation).

permettant d'associer l'observation, l'expérimentation et la prise de notes, en facilitant la mise à distance de l'action par le passage au compte rendu dans un journal d'expériences, dans un climat de classe rappelant le laboratoire. On ne peut qu'applaudir aux visées et aux exemples d'applications présentés. En 1970, les travaux des équipes de recherches en sciences de l'INRP, sous la responsabilité de Victor Host, parlaient de communauté de chercheurs, développaient les mêmes intentions et proposaient des mines d'activités, relayés par des ouvrages pour les instituteurs d'alors. Pourquoi, en vingt ans, ces maîtres des classes primaires n'ont-ils pas accordé aux activités scientifiques toute la place qui leur revenait ? Par manque de formation initiale peut-être, ou par défaut d'accompagnement aussi, par une insuffisante médiatisation des enjeux de société d'un enseignement scientifique, par une féminisation du corps des instituteurs fréquemment rebelle à la science, etc. Les causes ne manquent pas, auxquelles il faut ajouter une école primaire partagée entre le lire, l'écrire et le compter, considérant les autres enseignements comme secondaires, ne percevant pas la possibilité de fonder la lecture et l'écriture sur l'action vécue, déniait aux sciences un pouvoir formateur au regard des mathématiques, et bien aussi d'autres raisons auxquelles les auteurs de l'ouvrage devront se rendre attentifs pour développer leur projet volontariste. Ils en font état du reste dans la dernière partie.

La deuxième partie, «Les maîtres», tente de donner confiance aux enseignants en ne niant pas la polyvalence qui les caractérise. Au contraire, en replaçant l'enseignement scientifique dans ce contexte, on insiste sur la possibilité pour les maîtres, d'accompagner la découverte, quand bien même ils n'ont pas de réponses aux questions que les enfants se posent. On montre que l'enseignement n'a pas à choisir entre le contenu et la méthode, et que la formation attendue relève d'un accompagnement matériel, tout autant que pédagogique et conceptuel. Quelques formules clés qui illustrent ces remarques : *«polyvalence du maître, richesse de l'équipe»*, *«comme on effectue une promenade en montagne sans être alpiniste, comme on s'essaye à la musique sans être professionnel, on peut pratiquer la science sans être un*

spécialiste», *«l'enfant, un chercheur sous tutelle»*.

On retient de cette deuxième partie, simultanément un encouragement pour les enseignants à faire, à faire faire, à permettre, mais aussi une retenue car *«tous les objets ou phénomènes ne se prêtent pas également à une bonne compréhension, compte tenu de l'âge des enfants. Dans un bon sujet, grâce à une démarche d'investigation, l'enfant atteint lui-même des concepts et des théories intermédiaires. Déterminer ces sujets ne peut relever de la seule compétence des enseignants, mais nécessite un travail de recherche aboutissant à la production d'outils d'accompagnement pour le maître»*. À terme les propositions devront donc mettre en tension un encouragement des initiatives correspondant à l'imprévu de la vie de la classe, et un encadrement des propositions pour faciliter une démarche construite, voire une progression. Plus spéculativement, une question forte se pose en filigrane : comment concilier compétences (des savoir-agir réfléchis) et connaissances ? Vaste enjeu pour les didacticiens et les pédagogues.

La troisième partie, «Le monde» tente de justifier, non pas seulement un enseignement scientifique, mais une culture scientifique. Le premier est certes appropriation de savoirs légitimes vis-à-vis de disciplines préexistantes. La seconde se fixe les mêmes objectifs, mais en cherchant à replacer l'homme au sein de sa réflexion. La science vise au-delà de l'appropriation de concepts, à former des citoyens. Il ne s'agit pas uniquement de développer l'esprit de découverte, de rechercher l'émerveillement à ce qu'on rencontre, à prôner l'intention créative. Il s'agit de participer à la formation d'un homme conscient que la science a un impact sur les autres et sur le monde, qu'elle est accès à la vérité et à l'altérité. Il est écrit que la science est *«école d'objectivité»*. Nous aurions préféré école d'objectivation. Rendons l'enfant conscient des enjeux axiologiques et technologiques de la science ; ce faisant, faisons de l'enfant un citoyen du monde à travers la science, mais ne laissons pas croire que l'objectivité existe. Toute l'épistémologie contemporaine, l'histoire des sciences et la sociologie de la connaissance (de Godel à

Popper et à Habermas, de Kuhn à Stengers et à Latour) rappelle l'impossible objectivité et simultanément la nécessaire objectivation du réel.

La quatrième partie «Hier, ailleurs et aujourd'hui» rappelle l'histoire de l'enseignement scientifique en France, rapporte que, dans les enquêtes internationales, les jeunes français ont un niveau médiocre en sciences de la nature, et fait état du bouleversement de l'enseignement scientifique aux USA, largement initiateur de cette réflexion. Elle se conclut par un «lire, écrire, compter... avec les sciences», dont nous pensons pour notre part qu'il constitue l'argumentaire le plus fondamental à développer auprès des maîtres.

Un ouvrage qui doit «préparer à inventer demain» si une volonté politique forte, un accompagnement matériel, didactique et pédagogique de qualité parviennent à convaincre les instituteurs d'aujourd'hui que leur fonction, dans le prolongement de celui de leurs prédécesseurs de l'école de Jules Ferry, est de participer à l'alphabétisation à la science et par la science. La science au service de la citoyenneté : un enjeu qui pourrait fonder une nouvelle identité du métier de professeur des écoles.

M. Develay

CINI-FELTRINELLI M.(1994). *Un paradis perdu : de l'univers des lois naturelles au monde des procès évolutifs*. Roma, La Nuova Italia Editrice.

Il est de plus en plus fréquent, dans les revues de didactique des sciences, de trouver des articles qui traitent de l'importance de communiquer avec les étudiants, non seulement au sujet des contenus disciplinaires, mais aussi des informations qu'on peut donner sur les structures de la science, sur son histoire, ses procédures...

Le livre de Marcello Cini «*Un paradis perdu*», peut être considéré comme un apport appréciable tant pour des chercheurs en didactique que pour des enseignants dans le but d'alimenter leur réflexion personnelle et d'organiser la communication didactique.

La contribution de Cini aux débats entre

philosophes de la science et scientifiques, sur la nature des sciences, se range du côté des scientifiques en manifestant un profond intérêt pour les aspects épistémologiques et sociaux qui correspondent à son propre domaine de recherche.

En effet Cini a développé ses intérêts épistémologiques parallèlement à son travail de recherche (en physique théorique des particules élémentaires, de la mécanique quantique, des processus stochastiques) par la publication d'articles et de livres, l'organisation de conférences et de rencontres interdisciplinaires.

Le but explicite de ce dernier livre est précisé dans l'introduction : contribuer à une divulgation scientifique qui, non seulement mette en évidence quelques aspects de la science contemporaine, mais aussi place la recherche scientifique dans un cadre épistémologique et social avec la problématique nécessaire.

«La science n'est pas une cité idéale unitaire, régie par des normes méthodologiques et par des principes épistémologiques valables pour tous les habitants, qui seraient fixés une fois pour toutes, mais un ensemble de constructions érigées à différentes périodes, avec des styles différents et peuplées de diverses entités parlant différents langages».

C'est ainsi que la première partie du livre développe, dans une succession historique, quatre façons et expressions différentes de percevoir et décrire la réalité.

En premier lieu la physique newtonienne, longtemps modèle de scientificité de toutes les sciences de la nature, utilise le langage du déterminisme et de la certitude.

C'est le langage de l'indétermination qui caractérise la physique quantique.

La recherche sur la complexité, introduit successivement, une multiplicité de langages pour représenter des systèmes de complexité structurale et fonctionnelle.

L'organisme humain est un système complexe particulier : ici le sujet de la recherche est en même temps son objet et il est nécessaire de développer un nouveau langage.

La deuxième partie du livre tente un essai de

restructuration du lien entre l'évolution des concepts scientifiques et le contexte culturel et social. Cini soutient la thèse que l'évolution de la science, bien qu'étant influencée par des facteurs sociaux, se maintient dans une relative autonomie.

Il n'est pas possible pour moi de donner de façon exhaustive toutes les pistes de réflexion que la lecture de ce livre donne au lecteur.

La première partie [les langages des sciences : la certitude (chapitre 1), l'indétermination (chapitre 2), la complexité (chapitre 3), la pensée (chapitre 4)] tout en proposant des arguments partiellement connus d'un chercheur en didactique de la physique et enseignant, d'une part élargit la vision des contenus de la recherche contemporaine en interdisciplinarité, d'autre part invite à considérer ce que l'on croit savoir sous un autre angle.

La deuxième partie [la science comme apprentissage social validité de la connaissance scientifique (chapitre 5), l'évolution de l'image des disciplines scientifiques (chapitre 6), science et contexte social (chapitre 7)] partant du passé et s'orientant vers le futur, stimule la réflexion sur la science dans une perspective de culture générale. Je suis fermement convaincue qu'un chercheur en didactique et un enseignant ont besoin pour leur recherche comme pour la communication didactique, de questions pour guider leurs actions plutôt que de réponses.

Dans cette optique le livre de Cini nous fournit un guide. Cet ouvrage est écrit en italien et je souhaite que sa traduction en d'autres langues puisse le rendre accessible à d'autres lecteurs que ceux qui connaissent l'italien.

M. Vicentini

ASTOLFI J.-P., DEMOUNEM R. (1996). *Didactique des sciences de la Vie et de la Terre*. Paris, Nathan pédagogie, Perspectives didactiques, 192 p.

Les changements successifs d'appellation de la discipline au cours du siècle, et notamment ces dernières années (Histoire naturelle, Sciences naturelles, Biologie

Géologie, Sciences de la Vie et de la Terre), témoignent d'une évolution d'un domaine d'enseignement dont la lisibilité suite à des études universitaires n'est plus évidente. Les Sciences de la Vie et de la Terre ont pris une place considérable dans le développement des sciences contemporaines ; dans le même temps elles se sont diversifiées à l'extrême.

Un développement comparable, bien que limité, peut être également constaté sur le plan des études et des recherches dans les didactiques. Développées à l'origine dans le prolongement des travaux de didactique des mathématiques et de la physique, la didactique de la biologie et à un degré moindre la didactique de la géologie ont pris progressivement leur essor. Aujourd'hui, elles constituent des champs d'investigation originaux et prédominants, notamment pour la première, à laquelle se réfèrent principalement l'innovation et la réflexion pédagogique.

Le livre à deux voix, *Didactique des sciences de la Vie et de la Terre*, de Régis Demounem, inspecteur général et de Jean Pierre Astolfi, chercheur et médiateur reconnu, est dès lors le bienvenu pour faire l'état d'un domaine après ces multiples transformations. Dans le même temps, il scelle sur le papier la réconciliation de deux types de démarches, jusque là stérilement opposées ; à savoir, l'évaluation sommative sur le terrain, l'état «des troupes» en quelque sorte, animée par les corps d'inspection et les recherches pédagogiques démarrées à l'INRP (Institut National de Recherche Pédagogique) dans les années septante sous l'impulsion de Victor Host et Louis Legrand.

Trois parties composent cet ouvrage. La première est centrée sur l'évolution des savoirs et des enseignements. Ses neuf chapitres présentent tour à tour l'évolution des contenus dans les deux champs disciplinaires, ainsi que l'importance que ces approches ont prise dans le monde moderne. Les rapports avec l'évolution des recherches universitaires respectives sont ébauchées, de même que la légitimité – discutable à nos yeux – du rapprochement entre les sciences de la Vie et celles de la Terre, spécificité en vérité purement franco-espagnole ! L'évolution des programmes de ces «disciples d'enseignement», leurs finalités et leur place

Dans sa thèse Bernadette Pateyron expose avec précision la manière dont elle a enregistré gestes et discours ; puis comment elle a transcrit, à l'aide d'une analyse *a priori* des types de savoirs mobilisables, le parcours des étudiants dans les différents domaines de connaissances d'un technicien (théoriques, technologiques et pratiques). C'est un travail considérable, qui suit des méthodes d'exposition inédites en didactique. L'auteur a ainsi pu attester des décisions stratégiques que les techniciens sont amenés à prendre pour réaliser deux tâches dont la problématique est supérieure à ce qu'ils avaient d'abord imaginé : l'étalonnage puis la mise en fonction d'un dispositif de régulation de pression dans un appareil de type «oléoduc». Bernadette Pateyron montre alors les avancées théoriques que cette partie de son travail a permises : le technicien possède non seulement des formes d'action professionnelles repérables, mais encore un territoire de pensée spécifiable par un lexique. De ce territoire, le technicien ne sort que pour de brèves incursions dans les domaines technologiques, théoriques et disciplinaires associés, lorsqu'il y est poussé par l'échec avéré de ses stratégies premières. Est-ce parce que ces stratégies font son identité professionnelle, ou parce qu'elles correspondent au type de responsabilités qu'il assumera de par la division sociale du travail qui définit son «métier» ? Pourrait-on imaginer d'autres motifs à ce comportement unanime, des élèves aux professionnels confirmés ? Les interprétations de l'auteur restent prudentes, à juste titre me semble-t-il.

Dans une seconde partie, l'observation porte sur les rapports à un objet ressemblant plus à un problème scolaire qu'à un questionnement professionnel, et les résultats, s'ils confirment la formation d'un style de pensée particulier au technicien, montrent cette fois la prégnance probable du style de l'enseignement, qui a formé des contrats didactiques manifestement distincts dans les deux classes observées. Par ailleurs, on remarquera que l'engagement des étudiants dans les exercices scolaires est très faible, comparé à ce qui avait été observé dans le cas de l'exercice pratique qu'ils avaient longuement étudié alors qu'il était particulièrement difficile. C'est sans doute parce que la prise de contact avec le problème par une stratégie d'action par essais et erreurs

(comme celle qui a été observée durant la séance de travaux pratiques) est impossible dans l'exercice scolaire : il y faudrait un moyen de validation de l'action. La théorie des situations didactiques prévoit ce phénomène, mais il est toujours intéressant de le vérifier en un lieu *a priori* bien différent de l'École Élémentaire.

Le travail exposé est donc intéressant à plus d'un titre, et ouvre un champ de recherches qui est, à ma connaissance, bien mal exploré. En particulier, l'auteur propose une hypothèse forte, qui devra être reprise : *les outils sémiotiques à l'aide desquels pense le technicien ne sont-ils pas constitués des systèmes d'objets que l'action technique manipule ?* Si c'est le cas, il est possible de formuler une question subsidiaire (qui n'a pas été étudiée) : *quelle est le système des pensées technologiques qui vient s'articuler aux manipulations matérielles de ces outils sémiotiques ?* Ne trouverait-on pas là un des motifs de la résistance des professionnels et des étudiants observés à toute activité écrite, et le fondement pratique des lexiques professionnels – deux phénomènes dont l'observation est ancienne, mais qui n'ont reçu que très récemment un embryon d'explication fonctionnelle. Le rapport charnel de ces étudiants aux éléments du montage montre en tous cas que le plaisir n'est pas absent de la pratique technique. Bien que l'impossibilité d'y renoncer pour aller travailler sur le terrain des théories physiques interdise parfois aux étudiants, comme aux techniciens, d'aboutir dans leur action matérielle, il faut sans doute considérer que ce plaisir est une partie constitutive de la capacité de penser que les techniciens partagent sans doute avec les bricoleurs.

L'étude menée par Bernadette Pateyron est présentée dans un dossier de plus de 250 pages de texte et autant d'annexes. Cette étude ne permet pas de répondre à toutes les questions qu'elle pose, mais elle donne tous les éléments de l'enquête, elle se consulte aisément, et on y revient avec intérêt : parce qu'elle pose clairement les problèmes abordés, parce qu'elle donne les éléments de la réflexion développée, et parce qu'elle ouvre avec la force de la simplicité sur des questions théoriques et pratiques nouvelles.

A. Mercier

VICENTINI M., MAYER M. (1996). *Didattica della fisica*. Roma, La Nuova Italia Editrice, 368 p.

Le livre est le fruit de la longue expérience des auteurs dans la recherche didactique et dans la formation des enseignants du secondaire. Ils ont produit une synthèse riche et complexe, qui constitue un véritable manuel de référence pour les enseignants de physique, débutants ou déjà expérimentés. Le public visé est donc celui des enseignants et des formateurs, mais le livre pourrait également intéresser les chercheurs en didactique, étant donné l'ampleur des thèmes traités.

L'ouvrage est divisé en deux parties, comprenant au total 14 chapitres, dont la plupart peuvent être lus comme des essais autonomes, même si les renvois et les connexions y sont assez nombreux pour constituer un discours unitaire. À la fin de chaque chapitre, des activités, des questionnaires, des exemples sont proposés.

L'activité d'enseignement est présentée, dès l'introduction, comme un problème complexe, dans lequel se croisent de façon inextricable des savoirs concernant des domaines très différents (disciplinaire, psychologique, pédagogique, social).

Dans la première partie, *Physique et apprentissage*, divisée en six chapitres, on traite les aspects concernant les relations des élèves et des enseignants avec le savoir scientifique et plus spécifiquement avec la physique.

Le premier chapitre donne des repères assez généraux sur le processus d'apprentissage/enseignement, dans une perspective constructiviste.

Le deuxième examine les relations entre la connaissance scientifique et la connaissance commune, en proposant un modèle de construction de la connaissance et en faisant un survol des principaux résultats de la recherche sur la pensée commune en physique. Le troisième aborde le problème du changement conceptuel.

Le quatrième souligne l'importance de soumettre à une analyse critique le contenu à

enseigner et cela est fait en développant cette analyse sur une partie spécifique de la physique, la thermodynamique. En utilisant aussi des cartes conceptuelles, les manuels universitaires les plus célèbres sont examinés, à partir de ceux de Maxwell et de Planck, de Zemansky, de Callen, jusqu'aux plus récents.

Cette analyse est reprise dans le cinquième chapitre, par Franco Wanderlingh. Il critique toute forme de réductionnisme mécaniste et propose de placer la thermodynamique à la base de la construction de la physique, en considérant la dissipation et l'irréversibilité des facteurs fondamentaux.

La première partie s'achève par un chapitre sur les représentations de la science et de l'enseignement chez les élèves et les enseignants.

La deuxième partie analyse les *instruments et les méthodologies* spécifiques de l'enseignement de la physique : le rôle du laboratoire ; les moyens pour communiquer en classe (les mots, les dessins, les graphiques, les formules, les cartes conceptuelles) ; le matériel didactique (imprimé et audio-visuel) ; les exercices et les problèmes ; l'utilisation de l'ordinateur (par R.M. Sperandeo Mineo) ; le rôle possible de l'histoire de la science ; une proposition de laboratoire d'histoire et d'épistémologie de la physique concernant la genèse du concept de pression atmosphérique (par M.G. Ianniello) ; l'évaluation et la programmation.

Le livre est une véritable mine de suggestions et d'idées pour les enseignants. Très intéressants sont, par exemple, le chapitre 4 qui analyse la structure conceptuelle de la thermodynamique, celui sur l'utilisation didactique des problèmes et des questions, celui sur l'évaluation. Ce dernier offre un exposé original et bien documenté, riche de suggestions critiques et de références au débat qui s'est développé au cours des dernières années sur le sujet.

Face aux aspects les plus problématiques, les auteurs affirment clairement leur position. Leur conception est radicalement constructiviste. Ils critiquent à plusieurs reprises toute idée de la science comme connaissance vraie, objective, sûre. Ils considèrent que la connaissance commune n'est pas fautive ou

incohérente, mais qu'au contraire elle fonctionne bien dans le contexte qui lui est propre. Et s'il lui arrive d'être en contraste avec la science c'est parce qu'elle répond à des questions différentes.

Cette conception aboutit à des affirmations fort discutables au chapitre 5, là où la physique d'Aristote et celle de Galilée et de Newton sont mises sur un pied d'égalité, toutes deux étant considérées un peu vraies et un peu fausses, chacune bonne dans son contexte. Je pense au contraire que la différence entre les deux est tellement profonde et importante qu'on ne peut pas la réduire à des détails, ni à une simple différence de points de vue, une sorte de match nul, sans risquer d'occulter des questions scientifiques et épistémologiques majeures, et réduire à un petit accident de

parcours la révolution scientifique du XVI-XVII^e siècle.

Il faut dire pourtant que, même dans le cas que j'ai critiqué, les auteurs ont réussi ce qui semble leur but majeur : susciter chez le lecteur la réflexion, la discussion et le doute.

En effet, tout au long de la lecture, on est poussé à se confronter avec des problématiques non banales et des propositions parfois critiquables, certes, mais toujours stimulantes.

En conclusion, il s'agit d'un ouvrage important, bien organisé et documenté, qui constitue une primeur bienvenue dans le panorama des publications en langue italienne. À lire. Et à traduire.

U. Besson