

# VINGT ANNÉES DE THÈSES EN DIDACTIQUE DE LA PHYSIQUE ET DE LA CHIMIE

Daniel Beaufiles

*Depuis une vingtaine d'années, des dizaines de thèses ont contribué à l'investigation de questions spécifiques à l'enseignement de la physique et de la chimie. Nous rappelons et présentons ici différents travaux francophones que nous avons articulés en fonction de leur contribution. Un premier ensemble concerne ainsi l'explicitation des conceptions et raisonnements des élèves et étudiants. Un autre ensemble a contribué à l'étude des questions de définition des contenus enseignés. Enfin, des travaux ont été consacrés à l'enseignement en situation et à la formation des maîtres.*

Cela fait un peu plus de vingt ans que des recherches spécifiques sur les questions d'enseignement et d'apprentissage des sciences ont débuté de façon significative. Vingt années d'investigation caractérisées par leur centrage sur les contenus qui, suivant les orientations, ont approfondi les questions sur les raisonnements des étudiants, sur la définition des contenus, sur les conceptions des enseignants eux-mêmes...

Ce texte vise à rappeler les différents travaux francophones ayant donné lieu à une thèse en essayant de les articuler en fonction de leur contribution. Nous aurions pu nous limiter aux thèses "récentes" mais, outre le fait que ce qualificatif ne fixe pas de limite, il nous a paru important de faire apparaître la continuité et l'évolution des problématiques, ainsi que l'étendue des domaines ainsi abordés (1). Nous avons tenté de regrouper dans une première partie les différents travaux qui ont contribué à l'explicitation des conceptions et raisonnements des élèves ou étudiants dans différents domaines de la physique et de la chimie. Une seconde partie est consacrée aux travaux dont la contribution visait plus spécifiquement la définition des contenus enseignés ou à enseigner. Enfin, une troisième partie est consacrée aux travaux portant un regard sur l'enseignement en situation et sur la formation des maîtres.

Gageure, sans doute, que de vouloir rassembler plus de soixante thèses de didactique qui, suivant les cas, sont caractérisées par leur focalisation sur une question pointue, ou présentent plusieurs facettes complémentaires allant de l'étude de cas à la proposition de séquences d'enseignement. Il est clair que notre présentation n'est pas indiscutable ; elle correspond à des choix effectués pour un module de didactique de la physique et de la chimie de DEA (2).

des travaux  
nombreux  
et variés

- 
- (1) Cela étant, nous ne présenterons pas les travaux qui ont pu être poursuivis ultérieurement.
  - (2) DEA Enseignement et diffusion des sciences et des techniques, ENS Cachan.

## 1. DES TRAVAUX SUR LES CONCEPTIONS ET LES RAISONNEMENTS

Sans doute peut-on faire commencer l'histoire de la didactique à l'époque des travaux qui, dans les années soixante-dix, ont été suscités par les difficultés des étudiants de physique dans leur cursus universitaire. Ces premières investigations ont été suivies de tout un ensemble de recherches sur les conceptions et raisonnements "naturels" chez les étudiants et les élèves. Dans la présentation proposée ci-après nous avons choisi, non pas une progression historique, mais une partition entre les travaux plus centrés sur la recherche de conceptions et ceux plus centrés sur l'analyse des raisonnements en situation de résolution de problèmes classiques.

### 1.1. Des conceptions

En 1982, Martine Méheut (3) s'est intéressée à la notion de réaction chimique dans le cadre des nouveaux programmes de collège. Le travail visait l'étude de conceptions des élèves, avant et après enseignement, à propos du phénomène de combustion, point d'appui phénoménologique porteur d'objectifs d'acquisition de connaissances : augmentation de la masse, nécessité de l'oxygène, production d'eau, etc. La thèse a montré que ces connaissances s'opposaient aux conceptions initiales des élèves. Pour eux s'il y a variation de masse lors de la combustion, c'est dans le sens de l'allègement ; de même, s'ils admettent la présence de vapeur d'eau, c'est avec l'idée que l'eau provient de la substance... Au-delà du fait qu'il n'est guère plus de 40 % d'élèves qui finalement reconnaissent la nécessité de l'oxygène, il est intéressant de noter que la combustion, loin de constituer une phénoménologie simple pour aborder les notions de réaction chimique, s'est avérée un obstacle.

l'obstacle de la  
connaissance  
commune :  
l'eau, l'air, le feu

Dans sa thèse de 1985, Marie-Geneviève Séré a également abordé les difficultés des élèves de collège mais dans la conception de la pression, en particulier celle exercée par l'air. Il est ainsi apparu que la notion est particulièrement difficile à faire comprendre à ce niveau. La référence à l'air s'avère ainsi illusoire puisque leur expérience journalière indique plutôt l'inexistence d'une pression ; plus précisément, l'éventuel effet de l'air est relié à la résistance au déplacement ou à la déformation, référence qui entraîne l'association de la notion de pression à celle de force. La difficulté est d'autant plus grande que viennent s'ajouter à cet âge des difficultés conceptuelles au niveau de la distinction volume/quantité de matière et chaleur/température (4).

(3) Les intitulés des thèses sont donnés dans le tableau chronologique ajouté en annexe.

(4) De nombreux travaux ont porté sur le thème chaleur/température (voir A. Tiberghien dans *Actes du 1er atelier sur les recherches en didactique de la physique*, 1983) ; voir aussi la thèse de Béatriz Macedo de Burghi, 1981.

Dans ces deux thèses, le travail comportait également une partie visant la mise au point de propositions d'enseignement, avec en particulier l'introduction d'un modèle particulière. Il est intéressant de noter ici que la "résolution" de la difficulté de conceptualisation passe par un modèle "microscopique". C'est d'ailleurs ce point de vue que, plus récemment, André Laugier (1998) a défendu dans sa thèse sur l'enseignement de la réaction chimique.

lumière et vision

L'optique est également un domaine qui a suscité différents travaux y compris au niveau du collège. Poursuivant les travaux d'Édith Guesne (1985) sur la conception de la vision comme "rayon" partant de l'œil vers l'objet, Wanda Kaminski (1991) a montré la "substantialisation" du rayon lumineux qui devient ainsi un "objet" que l'on peut voir sur le côté. Ce type de conception concerne aussi, comme l'a montré Françoise Chauvet (1994), la notion de couleur : pour la majorité des élèves (comme pour des étudiants (5) et un grand nombre d'adultes) la couleur est une propriété de l'objet. La distinction de la couleur lumière et de la couleur matière est alors particulièrement importante et demande la réalisation de nombreuses expériences (ombres colorées par exemple). On peut noter que la difficulté est clairement dans la notion elle-même qui nécessite la prise en compte des dimensions physique, physiologique et technologique.

mouvements

La mécanique a été également étudiée sous cet angle. Les premiers travaux à ce propos remontent à la thèse d'Édith Saltiel (1978) (6) sur la notion de vitesse et les questions de changement de référentiels. Là également, les raisonnements des élèves semblent reposer sur une conception de la vitesse comme propriété de l'objet et sur l'inséparabilité du mouvement d'une cause motrice. De même, le travail de Laurence Maurines (1986) à propos de la propagation des ondes transversales (7) a permis de montrer à la fois un substantialisme et une confusion avec la dynamique des objets : un grand nombre d'étudiants pensent qu'il est possible de faire aller plus vite un ébranlement en "lançant" plus fort, que la "bosse" ralentit au fur et à mesure qu'elle s'aplatit...

## 1.2. Des raisonnements "naturels"

Il est clair qu'il serait abusif de vouloir séparer les conceptions des raisonnements ; pourtant, un certain nombre de travaux mettent l'accent plus sur les seconds que sur les premiers. Il y a là quelque chose d'intéressant car il n'est pas évident que les raisonnements ne soient que des conceptions

(5) Voir thèses de Richard Lefèvre (1988) et de A. Fawaz (1985).

(6) Un travail de thèse a été également fait sur la dynamique de la propagation des ondes mécaniques au niveau du supérieur par Rizkallah Abboud (1989).

(7) Ces travaux ont été poursuivis à propos de la propagation des ondes sonores.

mises en pratique : il peut y avoir des formes de raisonnement générales qui transcendent les conceptions dans tel ou tel domaine (8).

Dans sa thèse de 1977, Laurence Viennot a mis en évidence au niveau des élèves de lycée et du supérieur une "adhérence entre force et vitesse" où la force est une sorte de capitalisation et, partant, l'existence d'un raisonnement causal : le mouvement a une cause et un "état" de mouvement doit être associé à un élément de la cause. La production de réponses erronées par les élèves ou les étudiants vient alors à la fois d'une conception erronée et d'un raisonnement mettant en jeu une succession linéaire de relations cause-effet inopportune. Ce type de raisonnement a été également repéré en statique par Serge Fauconnet (1981) : le raisonnement "linéaire-causal" conduit ainsi à des calculs faux sur des problèmes simples d'allongement de ressorts.

des  
raisonnements  
de type  
"linéaire-causal"

Ce type de raisonnement a été étudié par Jean-Louis Closset (1983) à propos de problèmes en électricité du collège au lycée. Ces raisonnements "séquentiels" maintenant bien connus conduisent en effet les élèves à nier la loi de l'électrocinétique et prédire, par exemple, qu'une ampoule brillera moins si elle est après une résistance que si elle est avant (9). Il faut noter ici que ces difficultés de raisonnement se doublent de difficultés conceptuelles et expérimentales que les travaux anciens de Samuel Johsua (1982) ou récents de Jean-Loup Canal (1996) ont explicitées.

Citons enfin la thèse de Sylvie Rozier (1988) à propos de l'enseignement de thermodynamique où la difficulté des étudiants à raisonner sur trois variables est bien de même nature : le raisonnement linéaire causal entraîne l'absence de prise en compte de contre-réaction ou de l'aspect systémique et, dès lors, conduit à des associations du type "chaleur d'où élévation de température, d'où élévation de pression, d'où augmentation du volume" pour expliquer la dilatation due à l'échauffement d'un gaz... à pression constante...

### **1.3. Des difficultés causées par l'enseignement lui-même**

Les exemples ci-dessus conduisent en fait à pointer sur l'enseignement des contenus lui-même. Il n'est en effet pas impossible que la seule considération de situations stationnaires ou d'équilibre n'aille pas à l'encontre d'une intuition relative aux (nécessaires) régimes transitoires qu'il s'agisse de l'électrocinétique, de la mécanique ou de la thermodynamique. Nous voyons de la même façon les difficultés de l'enseignement de mécanique étudiées par Hélène Caldas (1994) à propos du frottement solide : la fusion des notions

(8) Voir L. Viennot, 1986.

(9) Des travaux antérieurs relatifs à la conception du courant et de sa circulation ont également contribué à ces connaissances didactiques : voir G. Delacotte, A. Tiberghien (1983) et thèse de Jalila Ben Hamida (1980).

l'enseignement  
source  
d'obstacles

d'adhérence et de frottements en un concept unique de frottement décliné en statique et dynamique ne facilite pas la maîtrise des raisonnements mettant en jeu des "forces de frottement motrices". À un niveau supérieur, la difficulté des étudiants avec la loi de Coulomb pour le champ électrique au voisinage d'un conducteur, étudiée par Sylvie Rainson (1995), n'est pas étrangère à l'enseignement préalable du principe de superposition. De même encore, l'enseignement de l'électrostatique apparaît-il comme un obstacle à l'enseignement de l'électrocinétique comme l'a étudié Abdelmadjid Benseghir (1989) au niveau des lycées et des premières années post-baccalauréat.

Cet effet "à contresens" de l'enseignement a déjà été évoqué à propos de la thèse de Martine Méheut et apparaît comme flagrant dans le travail d'Hélène Stavridou (1990) à propos de l'enseignement de la réaction chimique et l'évolution des conceptions des élèves du collège au lycée. En effet, outre la différenciation avec le changement d'état ou la dissolution rendue difficile par l'illustration de réactions chimiques bien visibles (donc "caractérisées" par un changement physique tel que la couleur, ou la précipitation), les élèves finissent par associer la réaction chimique et le schéma "deux corps donnent autre chose". Autant d'obstacles à l'étude de réactions à un ou trois corps, aux notions d'équilibre, etc. (10)

Le travail de W. Kaminski cité ci-dessus fournit peut-être l'exemple le plus frappant. En effet la conception du rayon lumineux chez les élèves après enseignement peut être grave de conséquences. Le centrage sur les constructions géométriques pour la formation des images peut entraîner l'occultation de la phénoménologie par la représentation du modèle qui, mal maîtrisé, conduit à l'obtention d'une image redressée lorsqu'on enlève la lentille... On le retrouve également en électrocinétique au niveau de la loi des mailles en alternatif où la prégnance des valeurs efficaces fait oublier l'importance du déphasage en présence d'éléments simples, tel le condensateur, comme l'a montré Jean Lascours (1998).

#### 1.4. En résumé

Les différents travaux évoqués précédemment sont fondés sur des approches empiriques où questionnaires papier-crayon et transcription d'observations sont les instruments privilégiés d'investigation. Ils ont contribué au listage et à la localisation des écueils rencontrés par l'enseignement à différents niveaux. Ces éléments sont essentiels pour les enseignants, les formateurs et les acteurs du système éducatif. Les différentes recherches ont ainsi conduit à des propositions de contenu ou de démarches pédagogiques, mettant l'accent, d'une part sur le concept de modèle en tant que

---

(10) Dans le même ordre d'idée, A. Laugier (1998) a montré que l'introduction de l'équation-bilan réduite était ensuite source de difficultés dans la résolution de problèmes quantitatifs de chimie.

construction de l'esprit et sur l'activité même d'élaboration de modèle — la modélisation — et, d'autre part sur l'identification du registre des représentations graphiques et des codages sur lesquels les élèves travaillent et qu'ils ne doivent pas confondre avec la réalité. Au-delà de cet aspect descriptif, ces recherches ont été à la base de nombreux travaux qui ont montré la résistance de "conceptions privées" à l'enseignement et peuvent nourrir un courant de recherche sur les obstacles à l'apprentissage.

La plupart des travaux ont aussi conduit ou porté sur des propositions pédagogiques expérimentées dans des classes et les nouveaux programmes ont bénéficié de ces apports. Pourtant, le passage d'innovations didactiques à la réalité de l'enseignement n'est pas simple. La récente thèse de Colette Hirn (1998) a montré que la prise en compte des nouvelles instructions n'entraînait pas automatiquement la disparition des anciennes stratégies et pouvait conduire à des contenus enseignés "cumulant" nouvelle et ancienne approches (11).

## 2. DES QUESTIONS DE TRANSPOSITION

La question des programmes vient d'être évoquée au niveau de la définition de telle ou telle partie des contenus et sur la rédaction de commentaires explicitant les objectifs ou raisons didactiques de tel ou tel choix. Au-delà de l'étude des évolutions curriculaires, c'est bien la question des procédures de choix et de leur explicitation qui se pose. L'analyse de l'élaboration des savoirs à enseigner et enseignés, par les didacticiens des mathématiques, a conduit au concept de transposition didactique; mais la question pour les disciplines expérimentales n'est pas aussi simple, du fait qu'elles ne peuvent se réduire à un texte du savoir et que la connaissance est multiforme autour d'un même phénomène ou d'un même objet (12). La référence à des pratiques scientifiques socialement identifiées est une des possibilités.

### 2.1. De la référence

L'idée d'analyser les apprentissages en référence à l'activité du chercheur est une idée ancienne que l'on rencontre dans la "pédagogie de la redécouverte". Samuel Johsua (1985) s'est penché sur les pratiques des enseignants dans la classe (collège et lycée) et sur la place qu'ils accordent à l'expérience. Il a mis ainsi en évidence le choix d'expériences prototypiques et le rôle essentiel de "monstration" : l'expérience est choisie pour montrer et elle doit conduire à l'accord des

---

(11) Ceci étant d'ailleurs directement lié à l'usage maintenu de dispositifs expérimentaux...

(12) La place des objets techniques (y compris ceux utilisés dans l'enseignement de physique général) est exemplaire : leur modélisation dépend fortement de leur domaine d'application et du registre théorique que l'on utilise.

place et rôles  
de l'expérience  
de classe

élèves sur le phénomène. La démarche est alors celle d'un inductivisme implicitement fondé sur le système naturaliste de Lazerges : l'image de la démarche scientifique étant inductive, la progression pédagogique par induction serait alors parfaitement adaptée. Le recouvrement des démarches scientifique et pédagogique place alors en parallèle l'élève et le chercheur. Mais la confusion des genres n'est pas raison, et la démarche "naturelle" n'est qu'un mythe.

L'évolution de l'enseignement de telle ou telle notion, et en particulier la place de certaines expériences prototypiques dans les classes de science a été étudiée par Samuel Johsua à propos des circuits électriques (13) et très récemment par Karine Robinault (1997) à propos de l'énergie. L'étude de l'évolution des programmes et des indications relatives à certaines parties montre bien les différents paramètres que sont "l'idéologie" du moment, le sentiment d'obsolescence de certaines connaissances et l'évolution des matériels "didactiques" eux-mêmes. Au niveau des expériences de classe, c'est un constant mouvement de simplification visant à les rendre plus visibles plus intelligibles, bref à les ajuster à leur rôle de monstration. Certaines expériences particulièrement "adaptées" survivent ainsi à l'évolution des programmes : l'étude de la loi de Joule et bien évidemment l'étude de la chute libre. Le caractère pérenne de ces expériences et, à l'inverse, la disparition rapide d'autres situations expérimentales renvoient aussi au concept de niche écologique de la didactique des mathématiques.

des pratiques  
de référence

Les éléments ci-dessus rappellent la nécessité d'outils pour opérer les choix curriculaires et les justifier. La référence à une démarche scientifique "idéalisée" n'est ni la bonne solution, ni la seule. La finalité de l'enseignement doit indiquer les pratiques que l'on peut prendre en référence. Dans sa thèse sur l'initiation aux sciences et techniques, Jean-Louis Martinand (1982) s'est appuyé sur trois études de cas pour aborder les questions du choix des activités, de l'élaboration d'un contenu conceptuel et de la relation entre objectif et démarche pédagogique. Son apport théorique a ainsi porté sur l'identification des objectifs-obstacles, la définition du "champ empirique de référence" dans les activités de modélisation et sur le concept de "pratique sociale de référence" qui nous intéresse ici. Les choix des contenus enseignés doivent être faits, non pas en simple écho à un savoir abstrait, mais en explicitant les finalités et en précisant les pratiques visées *in fine*. Celles-ci peuvent être scientifiques, technologiques, mais aussi celles d'une activité sociale d'usage de la science ou des procédés.

La thèse de Bernard Calmettes (1996) sur l'enseignement de l'électrocinétique en section technique montre en particulier la construction de la discipline scolaire et la transposition d'objets matériels (moteur asynchrone et banc d'essais)

---

(13) Voir aussi la thèse récente de Jean Lascours, précédemment citée.

dans l'évolution rapide des programmes dans leur interaction avec le génie électrique et la physique appliquée.

L'étude de la relation entre les savoirs scolaires et certaines pratiques extérieures à l'éducation a été faite à propos d'un cas d'espèce : celui de l'introduction de l'ordinateur "outil de laboratoire" dans l'enseignement des sciences physiques au lycée. Le premier travail dans ce domaine fut la thèse d'Alain Durey (1987) qui a montré, d'une part, la cohérence des contenus notionnels enseignés au lycée et début de l'université avec les études des mouvements dans les activités sportives telles que le tennis et, "réciproquement", la possibilité de proposer des activités de modélisation à partir de résultats expérimentaux grâce à l'ordinateur. Pour autant, les raisons d'une telle introduction de l'ordinateur dans les salles de travaux pratiques des lycées restaient à l'époque d'ordre "politique" et la question de la légitimation était particulièrement ouverte pour ce qui concerne l'enseignement général, pour lequel aucune finalité professionnelle n'imposait de pratiques de référence. Plusieurs thèses ont ainsi porté sur l'étude de transpositions possibles.

## 2.2. De la transposition

S'appuyant sur le travail d'A. Durey, Daniel Beaufils (1991) a recherché les conditions d'une définition de contenu au niveau des classes de physique-chimie des lycées d'enseignement général. Le travail a montré la réelle difficulté dans une situation contrainte : les contenus très classiques des programmes ont en effet conduit à prendre en référence, d'une part, un "modèle épistémologique" du physicien pour les démarches d'investigation scientifique et, d'autre part, la "modélisation expérimentale" (14) pour le choix des méthodes et instruments informatisés. D'une mise en cohérence des instruments et des activités centrées sur la modélisation, il est ressorti la nécessité d'un enseignement des méthodes. À la même époque, Jean Winther (1992) a effectué un travail similaire au niveau de l'enseignement de classes techniques. La référence à une pratique de modélisation mathématique était plus directe et le travail a porté sur les différentes activités rendues possibles par les méthodes informatisées, en particulier la modélisation par ajustement de modèles à des données expérimentales.

Dans les deux cas toutefois, les contraintes de l'enseignement secondaire ont imposé une limite. La référence à des activités scientifiques ne peut en effet se réduire au transfert d'outils et à la transposition d'activités de prise de mesures et d'ajustement mathématique. La dimension sociale peut être considérée comme tout aussi essentielle : le chercheur est l'auteur de la question qu'il va chercher à résoudre, puis celui qui doit confronter ses résultats à l'avis de ses pairs. Alain Guillon (1996) a travaillé dans le sens d'un tel appro-

un ensemble  
activités-  
instruments-  
méthodes-  
démarche

(14) Voir *Recherche de modèles expérimentaux assistée par ordinateur*, J.-C. Trigeassou, Tec & Doc, 1988.



fondissement de la transposition : dans le cadre d'un enseignement universitaire, il a élaboré des situations de travaux pratiques et des projets mettant en jeu les différentes démarches scientifiques jusque dans leur dimension sociale. Ses essais l'ont aussi amené à dire la nécessité d'une formation des étudiants, non seulement aux méthodes utilisées, mais au niveau de "métaconnaissances" permettant une prise de conscience des démarches elles-mêmes.

### 2.3. En résumé

L'étude de l'évolution des programmes et de leur mise en place de fait par les enseignants dans leurs classes, est sans aucun doute une nécessité. Le peu de connaissances sur ces questions conduit à l'impossibilité actuelle de prévision et de contrôle dans la diffusion des innovations, fussent-elles fondées sur des études didactiques conséquentes. Au niveau de la noosphère, la didactique doit pouvoir aussi donner les moyens d'une analyse de pertinence des propositions en regard des finalités de l'enseignement à tel ou tel niveau. Les études centrées sur la transposition, y compris en référence à des pratiques sociales identifiées, sont donc nécessaires, ne serait-ce que pour expliciter les procédures et les invariants et mesurer les écarts qui la caractérisent (15). La didactique doit donc ainsi intervenir en phase avec le développement d'innovations, et les exemples précédents montrent que la didactique se trouve interpellée en retour, d'une part, par la mise à l'épreuve des modèles de transposition et, d'autre part, par les nouvelles questions que ne manque pas de soulever telle ou telle nouveauté.

Notons que les nouveaux programmes de lycée mettent l'accent sur l'utilisation de moyens informatisés pour l'élaboration et l'étude de modèles. Mais, de nouveau, une vigilance didactique s'impose : s'il peut en effet être admis que l'enseignement scientifique inclut des activités d'investigation scientifique utilisant des moyens modernes, il faut éviter le retour du "mythe naturaliste" sous couvert d'activités rénovées de modélisation. Ce dernier point n'est évidemment pas indépendant de la formation correspondante des enseignants que nous abordons ensuite.

## 3. DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA FORMATION DES MAÎTRES

Dans les parties précédentes nous avons évoqué les recherches sur des conceptions et les raisonnements des élèves, puis nous avons rassemblé des travaux sur les questions de transposition et de définition curriculaire. Ces deux approches, l'une centrée sur l'élève, l'autre sur la noosphère, ne considéraient ni l'enseignement et ni l'enseignant

innovation  
"technologique"

(15) Voir A. Durey et J.-L. Martinand dans *La transposition à l'épreuve*, G. Arzac et al., 1994.

comme objets d'étude. C'est dans cette troisième partie que nous rassemblons les thèses ayant contribué à ce troisième regard.

Là encore, la séparation n'est évidemment pas aussi nette dans la réalité des travaux. Ainsi, les premières recherches sur la résolution de problèmes dont nous allons parler ici s'intéressaient d'abord à l'élève; mais le passage au procédural reposait sur l'hypothèse que l'activité de résolution de problèmes constituait une aide didactique qui pouvait en particulier pallier les insuffisances de l'enseignement des savoirs déclaratifs définis par les programmes. Les résultats qui en sont tirés se sont alors naturellement traduits en aides didactiques destinées aux enseignants (16). L'évolution des problématiques a ensuite accentué le centrage sur les enseignants et sur la formation de enseignants à la didactique, présentée alors comme un domaine ayant produit des résultats devant éclairer la pratique dans la classe.

### 3.1. De l'enseignement et des aides didactiques

Les premiers travaux que nous voulons évoquer ici font suite aux premiers résultats des recherches sur les conceptions et leur résistance à l'enseignement. Ils s'inscrivaient dans la vision constructiviste de l'apprentissage et l'idée était de placer l'élève en tant qu'acteur de la construction de ses connaissances. Qui dit acteur, dit activité, et l'une des voies était de confronter l'élève à des activités de résolution de problèmes (17) proches de l'activité de chercheur.

C'est dans cette mouvance qu'Andrée Dumas-Carré (1987) s'est intéressée aux difficultés de résolution de problèmes de mécanique classique au niveau des classes de lycée. Si nous citons ce travail ici, c'est qu'il s'est explicitement centré sur la difficulté des élèves face à des problèmes typiques de l'enseignement : identification des interactions, bilan de forces dans des situations d'équilibre, études de différents mouvements de translation, etc. De plus, le travail a conduit à l'élaboration d'aides méthodologiques et à leur évaluation auprès de différentes classes. En particulier, il est apparu nécessaire d'élaborer des méthodes permettant le franchissement des différentes étapes nécessaires à une bonne résolution : bandes dessinées pour les représentations qualitatives des phases de différents mouvements, représentation des diagrammes interaction-objet comme méthode d'identification des différentes interactions, notamment. Le travail a montré l'effet positif de ces aides méthodologiques dans la réussite des élèves au niveau de la résolution de ce type de problèmes, mais aussi que ces aides devaient faire l'objet d'un enseignement. Le passage à

aides à la  
résolution de  
problèmes

(16) Voir par exemple A. Dumas-Carré et M. Goffard, 1997.

(17) Voir A. Dumas-Carré et M. Caillot dans G. Vergnaud et al., 1988, par exemple.

un enseignement de méthode ne pouvait alors s'envisager sans une modification des pratiques pédagogiques. C'est dans ce sens que Monique Goffard (1990) a travaillé, introduisant la notion de mode de travail pédagogique : le mode transmissif caractérisé par un contenu neutre et l'idée d'une accumulation des connaissances était en effet peu efficace, et le passage à un mode appropriatif porteur d'une pédagogie différenciée s'imposait. Le travail a porté notamment sur l'une des difficultés des programmes de physique de l'époque : la construction du concept de quantité de mouvement. Il est intéressant ici de noter le déplacement progressif du problème : de la difficulté de résolution, on est passé à la difficulté d'acquisition des méthodes, puis à la nécessité de modes pédagogiques, dont la difficile mise en œuvre nécessite à son tour une formation des enseignants à la didactique...

Une autre voie "d'application" des résultats de recherches sur les conceptions et les activités de résolution de problèmes a été choisie par Angélica Dimitracoupoulou (1995) qui a fait l'hypothèse que l'informatique répondrait aux exigences du projet. À l'époque des attentes de l'intelligence artificielle il était pertinent de s'intéresser au transfert d'expertise didactique et pédagogique dans un "tutoriel intelligent" : reprenant les travaux sur les conceptions et la résolution de problèmes pour l'enseignement de la mécanique classique au lycée, le projet s'inscrivait également dans une orientation constructiviste. Le logiciel ainsi réalisé, muni de l'expertise scientifique et didactique, pouvait non seulement repérer les manques ou erreurs, mais choisir une intervention adaptée visant d'abord la prise de conscience par l'élève de son erreur puis les aides méthodologiques mises au point par A. Dumas-Carré. On notera à ce sujet que la finalité du travail était, en fait, double : il s'agissait d'abord d'appliquer des connaissances didactiques pour élaborer un produit et, réciproquement, de mettre à l'épreuve ces connaissances en faisant l'hypothèse de leur opérationnalisation dans un système automatisé.

Une partie de ces travaux a donc été centrée sur des activités "théoriques" limitées à des problèmes "académiques", mais le choix d'activités expérimentales pour l'acquisition et la structuration des connaissances a été également abordé. Les travaux sur la quantité de mouvement s'appuyaient sur des situations expérimentales, et ceux évoqués précédemment à propos de l'introduction de l'ordinateur instrument d'investigation scientifique mettaient en première place l'obtention de mesures. Cela dit, les problématiques questionnant explicitement le rôle de l'expérimental dans l'enseignement et l'apprentissage sont récentes, et l'idée suivant laquelle les activités expérimentales favorisent la compréhension, voire la conceptualisation, mérite en effet d'être reformulée en terme d'hypothèse à valider.

On peut en particulier citer la thèse de Suzana Coelho (1993) (18) qui a montré les difficultés didactiques générées spécifiquement par le mesurage (difficile acceptation de la dispersion, idée de l'existence d'une "vraie valeur", etc.) qui viennent perturber les démarches expérimentales élaborées par l'enseignant. La thèse de Karine Robinault précédemment citée a aussi porté sur l'articulation expérimental/modèle dans les situations de travaux pratiques. Le travail a montré l'importance de distinguer différents registres entre la réalité expérimentale et la théorie : dans le "monde des choses" le registre des mesures a une place particulière, et dans le "monde des théories et des modèles", c'est le "modèle numérique" qui s'impose. L'articulation attendue par l'enseignant entre manipulation/mesures et modèle/concept est parfois loin de l'élève : ceux-ci n'établissent pas "naturellement" ou "spontanément" de relation entre les différents niveaux; le passage au registre plus abstrait des modèles et concepts ne peut avoir lieu que sur une consigne explicite dans ce sens.

place et rôles  
des travaux  
pratiques

Dans le même ordre d'idée, la thèse récente de Michel Beney (1998) montre la difficulté des étudiants de DEUG à comprendre le sens des actions qui leur sont demandées en travaux pratiques lorsque les dispositifs expérimentaux mêlent ce qui relève du phénomène, des conditions d'obtention/observation et du réglage des dispositifs de mesure. Ainsi, l'attention de l'étudiant est tournée vers le repérage d'indices de surface et centrée sur l'obtention du "bon signal". En retour, ces observations montrent les limites de l'élaboration des dispositifs expérimentaux à visée didactique et celles des fiches d'activités. Ceci concerne bien évidemment tous les niveaux d'enseignement.

### 3.2. De la formation des maîtres

En filigrane, dans la partie précédente, figurait déjà la question de la formation des enseignants. Il ne s'agit pas de la formation à la didactique en tant que recherche qui relève d'une formation de troisième cycle, mais bien d'une formation des enseignants et futurs enseignants qui apporte à la fois l'ensemble des connaissances pragmatiques issues des recherches en didactique et une "posture didactique" nécessaire à la bonne "application" des propositions. Mais la définition du contenu et de modalités adaptées au public des enseignants n'est pas sans difficultés.

l'image  
de la science  
chez les  
enseignants

Ainsi l'image de la science analysée au niveau des enseignants en activité par Ezio Roletto (1995) à travers des questions sur la nature des connaissances scientifiques et les démarches pour les atteindre, sur les relations entre théorie et réalité, entre science et société, a montré qu'une majorité partage un point de vue empiriste-inductiviste et n'accorde que peu d'importance à la dimension sociale.

---

(18) Voir aussi, R. Journeaux dans J. Toussaint, 1996.

En amont, et dans le contexte de la création des IUFM, deux thèses ont porté sur la formation à la didactique des stagiaires de seconde année, futurs professeurs de sciences physiques des lycées et collèges. Partant des analyses critiques de S. Johsua sur le mythe naturaliste, Guy Robardet (1995) s'est interrogé sur les difficultés d'une formation didactique, dues en particulier à l'existence de représentations préalables des futurs maîtres sur la science, l'enseignement et l'élève. Le travail a porté à la fois sur la recherche de ces conceptions et sur l'impact d'une formation mise en place par l'auteur lui-même. Il en ressort en particulier que, si la représentation "naturaliste" est largement majoritaire, elle ne constitue pas un obstacle infranchissable à ce niveau. L'expérimentation montre la possibilité d'une formation à la didactique par une mise en rupture par rapport aux pratiques habituelles.

La rupture est à l'évidence une nécessité pour Monique Saint-Georges (1996). Mais cet important changement est peu compatible avec une formation "frontale" qui, de plus, s'oppose souvent à la référence des conseillers pédagogiques. Le choix fait dans cette thèse est de fonder une formation sur une pratique réflexive : la formation à la didactique s'opère par une formation "par la didactique". Le stagiaire est confronté à une séance dite "TP-problème" dont l'élaboration exige argumentation et prévision, dont la réalisation montre les écarts, et dont l'analyse ultérieure des transcriptions génère un questionnement de nature didactique permettant l'apport des résultats de la recherche. L'importance d'une conception développementale de la formation professionnelle des enseignants de sciences physiques a été également soulignée récemment par Ludovic Morge (1997) dans une étude de cas d'une formation de quelques professeurs stagiaires insatisfaits de leurs premières expériences professionnelles et demandeurs d'une formation.

Dans tous les cas, il reste la question de l'évaluation de ces types de formation à moyen terme et plus généralement, la question de la définition et de la survie (19) d'un "enseignement de didactique" dans la formation des maîtres reste posées.

### 3.3. En résumé

Un grand nombre de travaux ont donc conduit ou porté sur des propositions de maquettes d'enseignement ou de projets d'enseignement. Mais ces travaux ont généralement été conçus comme applications de résultats de recherches sur les conceptions ou raisonnement des élèves ou de propositions de transposition. Outre le fait que la dimension d'ingénierie didactique n'a pas été pleinement prise en compte, l'étude du fonctionnement de fait de l'enseignant n'en est qu'à ses débuts.

formation  
à la didactique,  
par la didactique

---

(19) Guy Robardet propose une analyse en terme de niche écologique, en référence à l'écologie des savoirs développée en didactique des mathématiques.

Il s'agit bien aujourd'hui d'accorder une plus grande importance au rôle de l'enseignant, tant comme acteur dans sa classe où son rôle semble en mutation passant de la transmission d'un savoir acquis vers la médiation dans la relation de l'élève aux savoirs, que comme concepteur de milieux didactiques (élaboration des cours, travaux pratiques, documents, procédés, etc.).

## CONCLUSION

Au terme de cette revue de thèses en didactique de la physique et de la chimie, il convient peut-être de rappeler les limites du projet. Loin de vouloir rappeler tous les travaux et de les résumer sans les tronquer (tâche qui nécessiterait à l'évidence un ou plusieurs ouvrages (20)), il s'agit bien d'un essai de mise en articulation des différents travaux ayant conduit à une thèse. Cette dernière restriction n'est pas seulement une question de volume. Au regard de l'écho ou de la poursuite des différents travaux présentés, il semble important de réfléchir au positionnement des nouvelles thèses en didactique : la situation est sans aucun doute différente de ce qu'elle était il y a dix ans ou plus. Il n'est pas déraisonnable de souhaiter renforcer la cohérence et la portée des travaux : le choix des sujets doit alors se faire en fonction des questions laissées "en creux" ou en fonction des "applications". Dans le premier cas le souci est celui de la production de "modèles" plus synthétiques, plus théoriques (y compris dans le sens d'une cohérence avec les didactiques d'autres disciplines comme les mathématiques (21) ou la biologie (22)), dans le second cas, c'est celui de répondre à des questions qui se posent dans la réalité du terrain.

Enfin, et en écho aux remarques faites dans les précédentes parties sur sa mise à l'épreuve, la didactique est aussi attendue au niveau des "procédés". Différentes thèses déjà citées ont tenté de faire valoir cette composante et d'autres viennent les compléter sur des problématiques liées à l'utilisation des supports vidéo (Miriam Quintana-Robles, 1997 et Alfredo Robles, 1997) ou du multimédia (Patrice Venturini, 1997). La didactique, caractérisée par sa réfle-

réfléchir au  
positionnement  
des nouvelles  
thèses

(20) Voir en bibliographie les ouvrages déjà parus qui remplissent en grande partie ce rôle.

(21) La connection reste faible avec la didactique des mathématiques. Outre les quelques aspects théoriques évoqués dans le texte, on peut citer la thèse de Léonidas Tsoumpelis (1993).

(22) Nous renvoyons au texte correspondant de ce numéro – de M. Coquidé-Cantor et C. Vander Borght – pour ce qui concerne les thèses de biologie-géologie. Citons le cas d'une thèse récente en didactique des disciplines scientifiques : *Contribution à l'identification des réseaux conceptuels associés à l'enseignement-apprentissage de l'énergie (l'enseignement-apprentissage de l'énergie pris dans un contexte pluridisciplinaire et une problématique environnementale)*, Catherine Verseils-Bruguière (1997).

rence aux contenus enseignés, mais aussi par ses méthodes d'analyse, se doit en effet d'être également présente à ce niveau.

Daniel BEAUFILS  
IUFM de Versailles  
Centre d'Orsay

## BIBLIOGRAPHIE

ARSAC, G. et al. (Éds.) (1994). *La transposition didactique à l'épreuve*. Paris : La pensée sauvage.

BELHOSTE, B. et al. (1996). *Les sciences au lycée*. Paris : Vuibert-INRP.

DELACOTTE, G., TIBERGHIE, A. (Éds.) (1983). *Premier atelier international de recherches en didactique de la physique*. Paris : CNRS.

DRIVER, R. (Éd.) (1985). *Children's ideas in science*. Philadelphie : Open University Press.

DUMAS-CARRÉ, A. et GOFFARD, M. (1997). *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*. Paris : Armand Colin, Coll. Formation des enseignants.

INRP (1992). *Regards sur la modélisation*. Paris : INRP.

INRP (1994). *La didactique des sciences en Europe*. Aster, 19.

INRP (1994). *Nouveaux regards sur la modélisation*. Paris : INRP.

JOHSUA, S., DUPIN, J.-J. (1993). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : PUF, collection premier cycle.

LEMEIGNAN, G., WEIL-BARAIS, A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris : Hachette.

ROBARDET, G. et GUILLAUD, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris : PUF.

TOUSSAINT, J. (Éd.) (1996). *Didactique appliquée de la physique-chimie*. Paris : Nathan. Perspectives didactiques.

VERGNAUD, G., BROUSSEAU, G., HULIN, M. (1988). *Didactique et acquisitions des connaissances scientifiques*. Paris : CNRS.

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

**ANNEXE****LISTE DES THÈSES****1977**

VIENNOT, L. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Thèse d'état. Paris VII.

**1978**

SALTIEL, É. *Concepts cinématiques et raisonnements naturels : études de la compréhension des changements référentiels galiléens par les étudiants en science*. Thèse d'état. Paris VII.

**1979**

CREPAULT, J. *Le raisonnement cinématique*. Thèse d'état. Paris VIII.

KASTENBAUM, M. *Utilisation de schémas dans l'enseignement*. Paris VIII.

**1980**

BEN HAMIDA, J. *Modèles de fonctionnement de circuits électriques simples chez les enfants de 12 ans*. Paris VII.

**1981**

CHALOUI, E. *Mécanismes cognitifs utilisés par les élèves et leurs professeurs dans la résolution d'un problème électrocinétique. Rôle de la correction du problème, en classe, par les professeurs*. Paris VII.

DUREY, A. *Expérimentation d'un module d'électronique dans des classes de 4<sup>e</sup> de l'enseignement du second degré : contribution à l'évaluation des actions de formation des maîtres*. Paris VII.

MACEDO de BURGHI, B. *Étude des pré-acquis de l'enfant sur les notions de chaleur et de température. Application au processus d'enseignement-apprentissage*. Paris XI.

FAUCONNET, S. *Étude de la résolution de problèmes : quelques problèmes de même structure en physique*. Paris VII.

**1982**

MARTINAND, J.-L. *Contribution à la caractérisation des objectifs de l'initiation aux sciences et techniques*. Thèse d'état. Paris XI.



MÉHEUT, M. *Combustions et réaction chimique dans un enseignement destiné à des élèves de 6<sup>e</sup> ; analyse d'une expérience d'enseignement comportant la présentation d'un modèle particulière. Étude des conceptions des élèves.* Paris VII.

PIERRARD, M.-A. *Notions physiques, objets techniques et structures mathématiques à propos de la température au cycle moyen.* Paris VI.

JOHSUA, S. *L'utilisation du schéma en électrocinétique : aspects perceptifs et aspects conceptuels. Propositions pour l'introduction du potentiel en électrocinétique.* Aix-Marseille 2.

### 1983

CLOSSET, J.-L. *Le raisonnement séquentiel en électrocinétique.* Paris VII.

### 1984

ABBOUD, R. *Le phénomène d'induction électromagnétique et son enseignement au lycée et à l'université.* Paris VII.

HADADAH, K. *Étude comparative de l'histoire et de l'épistémologie de l'optique géométrique et des représentations des élèves libanais dans le même domaine.* Paris XI.

KHRAIBANI-MOUNAYAR, S. *Registres d'interprétation des élèves et des professeurs de collège dans le domaine de la mécanique.* Paris VII.

### 1985

GUESNE, É. *Contribution à la définition d'un enseignement sur la lumière et l'optique pour les enfants de 13-14 ans.* Paris XI.

JOHSUA, S. *Contribution à la délimitation du contraint et du possible dans l'enseignement de la physique. Thèse d'état.* Aix-Marseille 1.

SÉRÉ, M.-G. *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et propositions de stratégies pédagogiques pour en faciliter l'évolution.* Thèse d'état. Paris VI.

FAWAZ, A. *Image optique et vision : étude exploratoire des difficultés des élèves de Première au Liban.* Paris VII.

### 1986

MAURINES, L. *Premières notions sur la propagation de signaux mécaniques : étude des difficultés des étudiants.* Paris VII.

### 1987

DAVOUS, D. *Analyse d'un système d'enseignement supérieur : le premier cycle d'études médicales. Recherche et expérimentation sur l'enseignement de la chimie à finalité biomédicale.* Thèse d'état. Poitiers.

DUMAS-CARRÉ, A. *La résolution de problèmes en physique au lycée. Le procédural : apprentissage et évaluation.* Thèse d'état. Paris VII.

DUREY, A. *Vers des activités didactiques de mise au point de modèle de physique avec des micro-ordinateurs. Exemples : trajectoires, frappes et rebonds de balles en rotation.* Thèse d'état. Paris VII.

### 1988

LEFÈVRE, R. *Contribution à l'étude des conceptions des étudiants de l'université sur le thème de l'optique.* Thèse d'état. Paris VII.

ROZIER, S. *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire.* Paris VII.

### 1989

BENSEGHIR, A. *Transition électrostatique-électrocinétique : point de vue historique et difficultés des élèves.* Paris VII.

LOUMIS, A. *L'introduction aux modèles vectoriels en physique et en mathématiques : conceptions et difficultés des élèves, essais de remédiation.*

ABBOUD, R. *Difficultés de l'enseignement dans deux domaines de la physique : le phénomène d'induction électromagnétique et la propagation des ondes mécaniques.* Paris VII.

GIRAULT, Y. *Contribution à l'étude de la bande dessinée comme outil de vulgarisation scientifique.* Genève.

### 1990

GOFFARD, M. *Modes de travail pédagogique et résolution de problèmes de physique.* Paris VII.

STAVRIDOU, H. *Le concept de réaction chimique dans l'enseignement secondaire. Étude des conceptions des élèves.* Paris VII.

ZIMMERMAN, M.-L. *Concept de chaleur : contribution à l'étude des conceptions d'élèves et de leurs utilisations dans un processus d'apprentissage.* Genève.

### 1991

SOLOMONIDOU, C. *Comment se représenter les substances et leurs interactions ? Étude chez de jeunes élèves du collège.* Paris VII.

BEAUFILS, D. *L'ordinateur outil de laboratoire dans l'enseignement des sciences physiques ; propositions pour la construction d'activités, première analyse des difficultés et des compétences requises chez les élèves de lycée.* Paris VII.

KAMINSKI, W. *Optique élémentaire en classe de quatrième : raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement.* Paris VII.

**1992**

WINTHER, J. *Étude didactique de l'utilisation de l'informatique pour la modélisation et la manipulation de modèles en sciences physiques*. Paris XI.

**1993**

COELHO, S.-M. *Contribution à l'étude didactique du mesurage en physique dans l'enseignement secondaire : description et analyse de l'activité intellectuelle et pratique des élèves et des enseignants*. Paris VII.

TSOUMPELIS, L. *Contribution théorique à la didactique des sciences physiques ; explications et modèles dans des situations a-didactiques en sciences physiques : le cas de la concentration molaire*. Lyon I.

**1994**

BOULDOIRES, B. *Quelle énergie pour les électroniciens : contribution à la catégorisation d'un enseignement de la notion d'énergie dans les sections électroniques des lycées techniques*. Toulouse III.

CALDAS, H. *Le frottement solide sec : le frottement de glissement et non-glissement*. Paris VII.

CHAUVET, F. *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception*. Paris VII.

COMTE, M.-J. *Approche des odeurs et des saveurs à l'école élémentaire*. Paris VII.

**1995**

ROLETTA, E. *La nature du savoir scientifique. Points de vue d'enseignants et de futurs enseignants*. Montpellier II.

DIMITRACOULOPOULOU, A. *Le tutorat dans les systèmes informatisés d'apprentissage : étude, conception et réalisation d'un tutoriel d'aide à la représentation physique des situations étudiées par la mécanique*. Paris VII.

RAINSON, S. *Superposition des champs électriques et causalité : étude de raisonnements, élaboration et évaluation d'une intervention pédagogique en classe de mathématiques spéciales technologiques*. Paris VII.

ROBARDET, G. *Didactique des sciences physiques et formation des maîtres : contribution à l'analyse d'un objet naissant*. Grenoble I.

**1996**

GUILLON, A. *Étude épistémologique et didactique de l'activité expérimentale en vue de l'enseignement et de l'apprentissage des démarches du physicien, dans le cadre des travaux pratiques de première et deuxième année d'université*. Paris XI.

SAINT-GEORGES, M. *Formation des professeurs de sciences physiques par la didactique*. Paris VII.

DOULIN, J. *Analyse comparative des difficultés rencontrées par les élèves dans l'appropriation de différents types de graphismes techniques en classe de seconde, option TSA*. ENS Cachan.

CALMETTES, B. *Contribution à l'étude des curriculums. Le cas de l'enseignement de l'électrocinétique dans les classes du second degré des lycées d'enseignement général et technologique*. Paul Sabatier, Toulouse.

GOMATOS, L. *Résolution de problèmes en petits groupes. Contributions et difficultés*. Paris VII.

CANAL, J.-L. *Courant, tension, résistance et énergie. Essai de conceptualisation des grandeurs fondamentales en électricité*. Toulouse.

### 1997

PATEYRON, B. *La mobilisation des savoirs dans la formation professionnelle*. Lyon.

QUINTANA-ROBLES, M. *Étude didactique de films comme aide pour l'enseignement de la physique. Cas de l'expansion des gaz*. Lyon I et II

ROBLES, A. *La vidéo comme support didactique en physique. Interprétation microscopique d'un phénomène macroscopique : la propagation du son*. Lyon I et II.

ROBINAULT, K. *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques*. Lyon.

MORGE, L. *Essai de formation professionnelle des professeurs de sciences physiques portant sur les interactions de classe*. Paris VII.

VERSEILS-BRUGUIÈRE, C. *Contribution à l'identification des réseaux conceptuels associés à l'enseignement-apprentissage de l'énergie (l'enseignement-apprentissage de l'énergie pris dans un contexte pluridisciplinaire et une problématique environnementale)*. Montpellier II.

VENTURINI, P. *Conception et évaluation d'une base de données hypermédia. Révision du programme de la classe de Seconde*. Toulouse.

### 1998

LASCOURS, J. *Étude d'un objet d'enseignement : le condensateur*.

LAURENT-ROLLIN, S. *Identification par les élèves de critères d'évolution des exercices : un exemple en chimie en classe de Seconde*. Aix-Marseille.

BENEY, M. *Contribution à l'analyse des phases manipulatoires des travaux pratiques de physique en premier cycle universitaire. Les apprentissages possibles à travers la conduite de l'action*. Paris XI.

LAUGIER, A. *Les obstacles épistémologiques et la représentation de la transformation chimique*. Montpellier.

HIRN, C. *Transformations d'intentions didactiques par les enseignants : le cas de l'optique élémentaire en classe de 4<sup>e</sup>*. Paris VII.

GANARAS, K. *La conceptualisation des équilibres chimiques*. ENS Cachan.