

L'ORDINATEUR DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES : QUESTIONS DE DIDACTIQUE

Alain DUREY (*coordination*)

École Normale Supérieure de Cachan

61 av du président Wilson, 94235 CACHAN CEDEX

durey@lirst.ens-cachan.fr

Daniel BEAUFILS

INRP - Technologies nouvelles et Éducation

91 rue G. Péri, 92120 MONTROUGE.

beaufils@inrp.fr

Résumé

L'invention d'utilisations de l'ordinateur (idées, procédés, activités) ne peut être détachée d'un questionnement didactique. Pour certaines réalisations telles que les logiciels d'EAO/EIAO ce questionnement est à l'origine de la conception ou bien intégrée à celle-ci. Dans d'autres cas, c'est l'innovation technologique qui en est le moteur, mais celle-ci doit alors conduire à une étude des implications didactiques et c'est parfois la didactique même qui est interrogée en retour. Nous montrons cette interrelation sur trois grands types de travaux : l'application de connaissances didactiques, l'étude de propositions curriculaires et l'exploration de nouveaux outils. Cette présentation s'appuie sur des exemples ayant donné ou donnant lieu à des recherches didactiques : la création d'un logiciel d'aide à la résolution de problèmes de mécanique, l'utilisation de l'ordinateur "outil de laboratoire" et la simulation.

1. Introduction

Depuis les premiers essais d'utilisation de l'ordinateur à des fins pédagogiques de nombreuses réalisations informatiques et idées d'exploitation en classe de physique-chimie ont été proposés¹. Tout un ensemble de travaux a été orienté vers la conception de logiciels permettant l'apprentissage, plus ou moins autonome, de connaissances de physique ou de chimie : l'EAO (Enseignement Assisté par Ordinateur), relayé par les idées de l'EIAO (EAO fondé sur des moteurs d'Intelligence Artificielle) puis par celles de... l'EIAO en tant qu'Environnement Interactif d'Apprentissage par Ordinateur. Dès le début, ces réalisations ont montré la nécessité de travailler la structuration des contenus. Très vite, les observations ont montré que cette structuration n'était pas indépendante des apprenants, tant au niveau général des processus d'apprentissage qu'au niveau de la prise en compte de leurs préconceptions dans le domaine considéré.

Parallèlement, la didactique avait commencé d'analyser les conceptions et raisonnements des élèves dans différents domaines et mis en avant l'importance des tâches de résolution de problèmes dans l'apprentissage. L'hypothèse d'une intersection constructive entre les attentes didactiques et les potentialités de l'informatique a donc naturellement germé. Parmi celles-ci, nous développerons dans une première partie l'exemple de la construction d'un logiciel

¹ Voir les actes des journées Informatique et pédagogie des sciences physiques (depuis 1984), et les actes des journées Méthodes informatiques pour l'enseignement de la chimie (MIEC, depuis 1983).

"didactiquement intelligent" d'aide à la résolution de problèmes de mécanique du secondaire, fondée sur les connaissances apportées par la didactique dans ce domaine.

Toutefois, ces travaux n'ont pas eu beaucoup de répercussion dans l'enseignement des sciences physiques. Cela est dû, pour partie, à l'existence d'un autre paradigme : "l'ordinateur outil de laboratoire". Rendu possible par la réalisation de convertisseurs permettant la connexion de capteurs à l'ordinateur et fondé sur l'hypothèse d'un possible renforcement des activités expérimentales dans la classe, ce courant a rassemblé un grand nombre d'innovations depuis plus de quinze ans. Pourtant, les différentes réalisations logicielles et propositions pédagogiques, même si elles procédaient globalement de cette même "inspiration", montraient un ensemble d'approches très diverses². D'emblée, la question de la légitimation se posait, tant pour analyser les différentes tendances que pour donner des critères de choix dans une visée curriculaire et c'est donc la question des pratiques de référence qui se trouvait posée. La didactique avait donc là un terrain privilégié d'application de ses concepts et, en retour, se trouvait confrontée à des questions que l'innovation avait soulevées³. Nous présenterons, dans une seconde partie, différents travaux qui ont ainsi porté sur le choix de pratiques de référence et leurs implications dans l'évolution des contenus disciplinaires.

Un troisième courant peut être identifié à travers les différentes réalisations et les différentes propositions (y compris à l'intérieur des deux courants précédents) : la simulation. Perçue dès l'origine comme une utilisation fondamentale de l'ordinateur, puis reléguée derrière l'ordinateur instrument de mesure au laboratoire, la simulation prend aujourd'hui une nouvelle place, tant par l'évolution matérielle qui permet aujourd'hui des calculs très rapides et des représentations graphiques en haute définition, que du point de vue des pratiques de référence et des hypothèses même d'apprentissage. Si l'idée de la simulation modélisante est très ancienne⁴, le développement des sciences cognitives en didactique vient en effet relancer des travaux exploratoires sur l'apport des activités de construction et de manipulation de modèles. Nous indiquerons ici quelques hypothèses didactiques en jeu dans l'utilisation de certains logiciels de simulation-modélisation.

2. Application de connaissances didactiques à l'enseignement d'un thème : exemple en mécanique

2.1 Des travaux sur les conceptions, les raisonnements ...

Le domaine de l'enseignement de la mécanique dans le secondaire a fait l'objet de nombreux travaux didactiques, sur les conceptions et raisonnements des élèves ainsi que sur la résolution de problèmes. Ceux-ci ont montré que l'apprentissage de la physique pouvait "s'accommoder" chez l'élève de conceptions pourtant incompatibles avec la connaissance scientifique : citons l'exemple des mauvaises représentations au niveau des changements de référentiels⁵ et les conceptions dynamiques associant force et vitesse⁶. Mais ils ont également montré que ces conceptions résistaient à un simple enseignement des "bons modèles" et l'une des hypothèses fut qu'il convenait d'amener les élèves à découvrir les limites de leurs représentations,

² Voir par exemple le Bulletin de l'Union des Physiciens, n°731 (spécial Informatique, 1991).

³ Beaufils D., 1994. "De l'ordinateur à l'enseignement des sciences : questions de vigilances", in actes des 6èmes Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques, Paris : UdP-INRP, 67-72.

⁴ Jérôme P., L'informatique support logique de la démarche expérimentale en sciences naturelles, *Dossier APBG*, 1979.

⁵ Voir les documents d'accompagnement des programmes de physique des lycées et Saltiel E., 1978. *Concepts cinématiques et raisonnements naturels: études de la compréhension des changements référentiels galiléens par les étudiants en science*, Thèse, Paris VII.

⁶ Viennot L., 1977. *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Thèse : Paris VII.

notamment en les confrontant à des activités de résolution de problèmes. Parallèlement, les travaux sur la résolution d'exercices classiques de physique en lycée montraient la très faible proportion d'élèves capables de performances satisfaisantes en la matière et se sont orientés vers des "outils méthodologiques d'aide à la résolution" centrés sur la construction de représentations du système ou du phénomène : le diagramme des forces, le diagramme objet-interaction et le découpage temporel des mouvements⁷.

2.2 ... aux aides didactiques informatiques

On conçoit alors assez bien qu'un tel ensemble de connaissances didactiques sur les conceptions des élèves, leurs difficultés et les aides méthodologiques, constitue une formidable ressource pour l'enseignement. Mais, outre l'acquisition de ces connaissances, leur utilisation dans une activité différenciée où chaque diagnostic est individuel et suppose un suivi de la tâche de l'élève sur une durée minimale, ne peut guère être envisagée par l'enseignant seul dans sa classe.

On comprend ainsi que la construction de logiciels interactifs et "didactiquement intelligents" ait été engagée. La finalité est, en fait, double : il s'agit 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.

2.3 Le logiciel ARPIA

C'est à cette entreprise que s'est attelée Angélique Dimitracoupoulou⁸, dans le cadre d'une thèse de didactique au LIREST et au sein du laboratoire DRUID⁹. Notre objectif n'est pas ici de présenter le logiciel (ARPIA) ainsi créé, mais de montrer comment les principales hypothèses didactiques ont été le guide de la conception.

Les deux hypothèses-cadres de ce travail sont d'une part, la perspective constructiviste qui considère l'apprenant comme acteur principal de la construction de ses connaissances et d'autre part, l'importance de l'activité de représentation dans la compréhension et la résolution de problèmes.

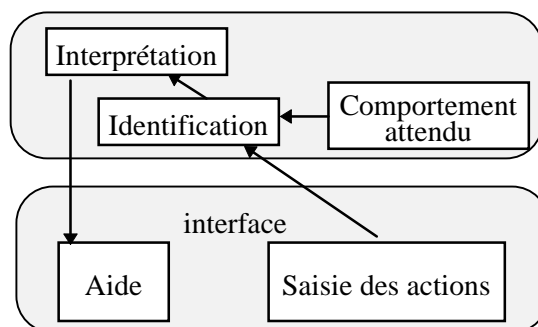
Ainsi, d'emblée, le logiciel conçu ne pouvait pas être un tutoriel mais devait être à l'écoute de l'utilisateur et être capable de diagnostiquer ses erreurs pour adapter l'aide à lui donner. Pour la même raison, cette aide ne pouvait se résumer à quelques consignes, voire à la donnée de la réponse en cas d'erreur. Au contraire, l'essentiel devait consister, en cas d'erreur identifiée, à proposer des situations complémentaires qui mettent en difficulté le raisonnement de l'élève et lui fassent prendre conscience de son erreur. C'est en ce sens que ce logiciel entre dans la catégorie des environnements interactifs d'apprentissage par ordinateur (EIAO). Mais c'est aussi dans ce sens qu'il pourrait être compris comme un logiciel d'enseignement intelligent, l'intelligence n'étant pas au niveau de la résolution des problèmes de mécanique, mais bien dans l'expertise didactique et pédagogique.

⁷ Dumas-Carré A. 1987. *La résolution de problèmes en physique au lycée. Le procédural: apprentissage et évaluation*, Thèse, Paris VII. Goffard M., 1990. *Modes de travail pédagogique et résolution de problèmes de physique*, Thèse, Paris VII.

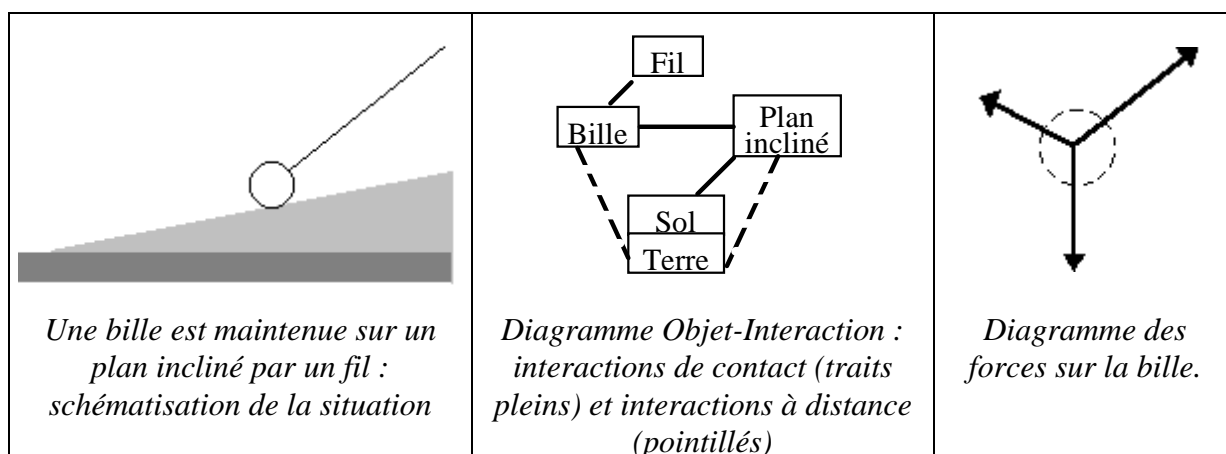
⁸ Dimitracoupoulou A., 1995. *Le tutorat dans les systèmes informatisés d'apprentissage: étude, conception et réalisation d'un tutoriel d'aide à la représentation physique des situations étudiées par la mécanique*, Thèse, Paris 7.

⁹ LIREST, Paris 7 et DRUID, Paris 7.

Le schéma ci-contre représente la structure au coeur du logiciel¹⁰. Dans ce dispositif, on trouve bien la question centrale de l'identification et de l'interprétation des actions de l'élève : c'est à ce niveau qu'interviennent toutes les connaissances didactiques permettant d'interpréter les éventuelles erreurs et de décider de l'aide appropriée.



La seconde hypothèse a conduit à construire les problèmes et les aides autour des représentations que sont le diagramme des forces (DF), de diagramme objet-interaction (DOI), et le diagramme des mouvements. L'activité de résolution du problème initial étant guidée par le passage par les différentes représentations. Cette nécessité didactique, ainsi que la volonté de proposer une ergonomie la plus proche possible des actions papier-crayon, a alors nécessité la création d'une interface graphique spécifique. À titre d'exemple, voici trois représentations d'une même situation-problème.



2.4 D'autres exemples

Nous avons présenté ci-dessus un cas particulier concernant un logiciel tutoriel de mécanique. Mais ce n'est bien évidemment ni le seul domaine possible ni la seule approche logicielle. De nombreux travaux actuels s'appuient sur les connaissances didactiques acquises dans d'autres domaines ou cherchent à exploiter des interfaces de résolution de problème "classiques" ou des environnements proches de la simulation. Ainsi, en chimie, un important travail de conception fondée également sur l'aide à la résolution de problèmes a été mené par F.M. Blondel et M. Schwob à propos des exercices quantitatifs de chimie¹¹ : constitution d'une base de connaissances "chimiques", programmation d'un résolveur automatique des équations, analyse didactique des difficultés des élèves, conceptions des aides et implantation dans un logiciel interactif. On peut également citer, en optique, les propositions de G. Rebmann¹²

¹⁰ Ce schéma est volontairement simplifié pour notre propos : voir les différents articles cités ci-dessus.

¹¹ Blondel F.-M., 1996. *Diagnostic et aide en EIAO : étude d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie*, thèse, Université Nancy I.

¹² Rebmann, G., L'atelier-schéma d'optique géométrique : un micromonde et son environnement d'apprentissage, *infra*.

d'une part et C. Buty¹³ d'autre part qui, renvoyant aux nombreux résultats de didactique¹⁴, s'appuient sur un support de représentation-simulation des rayons et faisceaux lumineux, et les recherches sur l'enseignement du modèle particulaire (pour les gaz) qui ont conduit à l'élaboration d'un logiciel de simulation¹⁵.

3. Travaux contribuant à l'évolution des contenus enseignés : cas de l'ordinateur au laboratoire de science

Depuis plus de quinze ans, l'ordinateur dit "outil de laboratoire" a occupé une place centrale, tant au niveau de la conception de logiciels et matériels que dans les usages effectifs dans les classes. Mais même si les propositions procédaient globalement de la même veine (acquisition automatique de mesures, représentation, modélisation mathématique) une étude rapide montrait un ensemble d'approches et de "choix" très divers, et d'emblée la question de la pratique de laboratoire prise en référence se trouvait posée. La didactique avait donc là un terrain privilégié d'application de ses concepts et se trouvait confrontée à des questions que l'innovation avait soulevées, notamment au plan des savoirs et savoir-faire à faire acquérir aux élèves.

3.1 Divers choix de pratiques de référence

Si l'hypothèse générale est bien d'introduire l'ordinateur non pas comme aide didactique, mais comme élément des contenus disciplinaires, alors la question de la cohérence avec ces contenus devait être posée dans une perspective curriculaire. Faire des propositions que l'on juge soi-même satisfaisante ne suffit pas, il faut pouvoir les objectiver, c'est-à-dire spécifier les critères de choix et la façon dont ils sont pris en compte. S'agissant par ailleurs d'éviter la simple auto-référence dans l'évolution de l'enseignement, c'est bien le concept de pratique de référence dans l'hypothèse d'une transposition¹⁶ qui devait servir d'outil de réflexion. La question n'est pas simple : car si tout le monde s'accorde pour dire qu'il s'agit là d'un usage scientifique de l'ordinateur à l'instar de l'activité dans les laboratoires, les avis divergent ou disparaissent quand il s'agit d'exemplifier. De quel "physicien" parle-t-on ? De quelle démarche scientifique veut-on parler ? Quel est le sens du terme même de modèle ?

L'une des possibilités s'est offerte dans les propositions de J.C. Trigeassou en terme de "modélisation expérimentale assistée par ordinateur". Présentant l'activité d'élaboration de "modèles de comportement" de systèmes (électroniques, par exemple) J.C. Trigeassou montre comment on peut, à partir de mesures, élaborer des relations mathématiques représentatives (fonction de transfert, par exemple) et comment les moyens informatiques contribuent à l'extension de cette activité dans les laboratoires¹⁷. La possibilité de représentations graphiques multiples et variées, l'utilisation de méthodes d'optimisation de modèles par

¹³ Buty C., 1997. Pour une étude de l'apprentissage dans une séquence d'enseignement utilisant une modélisation informatique en classe Terminale, communication au *Séminaire de recherche en didactique des sciences*, Lyon. et Progression d'une séquence d'enseignement assisté par ordinateur pour le programme de formation optique d'une image en classe de Terminale-spécialité, infra

¹⁴ Kaminski W., 1991. *Optique élémentaire en classe de quatrième: raisons et impact sur les maîtres d'une maquette d'enseignement*, Thèse, Paris 7.

¹⁵ Chomat A., Larcher C., Meheut M., 1990. Modèle particulaire et démarches de modélisation, rapport de recherche, Université Paris 7, association Tour 123.

¹⁶ Martinand J.-L. 1982. *Contribution à la caractérisation des objectifs de l'initiation aux sciences et techniques*, Thèse, Paris XI. Durey A., 1987. Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs, thèse d'état, Paris 7.

¹⁷ Trigeassou J.C., 1988. *Modélisation expérimentale*, TecDoc&Lavoisier..

ajustement de paramètres ou de résolution numérique d'équations différentielles, sont ainsi apparues comme transposables à l'enseignement de la physique dans le secondaire.

Référence : modélisation expérimentale	Transposition à l'enseignement
<p><i>Acquisition de mesures</i> : les mesures sont obtenues par des dispositifs automatiques et sont ensuite représentées par des graphes.</p> <p><i>Description par une fonction mathématique</i> : les mesures sont modélisées par une fonction mathématique ; c'est cette fonction ("<i>modèle empirique de comportement</i>") qui constitue la nouvelle phénoménologie (phénoménographie)¹⁸.</p> <p><i>Résolution d'équations différentielles</i> : les dispositifs peuvent être décrits par des modèles théoriques ("<i>modèle de connaissance</i>") conduisant à des équations différentielles sans solution analytique.</p> <p><i>Optimisation par moindres carrés</i> : il est possible d'utiliser un critère numérique robuste pour estimer l'écart entre les mesures et le modèle choisi : l'écart quadratique moyen. Sa minimisation peut être facilement obtenue par des méthodes itératives. Moyennant quelques restrictions sur les incertitudes des mesures, cette méthode donne une bonne optimisation.</p>	<p>Création d'interfaces et de logiciels d'acquisition adaptés aux matériels et budgets d'un lycée.</p> <p>Outils de calculs et de traçage de courbes. Ces outils sont essentiels puisqu'ils permettent d'analyser des représentations non nécessairement réductibles à une droite. De plus, leur utilisation permet de discuter de la validité des interpolations et extrapolations (limite du modèle).</p> <p>Ces outils permettent de traiter des situations pour lesquelles les élèves savent obtenir les équations différentielles mais ne connaissent pas l'éventuelle solution analytique. La résolution numérique permet d'éviter soit la mathématisation du problème, soit la réduction de la situation.</p> <p>Cette méthode facile à programmer permet d'obtenir rapidement un ajustement des paramètres d'un modèle, même non linéaire. On peut ainsi étudier, par exemple, des constantes de temps de circuit RC ou RL.</p> <p>De plus il permet d'introduire une première prise en compte des incertitudes.</p>

C'est dans ce sens que J. Winther¹⁹ a travaillé la possibilité de *transposer les activités de modélisation expérimentales* et fait des propositions pour l'enseignement de l'électricité en classe de Seconde (option TSA) et de Première (F1 et E) où l'utilisation de l'ordinateur pour la mesure, la représentation et l'identification de modèles (fonctions mathématiques) est intégrée. Le travail de conception de logiciels adaptés à des matériels facilement accessibles aux établissements et d'élaboration d'activités scientifiques dans les classes a ainsi été clairement pensé en référence à une pratique scientifique.

Mais une telle référence n'est pas sans soulever de questions. Si celle-ci peut s'adopter de façon claire dans un enseignement à visée technique, il n'en est pas de même dans un enseignement de sciences physiques général. L'analyse de la situation (contenus enseignés, finalités, contraintes matérielles) montrait facilement la difficulté à concilier des méthodes et instruments modernes et des savoirs anciens. Cet anachronisme est en fait un écart fondamental : ainsi, l'étude de la chute libre en introduction des lois de Newton est à l'image

¹⁸ Voir *Regards sur la modélisation*, INRP, 1992 et *Nouveaux regards sur la modélisation*, INRP, 1994.

¹⁹ Winther J., 1992. *Étude didactique de l'utilisation de l'informatique pour la modélisation et la manipulation de modèles en sciences physiques*, thèse, Université PARIS 11.

de la science du XVII^e siècle et évidemment en déphasage complet avec la précision des instruments de mesures actuels et les méthodes de modélisation automatique... En d'autres termes, les critères ne sont pas les mêmes, et donc la référence ne peut être la même. C'est pour essayer de résoudre cette situation qu'est issue la proposition de D. Beaufils²⁰ de se référer à un "*modèle épistémologique du physicien*", et plus précisément aux concepts de science normale, paradigme et conviction²¹.

Référence : concepts épistémologiques	Transposition à l'enseignement
<i>Paradigme</i> : l'ensemble des théories, méthodes et dispositifs, constitue le cadre des travaux de recherche scientifique partagé par une communauté.	L'objectif de l'enseignement est bien de montrer comment, à l'heure actuelle, le physicien interprète tel phénomène, avec quelle théorie, avec quelles méthodes.
<i>Science normale, résolution d'énigmes</i> : dans son activité ordinaire, le physicien s'attache à la résolution de problèmes dont la solution est a priori accessible dans le cadre des connaissances en cours.	Il s'agit donc de ne pas prétendre à faire découvrir de nouvelles lois ou grandeurs, mais bien de proposer des problèmes montrant que les connaissances apportées permettent bien de construire la bonne interprétation.
<i>Conviction</i> : il n'y a ni preuve ni erreur, il y a adhésion ou non. Vérifier une loi n'est pas un processus logique mais la constatation que la loi nous satisfait.	Il ne s'agit pas de vouloir fournir des expériences qui "prouvent" mais bien des situations qui sont éloquentes. La validité de la réponse de l'élève devra être estimée non pas en fonction de ce qu'il "faudrait trouver" mais de la cohérence interne de celle-ci.

C'est dans ce cadre général permettant de définir des *activités d'investigation scientifique*, proche de la résolution de problèmes, mais cette fois en prise directe avec les mesures, que les outils de calcul et de représentation graphique de la modélisation expérimentale pouvaient prendre leur place. Là encore, le travail de réflexion didactique a amené la création d'outils logiciels nouveaux.

Mais, travaillant dans un cadre institutionnel contraint, le travail évoqué ci-dessus a montré en quelque sorte les limites des possibles : la référence à des activités scientifiques modernes dépassait évidemment les programmes mais aussi les modalités pédagogiques en place au niveau secondaire. La prise en compte dans la démarche générale de la partie centrée sur la formulation d'une question scientifique, l'élaboration d'un protocole et le montage d'une (ou plusieurs) expérience(s), de même que l'analyse critique des résultats et leur communication en interaction avec des pairs, ne sont en fait guère envisageables en dehors, par exemple, d'activités de projets en université. C'est dans ce sens qu'Alain Guillon a travaillé au niveau d'un enseignement de physique de DEUG²². Ainsi, sur un thème donné, une question de physique est posée aux étudiants. La question est formulée de façon très globale²³, et pour la

²⁰ Beaufils D., 1991. *Ordinateur outil de laboratoire dans l'enseignement des sciences physiques, propositions pour la construction d'activités, première analyse des difficultés et des compétences requises chez les élèves de lycée*, Thèse, Paris 7.

²¹ Voir T. Kuhn et G. Fourez, en particulier.

²² Guillon A., 1996. *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*. Thèse, Paris 11.

²³ Par exemple : comment les différents paramètres physiques influencent-ils la formation d'onde à la surface de l'eau d'un aquarium ? Ou comment la résistivité d'un métal ou semi-conducteur varie-t-elle avec la température ?

résoudre, il est clairement indiqué qu'il « s'agit de mettre en oeuvre une démarche complète de physicien et de s'initier à la communication scientifique écrite et orale ». Les étudiants doivent donc, par binôme, procéder aux différentes étapes, notamment, dans la phase préparatoire :

- délimiter le sujet et reformuler la question en termes et objectifs plus précis ;
- faire une recherche documentaire ou une étude théorique ;
- décrire le modèle retenu ; donner les ordres de grandeur des résultats attendus ;
- décrire les expériences prévues et les grandeurs à mesurer ;
- justifier le choix des appareils, la précision nécessaire ;
- dire comment la confrontation modèle-mesures sera effectuée.

Ensuite, le travail est centré sur la conduite à terme de l'investigation ainsi planifiée, et les résultats doivent faire l'objet d'un rapport final reprenant les parties théoriques utiles, le protocole expérimental justifié et présentant les résultats discutés et les conclusions argumentées. Sur le plan de la recherche didactique, ce travail concret a d'abord conduit à analyser les démarches du "physicien" et à les modéliser en quatre types : démarche expérimentale, théorique, de simulation et mathématique. Par ailleurs, il a montré la nécessité d'un enseignement complémentaire visant l'acquisition de "savoirs déclaratifs épistémologiques" (sur les modèles et les démarches, notamment) et de métasavoirs correspondant à une attitude réflexive sur les stratégies mises en oeuvre dans les projets.

3.2 L'implication sur une évolution des contenus à enseigner

Si la didactique peut/doit ainsi intervenir en phase avec le développement d'une innovation, elle se trouve également interpellée par les conséquences d'une telle évolution. Pour ce qui nous concerne ici, la question des *nouveaux savoirs et savoir-faire liés à l'utilisation de moyens informatisés* est évidemment incontournable. Là encore, une partie des questions relève d'une approche à visée curriculaire : savoir si telle ou telle notion relève de telle ou telle discipline (physique, mathématique ou informatique) est tout à la fois essentiel et difficile, et toute décision conduit à une évolution des programmes, des modalités d'évaluation et des formations des enseignants²⁴. Mais nous voulons ici prendre un autre point de vue : celui de la recherche des éventuelles difficultés des élèves ou étudiants.

La didactique a montré en effet qu'il convenait de ne pas se contenter d'enseigner ni d'évaluer les acquis par des situations standards. Les "erreurs" des élèves ne sont pas nécessairement la conséquence d'un travail personnel insuffisant, mais peuvent provenir d'une mauvaise compréhension, d'une compréhension "à côté" (*misconception*, en anglais) et que, parfois, seule une investigation didactique peut dépister.

Un tel travail a été fait au niveau des méthodes de calcul numérique et, plus récemment, au niveau de l'utilisation des méthodes d'optimisation de modèle citées ci-dessus. Ainsi, par exemple, il a été montré que l'utilisation de la dérivation numérique - présente dans tous les logiciels "outil de labo" - ne pouvait se passer d'une explication, voire d'une activité papier-crayon, en dépit de son apparente simplicité : certains élèves associent en effet cette "dérivée" à celle qu'ils ont apprise en mathématiques et sont persuadés que, partant d'un ensemble de points expérimentaux, le logiciel calcule la fonction mathématique "correspondante", effectue la dérivation analytique, puis "rééchantillonne" pour donner une série de points²⁵. On comprend aisément qu'une telle idée, même non explicitée, empêche de comprendre l'amplification du "bruit" qui peut résulter d'une telle opération sur des données un peu

²⁴ Voir, par exemple, les propositions de l'UDP : encart BUP n°778, novembre 1995.

²⁵ Il convient ici de penser aux ambiguïtés qui risquent d'être amplifiées avec les logiciels de calcul formel.

"fluctuantes". De même, la résolution numérique automatique d'une équation différentielle entrée sous la forme $y'' = f(y, t)$ et produisant une représentation graphique de la solution, peut-elle conduire à une erreur de lecture de celle-ci : malgré un affichage explicite, certains élèves peuvent voir la représentation du graphe $y \rightarrow y''$.

De plus, pour la résolution numérique des équations différentielles, comme pour la méthode des moindres carrés, l'expérience a montré que la présentation de leur principe n'était pas toujours bien reçue par les élèves, non qu'il s'agisse de calculs compliqués mais parce que cela ressemble à du bricolage sans réelle valeur scientifique...²⁶ Enfin, mais sans pouvoir détailler ici, il reste la question de l'évaluation de ces nouveaux savoirs et savoir-faire. Si l'on cherche une réelle intégration de ces outils d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences, alors, à l'instar du multimètre, du pH-mètre ou de l'oscilloscope, il faut s'attacher à déterminer les connaissances exigibles, y compris au niveau de leur mise en oeuvre concrète²⁷.

4. Des recherches exploratoires : la simulation sur ordinateur

Un certain nombre de sujets peuvent conduire à des recherches exploratoires, c'est-à-dire orientées vers la production de résultats plus reproductibles que généralisables, et tournées vers les chercheurs avant les praticiens²⁸. En ce sens, la didactique s'intéresse aussi aux nouvelles utilisations de l'ordinateur comme outil de simulation.

On peut d'abord remarquer que, en termes de pratiques de référence, *la simulation se situe aujourd'hui au même niveau que l'expérimentation* : les situations de recherche ou de développement où l'on s'appuie sur la simulation sont de plus en plus nombreuses. Car outre les domaines où celle-ci a toujours été une des méthodes de test des modèles (hydrodynamique, physique nucléaire, astrophysique, etc.), l'évolution a touché d'autres domaines. La C.A.O. (conception assistée par ordinateur) a depuis longtemps dépassé la seule construction graphique pour, en électronique et résistance des matériaux notamment, passer à des méthodes informatiques permettant de faire fonctionner le modèle construit : le logiciel simule alors les comportements du dispositif et *renvoie des informations numériques et graphiques à l'instar de tout appareil de mesure*.

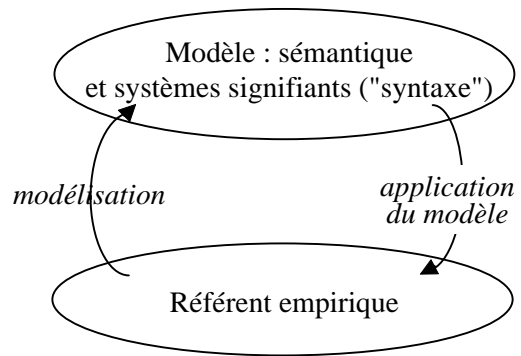
Au plan didactique, l'hypothèse est que la simulation sur ordinateur peut être le support d'activités pertinentes sur les plans scientifique et pédagogique qui, renforçant la dimension plus conceptuelle de la modélisation, apparaissent d'emblée comme complémentaires de l'expérience.

²⁶ Voir A. Ducaté et al. : "méthodes numériques... mathématiques et physique", infra.

²⁷ C'est évidemment, de façon plus large, la question de la définition et de l'évaluation des savoir-faire "expérimentaux" qui est en jeu. Pour ce qui concerne spécifiquement l'utilisation de moyens informatisés, voir Richoux et al. "Évaluation des savoirs et savoir-faire associés à l'utilisation de moyens informatisés dans les classes scientifiques du lycée", infra

²⁸ Le terme "exploratoire" est donc pris au sens de la classification de De Kétélé : « dans de telles recherches, le but principal n'est pas de voir ce qui se passe, ce qui est vrai, de prouver quelque chose mais de voir ce qui pourrait se passer, ce qui pourrait être vrai ».

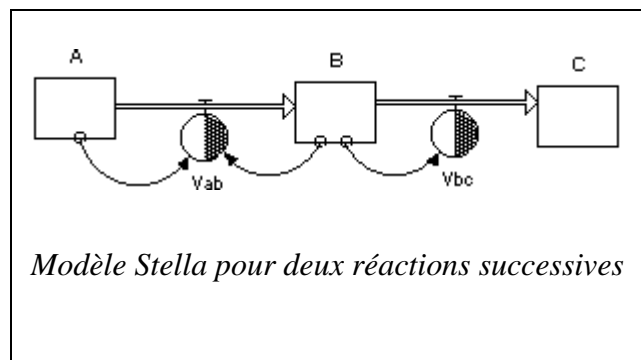
Les activités scientifiques sont en effet fondées sur l'élaboration de modèles (*modélisation*) et sur leur utilisation pour explorer le monde physique. Mais, outre la recherche d'un ajustement d'un modèle qui s'effectue en retour sur les *données* expérimentales, la simulation permet l'exploration du modèle : recherche de nouvelles propriétés ou de conséquences particulières. *La simulation n'est alors autre que de l'expérimentation sur modèle.*²⁹



Ainsi, les activités de manipulation de modèles et d'expérimentation sur modèle, *clairement situées dans le champ théorique*, sont donc *a priori* tout à fait pertinentes du point de vue de l'apprentissage des sciences. On peut même faire l'hypothèse que, étant plus claires dans leurs objectifs et dans la relation à leur champ de référence (les modèles et les théories) que ne le sont, de leur côté, les expériences de classes par rapport aux démarches expérimentales, ces activités seront porteuses d'une meilleure structuration/conceptualisation des connaissances.

De nombreux logiciels permettent aujourd'hui de telles activités dans les classes.

Un logiciel comme STELLA³⁰ offre clairement des possibilités de modélisation / simulation à un niveau essentiellement conceptuel : pas de représentations des objets ou de phénomènes visibles, mais bien des liens entre des objets symboliques traduisant des relations fonctionnelles entre des grandeurs physiques.



L'élaboration d'un modèle - en référence à l'expérience ou *inventé à partir d'une hypothèse théorique* - peut être suivie de sa "manipulation" pour en tester le comportement, les limites, ou plus simplement pour en découvrir les différents aspects. La facilité de modification des paramètres et d'obtention des résultats est évidemment là un atout majeur.

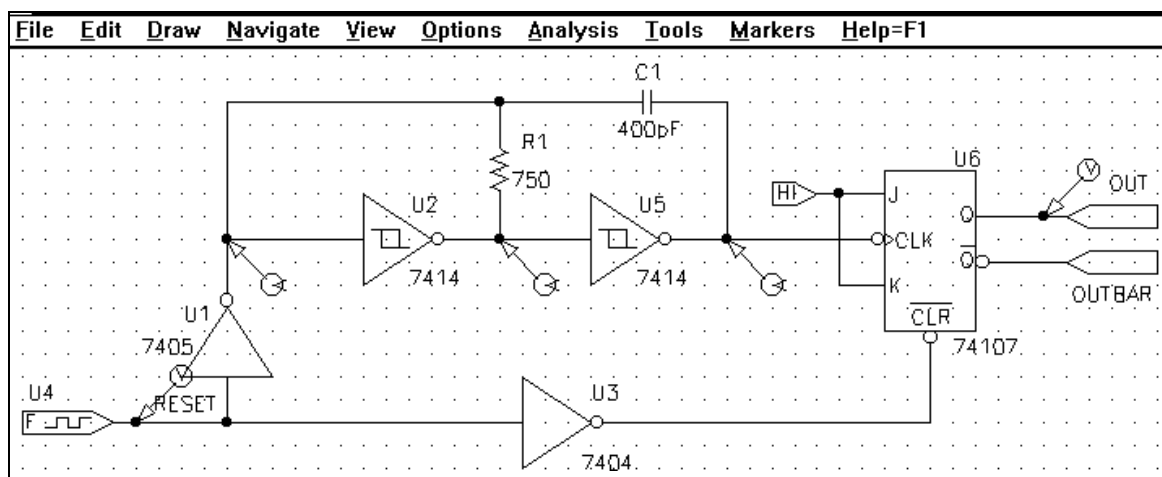
De même, le logiciel SPICE³¹ permet de construire des systèmes électroniques complexes et d'en faire l'étude. Ce qui est notable dans ce cas, c'est que ce logiciel est exactement le type d'outil utilisé par les concepteurs-développeurs de circuits qui effectuent ainsi les premiers tests d'un prototype par simulation (voir écran ci-dessous).

Au niveau pédagogique, on imagine bien que de telles "expérimentations sur modèle" peuvent être source d'autant de questions qu'une activité expérimentale, avec, encore une fois, un avantage essentiel résultant de la clarification de la situation : s'agissant explicitement d'un travail sur modèle, la recherche de l'explication est bien à faire dans les relations qu'entretiennent les paramètres et les grandeurs physiques, sans les artefacts incontrôlés de manipulations provoquant généralement la décentration vers le "ça ne marche pas".

²⁹ Voir par exemple: *Modèles et simulation*, actes des 9e journées sur l'éducation scientifique, 1987 ; voir également différentes communications dans ces 8e journées.

³⁰ Distribution KBS, Paris, France. *Les logiciels de simulation : des outils pour la modélisation*.

³¹ Diffusion ALS Design, Boulogne-Billancourt, France.



SPICE : éditeur de schémas

De telles utilisations, complémentaires d'une activité sur paillasse, peuvent donc en retour contribuer à clarifier ces dernières. Mais elles impliquent une nouvelle organisation du temps et du mode de travail des élèves/étudiants (travaux dirigés avec moyens informatiques et plages d'autoformation) qui semble aujourd'hui adaptée plutôt à la formation initiale ou continue des maîtres.

5. Conclusion / Ouverture

Les exemples choisis ici pour montrer les liens nécessaires entre innovation technologique et didactique n'ont bien évidemment pas permis de tout couvrir. D'autres travaux pourraient être cités et d'autres questionnements pourraient aussi être présentés à partir de nos exemples : la place d'un enseignement de l'informatique par exemple, et les liens avec d'autres disciplines (biologie, électronique). Enfin, de nouveaux procédés apparus depuis quelques années sont à leur tour générateurs de questions. Il s'agit en particulier des *hypermédia* [INRP & EPI, 96] pour lesquels on peut/doit s'interroger sur la correspondance entre structures informatiques et structures des connaissances ainsi que sur les activités cognitives mises en jeu dans l'exploitation et la navigation. Il s'agit également des *réseaux*, qu'ils soient locaux ou internationaux, avec les questions générales sur les conséquences d'une telle évolution dans le rapport au savoir. Nul doute que des spécialistes de l'innovation technologique, des pédagogues et des didacticiens trouveront là un terrain à explorer en commun.

6. Éléments bibliographiques

Tout au long du texte nous avons donné des références sur les travaux évoqués. Voici en complément, des références d'ouvrages publiés et d'articles parus dans des revues françaises.

[Beaufils, 92] Beaufils D., Construction d'activités scientifiques en classe de lycée : à propos de l'ordinateur outil de laboratoire, in actes du colloque *Recherches en didactiques des disciplines : contribution à la formation des maîtres*, Paris : INRP, 1992, 183-199.

[Beaufils & Richoux, 96] Beaufils D., Richoux H., *Intégration de l'ordinateur outil d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences physiques au lycée*, Paris : INRP, Coll. Docutec, 1996, 130p.

[Beaufils & Schwob, 97] Beaufils D., Schwob M. (Eds), *Outils informatiques d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences physiques (II)*, Actes de l'Université d'été, Nantes, 1995, INRP-UdP, 1997, 272p.

- [Blondel et al., 94] Blondel F.M., Schwob, M., Tarizzo M., Capacités et limites du diagnostic des activités de l'élève dans un logiciel de résolution de problèmes, in actes des 6e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1994, 73-78.
- [Buty et al., 96] Buty C., Laborde C., Tiberghien A., Modélisation en optique géométrique en classe de quatrième à l'aide d'un micro-ordinateur, in actes des 7e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1996, 93-98.
- Collectif, *La transposition didactique à l'épreuve*, Grenoble : La pensée sauvage, 1994.
- [Dimitracoupoulou, 92] Dimitracoupoulou A., Un tutoriel d'aide à la résolution de problèmes de mécanique adapté à l'apprenant, actes des 5e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1992, 63-68.
- [Dumas-Carré et al., 89] Dumas-Carré A. et al., Deux approches pour modifier les activités de résolution de problèmes en physique dans l'enseignement secondaire : une tentative de synthèse, *Expérimenter-Modéliser*, Aster, n°8, 1989, 135-160.
- [Dumas-Carré & Goffard, 97] Dumas-Carré A., Goffard M., *Rénover les activités de résolution de problèmes en physique*, Armand Colin, 1997, 134p.
- [Durey, 96] Durey A., L'intégration des outils informatiques dans les programmes d'enseignement des sciences physiques, in actes des 7e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1996, 99-104.
- [Durey & Martinand, 94] Durey. A., Martinand. J.-L., Un analyseur pour la transposition didactique entre pratiques de référence et activités scolaires, in *La transposition didactique à l'épreuve*. Grenoble : La pensée sauvage, 1994, 73-104.
- [Durey, 96] Durey A., L'informatique dans l'enseignement des sciences physiques, *Didactique appliquée de la physique-chimie*, Nathan, 1996, 195-222.
- [Fourez, 88] Fourez G., *La construction des sciences*, Bruxelles : De Boeck Université, Coll. Le Point philosophique, 1988, 235p.
- [INRP & EPI, 96] *Hypermédia et apprentissage*, actes des 3^e journées scientifiques, 1996, 298p.
- [Johsua & Dupin, 93] Johsua S., Dupin J.J., *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Paris : PUF, Collection 1er cycle, 1993, 422 p.
- [Kaminski, 89] Kaminski W., Conception des enfants (et autres) sur la lumière, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n°716, 1989, 973-997.
- [Kuhn, 83] Kuhn T., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris : Flammarion, coll. Champs, 1983.
- [Meheut, 94] Meheut M., Enseignement de modèles particuliers et modélisation de systèmes gazeux, in actes des 6e *Journées Nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, UdP-INRP, 1994, 129-134.
- [Schwob & Blondel, 96] Schwob M., Blondel F.-M., Questions posées par la conception et la réalisation d'un environnement d'aide à la résolution de problèmes en chimie, *Didaskalia*, n_8, 1996, 111-137.
- [Trigeassou, 88] Trigeassou J.C., *Modélisation expérimentale*, TecDoc & Lavoisier, 1988.
- [UDP, 91] UDP, *Bulletin de l'Union des Physiciens*, spécial "Sciences Physiques et Informatique", n°731, 1991.
- [Viennot, 79] Viennot L., *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, Paris : Hermann, 1979.
- [Viennot, 96] Viennot L., *Raisonnement en physique*, De Boeck, Coll. Pratiques pédagogiques, 1996.
- [Weil-Barais & Brenasin, 94] Weil-Barais A., Brenasin J., *Étude de l'impact de l'utilisation d'outils informatiques par les élèves en sciences physiques*, MEN-LIREST, 1994.