

## **Didactique de l'utilisation de l'ordinateur en sciences physiques**

par A. DUREY et J. WINTHER  
GHDSO-LIREST Université Paris Sud

---

Nous allons montrer dans cet article qu'après des évolutions diverses, pendant une vingtaine d'années, l'informatique en sciences physiques s'est orientée vers une utilisation privilégiée : l'ordinateur outil de laboratoire.

Cette utilisation qui recueille le consensus des enseignants, qui bénéficie du soutien de l'Inspection générale repose sur plusieurs hypothèses implicites de départ :

- l'ordinateur outil de laboratoire va renforcer l'aspect expérimental de l'enseignement de sciences physiques,
- l'ordinateur va permettre de mieux enseigner.

Après un historique de l'introduction de l'informatique dans le système éducatif français nous analyserons la transposition des «pratiques» des laboratoires de recherches et de l'industrie à celles de l'enseignement.

Nous tenterons de montrer que «l'ordinateur outil de laboratoire» s'est organisé en objet autonome didactique se référant à la méthodologie des sciences physiques plus qu'au champ des connaissances, de cette discipline.

### **UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'INTRODUCTION DE L'INFORMATIQUE DANS L'ENSEIGNEMENT**

L'informatique envahit le quotidien, sinon dans les pratiques, en tout cas dans les discours. Dès 1970 s'impose l'idée que l'école doit prendre en compte ce phénomène.

D'éminents spécialistes sont successivement chargés du dossier informatique et enseignement.

Dans un rapport à la CEE en avril 1981 le professeur B. Schwartz pose le problème en ces termes «*Les facilités de l'ordinateur..., ne nous y trompons pas, cela n'est pas trivial, on ne peut pas en effet, simplement calquer la pédagogie nouvelle sur l'ancienne... il faut en réinventer une autre*». «*Si l'ordinateur est utilisé n'importe comment ou s'il est exclu de l'école, s'il est utilisé comme un gadget ou comme alibi pour masquer les vrais problèmes de l'école, les vraies insuffisances ou échecs du système éducatif, les vrais manques de moyens, les vraies inquiétudes des enseignants son influence sera catastrophique.*

*Si à l'inverse, on l'emploie à bon escient, sous certaines conditions si en particulier, il est considéré comme un moyen, comme une aide aux professeurs et aux élèves, si enfin il sert à faire réfléchir les enseignants sur leur pratique, alors il peut être très utile et très bénéfique*».

Le premier chargé de mission à l'informatique au Ministère de l'Éducation Nationale, le professeur W. Mercouroff déclarait que «*l'introduction d'une sensibilisation à l'informatique pouvait ouvrir l'enseignement secondaire sur le monde contemporain et avoir un effet secondaire sur les enseignants plus traditionnels, en obligeant les enseignants à se poser des questions sur le contenu de leur enseignement* ».

On remarque dans ces discours, l'accent mis sur la nécessité de revoir contenus et pédagogies, sur la nécessité d'ouvrir l'école vers l'extérieur et enfin sur les changements souhaités au niveau des enseignants.

Essayons maintenant de voir dans la réalité d'un lycée, comment ces principes et ces grands objectifs ont été mis en œuvre.

Au colloque Informatique et enseignement le Ministre de l'éducation nationale A. Savary présente ainsi le plan informatique :

«*Au terme du IX<sup>ème</sup> plan de 1988, la présence de l'informatique sera effective dans l'ensemble du système scolaire qui disposera de plus de 100 000 micro-ordinateurs. Aux mêmes dates, 100 000 enseignants auront reçu en formation continue les moyens cognitifs et pédagogiques leur permettant de mettre ces nouveaux outils au service de l'acte éducatif*».

Le plan informatique pour tous (I.P.T.) mené sous le gouvernement Fabius a été le plus ambitieux de tous puisqu'il a conduit à l'équipement de l'ensemble des établissements français.

Chaque plan d'équipement était accompagné d'action de formation des enseignants.

Cette politique de formation a évolué avec le temps.

Tout d'abord on a pensé qu'il était possible de transformer les enseignants en programmeurs et que leur formation terminée ils réaliseraient les logiciels dont les élèves avaient besoin.

On a donc mis en place, pour la réalisation de cet objectif, des modules de 50 à 100 heures pendant lesquels les professeurs apprenaient à programmer.

Au bout d'un certain temps on s'est rendu compte que cette conception était irréaliste : écrire un logiciel est extrêmement long et accessible uniquement à un petit nombre d'enseignants, fortement motivés.

La majorité des professeurs formés retournaient dans leurs classes avec un sentiments d'insatisfaction, incapables de réinvestir les connaissances acquises, dans leur discipline:

Remarquons que ce qui est important pour les responsables de l'école c'est de montrer la présence de l'informatique dans le système éducatif afin de satisfaire à l'exigence sociétale. Quoi de plus visible et satisfaisant pour ces exigences que la présence d'ordinateurs dans les établissements scolaires.

Mais à la question **des ordinateurs pour quoi faire ?** La réponse est explicitement laissée à la charge des enseignants formés «Les enseignants auront reçu une formation leur permettant de mettre ces nouveaux outils au service de l'acte éducatif».

Des spécialistes d'informatique, des scientifiques sont consultés pour essayer de donner un contenu à cet enseignement. Les principales discussions portent sur le choix alternatif d'un enseignement d'informatique ou d'une utilisation de l'informatique comme outil dans les disciplines déjà existantes. Dans l'enseignement obligatoire c'est ce deuxième point de vue qui l'emporte. En effet il assure très rapidement l'équilibre entre les exigences satisfaites de la société et les contraintes scolaires qui sont le moins bousculées. Cependant cela pose un problème aux enseignants car ils doivent absorber l'informatique dans leur discipline, là encore le compromis est rapidement trouvé, on utilisera l'informatique pour faire ce qu'on faisait avant, enseigner les

mêmes savoirs à la sauce informatique. Conclusion pas d'ouverture réelle sur les utilisations de l'ordinateur à l'extérieur de l'école, pas de changements dans les contenus et les pédagogies, pas de remise en cause chez les enseignants. Les discours d'orientation des spécialistes chargés du dossier informatique et enseignement sont restés sans effets, ils n'ont pas été suivis des moyens nécessaires, il n'y a pas eu d'évaluation de ces objectifs car la fonction sociale de ces spécialistes n'implique aucune responsabilité vis-à-vis des réalités quotidiennes de l'enseignement.

### **L'INFORMATIQUE ET L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES**

L'informatique dans l'enseignement des sciences physiques a suivi, dans les premières années, l'évolution que nous avons décrite précédemment.

Puis peu à peu une différenciation s'est produite.

Les professeurs de sciences physiques n'ont jamais vraiment adhéré au dispositif d'une salle d'informatique, commune à l'établissement, où sont regroupés les ordinateurs.

Tous les lycées et collèges sont équipés en 1990 d'une salle d'informatique comprenant 8 ordinateurs 8 bits ou d'un nanoréseau de 8 ou 6 postes.

Ces salles sont assez peu fréquentées par les professeurs de sciences physiques.

Le manque de fiabilité des premiers équipements et logiciels a découragé la plupart de ceux qui ont essayé de s'y rendre avec leurs élèves.

Dans l'enseignement technique scientifique, plus au contact avec les réalités industrielles, l'ordinateur est plus intégré dans les activités scolaires.

Si l'enseignement tutoriel et la programmation n'on pas rencontré le succès escompté, l'utilisation ordinateur outil de laboratoire fait aujourd'hui l'objet d'un consensus quasi général de la communauté des physiciens.

Pour deux raisons : les professeurs l'assimilent à un nouvel instrument de mesure et l'Inspection générale de sciences physiques soutient cette application de l'informatique.

De ce fait, et suite aux travaux de nombreuses équipes de recherche

dans ce domaine, existe sur le marché une quantité importante d'interfaces couplées avec des logiciels d'acquisitions. Les établissements commencent à s'équiper.

### **Problématique de notre réflexion**

C'est à la suite de cet état de fait dans lequel nous avons été plongés pendant plus de dix ans, en tant qu'innovateurs mais aussi en tant que formateurs à l'utilisation de l'ordinateur en sciences physiques, que nous avons essayé des solutions qui procèdent d'une autre logique que celle que nous venons de décrire. C'est tout naturellement que nous nous sommes intéressés à la façon dont l'informatique était utilisée ailleurs qu'à l'école dans toutes les activités professionnelles qui manipulent les sciences physiques. L'objectif étant de trouver des idées pour construire de nouveaux contenus et de nouvelles activités scolaires.

Notre travail dans un premier temps a consisté à étudier le passage entre savoir savant et savoir à enseigner, en nous posant la question de savoir comment trouver des pratiques sociales manipulant les sciences physiques avec l'informatique, qui puissent servir de référence pour l'utilisation de l'ordinateur en sciences physiques.

C'est ce que nous appellerons la transposition didactique.

Dans un deuxième temps notre réflexion a porté sur les finalités de cette utilisation.

Nous vivons actuellement sur un double consensus partagé par la communauté scolaire :

- l'ordinateur va permettre de renforcer l'aspect expérimental de l'enseignement de sciences physiques,
- l'ordinateur va permettre de mieux enseigner les sciences physiques.

C'est ce que nous appellerons «la grande illusion» et nous allons essayer de montrer qu'elle procède d'un mythe classique de l'enseignement des sciences physiques.

### **LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE**

L'utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques est le résultat d'une double transposition.

La première, se situe au niveau de la discipline, la seconde au niveau de l'utilisation de l'ordinateur.

Il y a à la fois une hiérarchie et une imbrication de ces deux transpositions, pour la commodité de l'analyse nous dissocierons les deux.

La première transposition que nous nommerons la transposition disciplinaire fait depuis longtemps l'objet d'un débat dans les milieux de la didactique.

### **La transposition disciplinaire**

Le problème d'un contenu d'enseignement en physique est un problème de double reconnaissance par la culture sociétale et par les physiciens. Nous allons essayer de voir quels sont les arguments dont nous disposons pour défendre la prise, en compte de ces nouvelles références pour l'enseignement de la physique en comparant avec la référence à la physique qui nous paraît implicite dans les choix actuels.

Ce qui paraît être le plus en cause et le plus sujet à critique actuellement de la part de physiciens qui se préoccupent de comparer leurs pratiques et celles de la classe de sciences physiques ce n'est pas tant le programme que les activités scolaires qui s'y réfèrent. M. Hulin a montré comment et pourquoi à son avis le lien de transposition n'existait plus entre la physique des physiciens et celle du lycée. A tel point que l'enseignement dit de «Physique» dans les lycées porte selon lui sur une autre matière que la physique.

Cet enseignement fonctionne en vase clos, coupé des physiciens, coupé des structures de la discipline, des pratiques expérimentales et des applications. M. Hulin va plus loin dans son analyse en montrant que «la Physique est une discipline qui ne "s'enseigne pas", ce qui signifie que "l'enseignement correspondant, au niveau secondaire ne peut reproduire, en nombre et à un niveau adéquat, assez de caractéristiques de la discipline pour s'assurer les justifications diverses"» (Connaissances effectivement exploitables, ouverture sur les résultats et les structures épistémologiques essentiels du savoir savant, ouverture sur des pratiques sociales qui en dérivent). L'analyse ainsi proposée par M. Hulin montre que la situation n'est satisfaisante sur aucun des points qui lui semblent caractériser la Physique.

Au niveau de la formulation elle est «maladroite, inefficace et inexploitable au niveau d'une compréhension un peu profonde de l'exploitation physique des phénomènes parce qu'elle manque d'ampleur et de généralité et qu'elle ne fait pas l'objet d'une présentation et

d'une discussion en tant que processus, et n'est introduite que comme procédé. Cet ensemble de recettes, dans l'esprit des élèves, côtoie les représentations «spontanées» qui, hors du contexte scolaire, perdurent et réapparaissent d'ailleurs dans ledit contexte dès que fléchit le secours des recettes. «Sur le plan expérimental la situation n'est pas plus satisfaisante». «Les savoir-faire pratiques des élèves restent très pauvres, la référence à l'expérience prend souvent l'aspect, dans les cours ou les manuels, de fausses démonstrations entachées encore des naïvetés de la redécouverte. Les manipulations font recours à un matériel «didactique» hors de prix et «ad hoc» qui enlève l'essentiel de leur intérêt aux manipulations car il s'agit d'un matériel «modèle» imposé dans une situation figée aux élèves. De nouveau, toute la réflexion liée à la modélisation est éliminée de l'enseignement et celui-ci se condamne à vivre replié sur lui-même, au milieu des objets qu'il s'est lui-même construit». La référence au savoir savant existe à travers les programmes, mais il semble que la façon dont la transposition fasse vivre ces contenus dans la nouvelle niche écologique de l'école produise des activités qui ne sont en rien comparables à celles du physicien. La proposition qui consiste à changer de pratique sociale de référence pour l'enseignement des sciences physiques pourrait être de nature à pouvoir rétablir cette correspondance sans perdre le bénéfice de la référence au savoir savant. En effet nous avons pris soin de ne pas remettre en cause les contenus notionnels du programme qui bénéficient de la reconnaissance des savants. Par ailleurs l'analyse de la pratique que nous avons ralié, qui pourrait être incluse dans un ensemble de pratiques caractérisées par une application de la physique, montre que ces pratiques supposent une démarche de modélisation qui est certes particulière, mais qui procède de savoirs et de méthodes générales de modélisation qui sont reconnaissables et comparables à celles des physiciens.

Comme nous l'avons dit l'utilisation de l'ordinateur outil de laboratoire dans l'enseignement procède d'une double transposition, la première disciplinaire et nous venons de montrer qu'elle ne se fait pas sans difficulté, l'autre informatique.

Montrons sur des exemples non exhaustifs quelles formes et quel statut l'utilisation de l'ordinateur revêt dans le monde de la recherche et de l'industrie, puis étudions sa transposition didactique dans l'enseignement où on va le voir elle s'est constituée en objet autonome obéissant à des hypothèses implicites et partagées par l'ensemble des utilisateurs.

## L'ORDINATEUR DANS LA SOCIÉTÉ SAVANTE ET INDUSTRIELLE

Le micro-ordinateur a envahi le laboratoire, selon une enquête menée par IBM citée par J.L. Lavallard dans la Recherche n° 181 les dépenses consacrées à l'informatique s'élèvent de 5 % à 20 % des dépenses d'un laboratoire. Le micro-ordinateur a modifié les approches de toutes les activités du chercheur. Celles-ci se répartissent selon cette même enquête de la façon suivante : expérimentation 15 %, conception 20 %, rédaction des rapports et des communications 25 %, collecte d'informations 20 %, administration 20 %. Mais ce qui est moins connu c'est que des orientations de recherches nouvelles et des concepts nouveaux sont liés aux nouveaux outils informatiques. Les simulations en physique statistique par la méthode de Monte-Carlo, l'étude des phénomènes de percolation c'est-à-dire l'étude statistique des faisceaux (clusters) existant dans un réseau de N sites. Un autre exemple est la marche aléatoire avec volume exclu qui est un processus impossible à étudier autrement que par simulation directe sur ordinateur. Ce type de marche aléatoire permet notamment de modéliser de longues molécules comme l'ADN ou certaines chaînes de polymères. Le deuxième grand champ nouveau de recherche concerne l'irréductibilité et les questions indécidables, plus connues à travers l'exemple des automates cellulaires. Jusqu'à présent les physiciens ont surtout étudié les phénomènes réductibles, pour lesquels on peut donner une description générale simple. Il a fort à parier selon Wolfram que dans la nature la réductibilité soit l'exception plutôt que la règle. Reste à savoir si les phénomènes irréductibles peuvent être approchés, simplifiés dans les formes réductibles qui seraient des cas limites. L'exemple de la turbulence comme système irréductible semble indiquer que non. En fait la seule méthodologie possible actuellement est fondée sur la simulation numérique.

Le troisième grand axe de recherche qui illustre les changements introduits par l'informatique dans les orientations de recherche vers de nouveaux concepts, concerne la modélisation du chaos qui produit les concepts d'attracteurs étranges et d'objets fractals.

Quelques exemples sont désormais connus : la longueur des côtes de Bretagne, les courbes de Hulia, le modèle proie prédateur, la boussole, la réaction oscillante de Beluwsow-Zhabotinsky, le chaos acoustique de la clarinette. D'une façon générale on a mis à jour des attracteurs étranges dans la plupart des questions difficiles, hydrodynamique, aérodynamique, flammes, turbulences, météorologie, chute en vrille des avions, réactions chimiques ou biologiques, problèmes

économiques. Ces concepts nouveaux résultent de l'exploitation systématique des possibilités énormes de calcul liées aux ordinateurs par l'intermédiaire de modèles représentant la complexité des systèmes à un macro-niveau. Les projets pour le futur immédiat prévoient des ordinateurs capables d'exécuter un Gflop, soit un milliard d'opérations par seconde (à titre d'exemple un PC en fait quelques centaines).

En dehors des domaines nouveaux qui sont liés aux «expériences numériques», le travail d'investigation expérimental a lui aussi été totalement modifié par trois outils informatiques : la chaîne d'acquisition et de stockage numérique, les logiciels de traitements de données et les outils logiciels et matériels de visualisation graphique. Même la résolution littérale d'équations est maintenant possible avec des logiciels comme TK-SOLVER ou  $\mu$ MATH.

Enfin on peut encore citer l'accès aux banques de données qui, comme par exemple en chimie permettent la classification et la recherche de molécules chimiques, tel ce logiciel chez Rhône Poulenc qui est capable de déterminer le code et de retrouver la molécule dans un fichier de 25 000 structures en moins de deux secondes, et cela à partir seulement du dessin d'une structure.

Dans le domaine industriel et technique les bouleversements ne sont pas moindres. La généralisation de l'utilisation des machines et des logiciels informatiques se fait dans une perspectives d'amélioration de la productivité, de plus grande fiabilité et de rapidité.

Quelques exemples parmi d'autres :

La construction-fabrication assistée par ordinateur (CFAO) joue un rôle essentiel dans l'industrie automobile.

Dans le domaine des alliages métalliques, le procédé de refroidissement le plus répandu, la trempe par immersion est en général difficile à contrôler ; c'est là qu'intervient le système de pilotage de l'opération et l'utilisation d'un mini-ordinateur.

Dans une raffinerie de pétrole la marche des installations est entièrement pilotée par ordinateur de façon à pouvoir s'adapter très rapidement à la qualité des bruts et à l'évolution de la demande.

Toutes les applications de l'informatique dans la recherche et l'industrie sont loin d'avoir pénétré dans le système éducatif.

Nous limiterons donc dans cet exposé aux systèmes d'acquisition, de traitements numériques et de représentation de données.

Nous essaierons de définir les conditions dans lesquelles s'est faite la transposition, les objectifs qu'elle s'assigne et l'objet didactique qu'elle a constitué.

### **EXPÉRIMENTER À L'AIDE D'UN MICRO-ORDINATEUR POURQUOI FAIRE ?**

Comme nous l'avons écrit un double consensus est sous-jacent dans ordinateur outil de laboratoire :

- l'ordinateur va permettre de renforcer l'aspect expérimental de l'enseignement de sciences physiques,
- l'ordinateur va permettre de mieux enseigner les sciences physiques.

Ces deux affirmations ne sont indépendantes qu'en apparence.

En effet depuis que les sciences physiques existent en tant que discipline constituée du système scolaire français tous les grands noms de cette science et les autorités ne cessent de réaffirmer :

la meilleure façon d'enseigner les sciences physiques est de renforcer leur côté expérimental.

Ainsi dans un article S. Joshua\* met en évidence cette constante affirmation en analysant les bulletins de l'Union des Physiciens de 1907 à nos jours.

*Le véritable caractère de la physique était masqué par l'appareil mathématique dont on le recouvrait et qui paraissait être l'essentiel. Aussi pour éviter ces errements fâcheux, il faut donner à l'expérience la place principale (Cotton 1925).*

*En un mot pour bien pénétrer l'esprit, il s'agissait d'élaborer la science elle-même, au lieu d'enseigner la science toute élaborée (Faivre-Dupaigne 1909).*

\* Le débat pédagogique à travers la lecture du bulletin des physiciens (1907-1980). B.U.P. n° 726, S. JOSHUA.

L'expérience, du moins dans ses débuts, servira de base à l'enseignement (Lazerges 1935).

On ne souligne pas assez quant on ne le cache pas soigneusement l'essence expérimentale des sciences physiques (Haby 1975).

La formation de l'esprit scientifique s'accomplira surtout grâce à l'initiation à la démarche scientifique (instructions ministérielles 1977).

L'expérience est la source première des connaissances (Mark 1972).

Et enfin tout récemment :

On doit privilégier la méthode inductive et le recours systématique à l'expérience (Mission de réflexion sur l'enseignement de la physique 1990).

Claude Espinasse\* dans un article affirme la base expérimentale de l'utilisation de l'ordinateur outil de laboratoire.

*C'est un lieu commun d'affirmer que dans les sciences expérimentales, la mesure est la base de toute connaissance, aussi bien pour le savant, lors de sa recherche d'explications ou de modèles, que pour l'étudiant lors de sa quête, pour la compréhension de ces modèles. En conséquence l'étudiant, tout comme le savant, doit être capable de mesurer avec précision et honnêteté.*

L'aptitude à mesurer est donc la première des capacités à développer, le premier objectif de la formation scientifique.

Dans le même temps où il juge que cette aptitude constitue une première étape de la démarche scientifique Claude Espinasse reconnaît que l'ordinateur outil de laboratoire n'est pas le meilleur moyen de développer cette capacité.

*Lors des premières leçons d'électricité, en classe de seconde, l'étude comparée des dipôles demande, pour être menée avec profit, le relevé préalable de nombreuses caractéristiques  $I(U)$ . Une méthode classique consiste à consacrer une séance de TP au montage et au*

\* Dossier Langage-info, novembre 1989, Claude Espinasse.  
L'acquisition de données pourquoi ? Comment ?

*relevé des mesures, une deuxième séance de travail, la semaine suivante, après que les élèves aient tracé les courbes caractéristiques, permet de mener l'étude souhaitée.*

*L'utilisation de l'ordinateur muni de sa carte d'acquisition, permet de ramener à presque rien la durée du mesurage.*

*La sauvegarde des caractéristiques sur la disquette, les impressions sur papier, permettent de consacrer l'essentiel du temps, mais surtout l'essentiel des activités des élèves à l'étude des caractéristiques (car il est évident que si l'objectif fixé avait été d'apprendre à mesurer, cette tâche n'aurait pu être confié à l'ordinateur).*

Voilà donc clairement affirmé que si l'aptitude au mesurage est une des parties de la démarche scientifique, l'utilisation de l'ordinateur ne constitue pas le moyen de la développer.

Dès lors on peut s'interroger sur l'utilité d'une acquisition automatique.

L'argument le plus souvent invoqué est la rapidité des mesurages. Il est possible de disposer en peu de temps d'un très grand nombre de mesures.

Dans beaucoup d'expériences les relevés peuvent être fait manuellement mais la séance de TP serait trop courte pour en avoir autant.

Cette fréquence élevée de mesurage permet d'accéder à des mesures inaccessibles d'une façon classique : décharge d'un condensateur, établissement d'un courant dans un circuit...

Il faut noter par ailleurs que la rapidité des mesurages peut modifier les conditions de l'expérience. Les caractéristiques d'une ampoule à incandescence déterminée manuellement et avec l'ordinateur sont différentes, les phénomènes thermiques d'échange n'ayant pas le temps de s'établir de la même façon.

Dans tout ce que nous venons de dire nous partons de l'hypothèse que l'élève trouve les montages déjà prêts à l'emploi sur la table de travail.

Mais il peut être possible d'organiser la séance de TP de façon que le montage lui doit dévolu.

Mais de toute façon, même dans ce cas, le mesurage lui est inaccessible car pris en charge par le logiciel.

Mais n'est ce pas déjà le cas dans l'utilisation d'un oscilloscope ?

Il n'en reste pas moins que dans l'un et l'autre cas, il reste à l'élève un certain nombre de réglages (comme sur tout appareil de mesures).

Sur l'ordinateur outil de laboratoire l'élève peut, si c'est la stratégie pédagogique du professeur, procéder à des réglages «hard», par exemple les calibres de l'interface et des réglages «soft» sur les paramètres du logiciel.

On voit donc que la technique de l'ordinateur outil de laboratoire ne renforce pas l'aspect expérimental de l'enseignement de sciences physiques.

Peut on émettre l'hypothèse que cet aspect serait renforcé en agissant sur les contenus ?

Les expérimentateurs de l'ordinateur outil de laboratoire en milieu scolaire ont tous été limités par les programmes.

Pour A. Durey et M. Laurent ce n'est pas l'exploration du réel qui guide ces programmes mais les possibilités supposées des élèves\*.

*Les étudiants ne sont jamais confrontés à des problèmes réels de physique ; on ne leur demande qu'une pseudo mise en forme mathématique puis la résolution mathématique.*

*Les programmes de physique ne sont pas tant conçus en fonction d'une complexité croissante des concepts de physique abordés, qu'en fonction des possibilités mathématiques des élèves à les résoudre ; on doit faire aux élèves la physique que leurs mathématiques leur permettent de faire.*

La lecture des programmes montre une grande stabilité. Ceux-ci ont relativement peu évolué en un siècle. Certes ils se sont adaptés aux évolutions des connaissances et des techniques mais pour des raisons qui tiennent principalement aux connaissances mathématiques des élèves (et des professeurs) ils sont dans l'ensemble éloignés de la réalité physique.

Dans un souci de simplification les mouvements sont sans frottement, les oscillateurs ont de faibles oscillations, les gaz sont parfaits, on évite les phénomènes transitoires, etc...

\* Quatrième Journée internationale de l'Éducation scientifique, 1-3 février 1982, Chamonix.  
Le micro-ordinateur pourquoi faire ? Alain Durey, Michel Laurent.

Si une telle démarche se justifie dans une première étape d'un apprentissage en sciences physiques elle a l'inconvénient de créer un hiatus, dans l'esprit de l'élève, entre la réalité du monde physique et la physique du milieu scolaire.

L'expérience montre qu'il lui est difficile de faire la jonction entre les deux.

Dès lors on peut imaginer du fait que l'outil mathématique est un obstacle qui empêche l'appréhension du monde physique réel par les élèves, que certaines opérations mathématiques répétitives, longues, difficiles et complexes soient prises en charge par l'ordinateur.

Mais même dans cette hypothèse on ne renforce pas l'aspect expérimental de l'enseignement des sciences physiques.

L'objet d'étude se rapproche de la réalité, on n'enseigne pas mieux mais différemment.

Mais si l'ordinateur outil de laboratoire ne renforce pas l'aspect expérimental des sciences physiques et donc, selon les physiciens, ne permet pas d'enseigner mieux, quel peut être son intérêt dans notre discipline ?

Nous l'avons déjà dit il permet d'enseigner différemment en approchant de plus près la réalité.

Cette vision des choses repose sur les contenus des sciences physiques et chimiques, mais on peut aussi l'aborder sous un aspect méthodologique.

Une des pratiques sociales de référence affirmée de l'enseignement de sciences physiques est la démarche du physicien.

Qu'en est il réellement ?

D'après J. Winther\* nous vivons actuellement sur une organisation artificielle.

*Une séance de TP se déroule selon un schéma théorique, immuable comportant plusieurs phases :*

1. *Exposé de la recherche et réalisation des protocoles opératoires.*
2. *Montage des expériences.*

\* Étude didactique des apports de l'informatique dans la modélisation et la manipulation de modèles en sciences physiques.  
Mémoire D.E.A. 1987-88 - LIRESP, Jean Winther.

3. Réalisation des expériences et des mesurages.
4. Traitement des données et mesures.
5. Modélisation.

*L'usage montre que les élèves n'ont, en général pas accès à la phase 1 et qu'un document constitue le départ des TP.*

*Les phases 3 et 4 forment, en durée, la majorité du travail de l'élève et compte tenu des impératifs horaires la phase 5 est conduite par le professeur qui mène toutes les opérations de conceptualisation, en principe avec l'aide collective de la classe.*

En terme de transposition des activités du physicien cette situation n'est pas satisfaisante et il est normal que les équipes des expérimentateurs aient cherché à rendre l'élève plus actif, en particulier dans cette phase 5.

Pour Guy Lefèvre et Christian Rellier\* :

*«Quel que soit le point de départ (rechercher un modèle qui pourrait représenter la réalité ou imaginer un modèle formel d'un phénomène physique) les objectifs des travaux pratiques sont toujours de placer l'élève en situation de confronter une image physique de la réalité et une idée formelle de l'idée qu'il s'en fait».*

*L'ordinateur, muni d'un dispositif d'interfaçage et de capteurs pourra réaliser d'une façon quasi automatique les mesurages. La multiplication des mesures permettra à l'élève de se centrer sur les activités de formulation des hypothèses et d'interprétation des résultats*

Pour J.L. Firpo, P. Neel, et L. Boyer\*\* :

*L'acquisition automatique des données bouleverse l'économie du TP traditionnel dans lequel l'essentiel du temps est consacré à la prise de mesures.*

*Par conséquent, si l'on se contente de reprendre le contenu des feuilles*

\* Actes des Journées informatique et pédagogie des sciences physiques  
Grenoble 14-15 mars 1988.  
Ordinateur outil de laboratoire. Faites votre choix.

\*\* Onzièmes Journées Internationales sur l'Éducation scientifique  
Chamonix 24-26 janvier 1989.  
Les aides didactiques pour la culture et la formation scientifique et technique.  
L'ordinateur en salle de travaux pratiques. Pourquoi ?

de TP traditionnels, les élèves vont vite se trouver inoccupés. Il faut profiter de ce gain de temps pour innover.

*C'est-à-dire aller dans les sens d'un apprentissage par l'élève de la démarche du physicien. Celle-ci consiste en l'élaboration de modèles théoriques cohérents du point de vue des mathématiques qui acquièrent leur légitimité quand ils sont vérifiés par l'expérience et leur efficacité quand ils permettent de faire des prévisions fiables sur le comportement des systèmes réels.*

*...la prise de mesures informatisées va apporter l'abondance et la précision des valeurs expérimentales à la disposition de l'élève et ce quelle que soit son habileté personnelle.*

*Ainsi les écarts à la prévision théorique pourront être discutés sur une base objective, tandis que dans le TP classique, tout manquement à la norme est inmanquablement attribué à la maladresse ou à l'incompétence du manipulateur.*

Pour Alain Guillon\* :

*Les didacticiens nous disent que la modélisation est l'activité qui distingue les sciences expérimentales et que les activités de modélisation réalisées par l'élève vont lui permettre le dépassement de ses représentations initiales.*

*Vaut-il mieux aborder un peu (et donc superficiellement) le plus grand nombre de branches de la physique ou apprendre à maîtriser les outils utilisés par les physiciens dans leur activité principale et spécifique : la modélisation ?*

*Dans un champ de connaissances en croissance continue, il semble préférable de faire porter l'effort sur les méthodologies plutôt que sur une connaissance encyclopédique.*

Cette conception est partagée par J.L. Martinand\*\* :

*Notre discipline peut elle vraiment rester la même ? Faut-il garder les mêmes modèles fondamentaux mathématiques résolubles (mouvements uniformément accélérés, oscillations harmoniques, lentilles minces...) qui forment les grands chapitres de nos cours ou introduire des*

\* Actes des quatrièmes Journées informatique et pédagogie des sciences physiques  
Toulouse 11-13 mars 1990.  
Modélisation. Quelques questions Alain Guillon.

\*\* Quatrièmes Journées internationales de l'Éducation scientifique  
Chamonix 1-3 février 1982.

*phénomènes plus complexes mais dorénavant prévisibles et, donc maîtrisables.*

Dans les mêmes Actes Annick Weil-Barraï écrit :

*«L'ordinateur peut permettre de concrétiser le domaine formel, notamment la capacité de systématisation, la capacité de réfléchir sur sa propre pensée, ce qui constitue des activités intellectuelles relativement élaborées jusque là réservées aux spécialistes.*

Toutes ces réflexions mettent en évidence l'origine de ce que nous avons surnommée «la grande illusion» : le renforcement de l'aspect expérimental des sciences physiques avec l'ordinateur outil de laboratoire ne résulterait pas tant du contact avec les objets de l'étude qu'avec la façon de les aborder.

#### **LA MISE AU POINT DE MODÈLES : ÉLÉMENT DE NÉGOCIATION AVEC LA NOOSPHERE\***

*«Remplacer du visible compliqué par de l'invisible simple» J. Perrin.*

*«Tout ce qui est simple est faux, tout ce qui est compliqué est inutilisable» P. Valéry.*

Le problème de la modélisation est un problème qui traverse toutes les sciences, celles qui sont plus liées à la recherche de l'explication, et à la construction de la connaissance, plus fondamentalistes aussi bien théoriques qu'expérimentales, et celles qui sont plus du domaine appliqué pour la conception et la production d'objets socialement finalisés (technologie, ingénierie, production industrielle). Ceci est à mettre en relation avec ce que B. Walliser appelle la pragmatique des modèles. Le modèle ayant pour objet de simuler le comportement d'un système en fonction de certains objectifs, et compte tenu de certains moyens. Il peut ainsi servir de support tant à la connaissance de l'objet par le sujet qu'à l'action du sujet sur l'objet. Si on analyse l'activité de modélisation on retrouve des grandes phases qui sont présentes dans toutes les utilisations sociales. La démarche élémentaire de modélisation concerne seulement le passage d'un modèle d'une strate à un modèle d'une strate immédiatement supérieure comptée sur l'axe

\* Noosphère : ensemble des gens et des forces sociales qui participe au choix et à l'établissement des savoirs enseignés.

théorique-empirique. Celui qui est le plus proche du théorique est appelé modèle théorique, l'autre modèle empirique ; étant bien entendu qu'ils ne sont théoriques que de façon relative.

Si par exemple on s'interroge sur le fait de savoir si un modèle du rebond d'une balle sur une surface rend compte des données observables sur le système (voir annexe 1).

Deux méthodes sont possibles : soit on fait des mesures des variables d'entrée et de sortie et on en déduit dans le cadre du modèle la valeur des paramètres ( $e$  : coefficient de restitution et  $f$  : coefficient de frottement dans le cas du modèle 2).

Soit on fait des hypothèses sur la valeur des paramètres et on regarde par simulation sur le modèle si elles conduisent à des valeurs des variables de sortie compatibles avec les données observables sur le système, ceci dans le cas où les paramètres ne sont pas exprimables simplement en fonction des grandeurs observables (coefficient d'amortissement du modèle 3).

Le modèle, à quelque niveau que ce soit, se présente sous la forme d'un ensemble de variables et de relations entre ces variables. En pratique, les variables de base correspondent aux entrées sorties du système, et les paramètres interviennent dans les relations entre ces variables, ils sont en quelques sorte caractéristiques du système.

Ils sont constants dans ce modèle, ils correspondent à une certaine stabilité et généralité du modèle, mais bien sûr, tout ceci est très local, tant spatialement que temporellement et ces paramètres peuvent être traités à leur tour comme variables faisant intervenir des paramètres plus profonds du modèle.

Dans ce processus de mise au point de modèles par recherche des valeurs d'un paramètre, on procède à un ajustement du modèle aux données observables pour améliorer de façon progressive un modèle particulier en passant par quatre phases successives.

– LA PHASE DÉDUCTIVE : consiste à appliquer les principes généraux de la théorie utilisée pour arriver à un modèle général théorique de la classe des systèmes à décrire, puis à faire des hypothèses qui particularisent le système et introduisent des paramètres spécifiques.

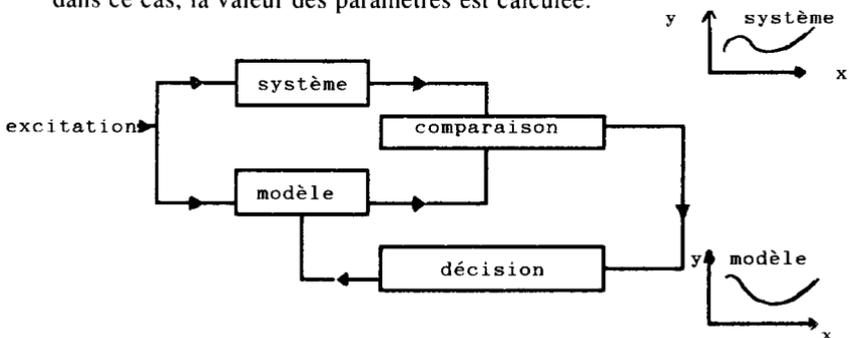
Ainsi le modèle théorique peut être mis en équation, ou explicité dans ses relations s'il s'agit d'un modèle plus qualitatif. Le modèle possède ainsi un ensemble de variables, de relations entre ces variables

et de paramètres utilisés dans ces relations. La résolution du problème consiste alors à trouver la valeur des variables de sortie en fonction des variables d'entrée et des paramètres. Cette résolution peut se faire littéralement ou numériquement par des méthodes de calcul qui ont repris de l'intérêt avec la micro-informatique et qui permettent la résolution de problèmes plus complexes, comportant plus de variables, plus de relations, plus de paramètres.

- LA PHASE PRÉVISIONNELLE : consiste à partir du modèle hypothétique à imaginer des expériences permettant de la tester. Imaginer peut se réduire à mettre en œuvre une expérience dans laquelle on étudie le système tel quel et mettre en place des dispositifs de mesure des grandeurs d'entrée et de sortie (voir annexe 1).

On mesure la vitesse avant et après (module et angle) pour en déduire les coefficients de restitution et de frottement. Mais cette façon d'opérer peut être difficile ou impossible ; il faut alors trouver des situations plus simples qui mettent en œuvre d'une autre façon les caractéristiques du choc sol-balle en essayant de séparer les paramètres. - Rebond vertical : la mesure de  $h$  (hauteur initiale de la balle) et  $h'$  hauteur après rebond donne  $e$  (car  $h$  et  $h'$  sont liées à  $v$  et  $v'$  avant et après le choc par  $mv^2 / 2 = mgh$ , modèle ne prenant en compte que la gravité). - Frottement sur le sol : La balle écrasée par un poids connu sur le sol est tirée par une force  $F$ . Lorsque la balle commence à se déplacer, on peut tirer de la mesure de  $F$  limite la valeur du coefficient de frottement  $f = F / Mg$ .

- PHASE DE MESURE ET DE TRAITEMENT DES DONNÉES : D'une façon générale, elle consiste à intégrer les observations dans un modèle empirique nouveau ou dans le modèle préexistant, les hypothèses faites sur les paramètres sont alors infirmées ou confirmées ; dans ce cas, la valeur des paramètres est calculée.



L'appréciation de la confiance dans la valeur des mesures traduite par une fourchette d'erreur dans laquelle on estime devoir se trouver la valeur du paramètre revêt ici une importance fondamentale, puisque c'est de cette estimation que l'on pourra tirer des conclusions sur l'adéquation possible du modèle au système. La recherche des erreurs systématiques à travers une réduction des incertitudes aléatoires par des méthodes statistiques permet d'orienter le choix des modifications à apporter au modèle. Les techniques d'identification qui permettent de se donner les moyens de procéder à une caractérisation quantitative de l'écart entre la réponse du système et celle du modèle sont également très utilisées.

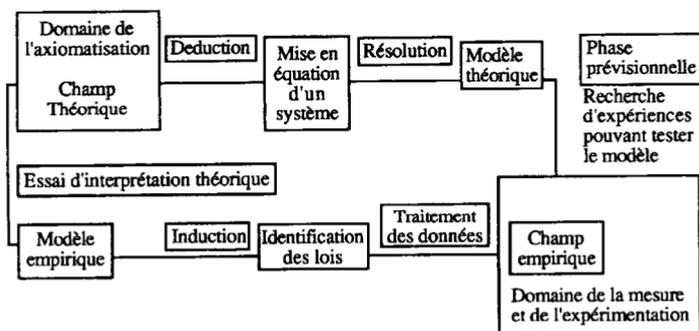
- LA PHASE INDUCTIVE : Elle est à double détente : la première consiste à élaborer un modèle empirique à partir des données observées, la deuxième consiste à trouver une interprétation théorique de ce modèle empirique. Il s'agit à chaque fois de passer un cran de généralité. L'ensemble de ce mouvement s'appuie sur la comparaison et l'analyse des écarts entre le modèle hypothétique (théorique de départ) et le modèle empirique (modèle confirmé selon Walliser). Les modifications peuvent être des améliorations, des approfondissements, mais aussi des transformations de structures.

Dans la mise au point de modèles, on fait coïncider les résultats observés avec ceux issus du modèle théorique, en ajustant la valeur du paramètre. Dans le cas où l'on a une bonne coïncidence, on a ainsi défini le paramètre spécifique d'un système, on peut alors tester la validité de cet ajustement en faisant varier les conditions initiales ou en changeant de système. La stabilité du paramètre à la fois dans sa valeur numérique (pour tous les systèmes équivalents) que dans la possibilité de décrire un ensemble de systèmes grâce à ce modèle (possibilité d'ajustement stable du paramètre) justifie le modèle. Des systèmes ayant même valeur numérique du paramètre seront dit équivalents.

Les systèmes décrits par le même modèle avec des paramètres différents seront dits similaires.

La validation complète du modèle n'est évidemment pas seulement liée à la possibilité d'ajustement du paramètre. Éventuellement, cela pourrait l'être si on faisait l'ensemble des mesures de tous les systèmes dans toutes les situations (la portée généralisante d'une telle opération serait nulle). Le modèle obtient sa validité externe par un ensemble de procédures expérimentales de validation qui concourent pour donner un

caractère objectif jugé valable par plusieurs observateurs, universel (valable pour tous les systèmes similaires), répétable et global (valable en tout lieu). La généralisation est un processus de base de la modélisation ; elle se présente comme l'extension d'un modèle valide dans un nombre fini de situations observées, à un nombre infini de situations possibles. C'est-à-dire qu'elle affirme la validité d'un modèle même dans les situations où il n'a pas été expérimenté ; c'est ce point qui permet tous les jeux de simulation. Dans ces conditions, la problématique peut être double, soit on cherche un dispositif expérimental permettant de tester le modèle théorique à partir d'observations et de mesures à mettre en forme, soit on cherche une interprétation, c'est-à-dire un modèle plus théorique au modèle empirique déjà obtenu. Ces deux approches qui mettent en relation modèle théorique et modèle empirique sont évidemment complémentaires et peuvent même interférer. Elles se répondent pour permettre une avancée dans la mise au point des modèles par une progression spiralée entre champ théorique et champ empirique.



Par rapport au schéma général ci-dessus la mise au point de modèles est une activité qui répond à un double objectif : trouver les bons modèles théoriques, éventuellement par approximation successives ou essais erreurs qui permettent de modéliser les systèmes nouveaux à étudier.

Mesurer directement ou indirectement les paramètres du modèle, c'est-à-dire trouver la valeur des éléments caractéristiques du système ou de la classe de systèmes particuliers étudiés. Le modèle théorique a un niveau de généralité supérieur au modèle empirique. La recherche de la valeur numérique d'un paramètre constitue le plus petit saut vers

l'empirique. La définition générale d'une caractéristique d'un ensemble de systèmes sous forme d'une hypothèse traduite par l'apparition d'un paramètre littéral (et d'un nom, voire d'une nouvelle notion ou d'un nouveau concept), constitue le plus petit saut vers le théorique.

Cette approche de la modélisation telle que nous l'avons analysée dans les pratiques sociales où l'on applique la physique permet de montrer l'intérêt général par rapport aux sciences physiques en délimitant clairement les différences mais aussi en utilisant les similitudes.

### **L'UTILISATION D'UN DOMAINE D'APPLICATION FAMILIER : UN ARGUMENT PAR RAPPORT AUX EXIGENCES SOCIÉTALES**

Quelles sont actuellement les caractéristiques des contenus de physique dans l'enseignement général au lycée ? Dans les programmes la priorité est donnée aux modèles théoriques très généraux (oscillateur harmonique, mouvements sans frottements, chocs élastiques...). Ces modèles donnent peu d'informations sur les systèmes réels. Ils vont même souvent à l'encontre des évidences et des observations (pas de perte d'amplitude du pendule, rebonds de balles à l'infini...). De ce fait, ils sont difficiles à faire comprendre, à enseigner, car il ne sont valables que pour les cas poussés à la limite (frottement tendant vers zéro, pas de pertes d'énergie...). Ces modèles très généraux n'ont pas de référents empiriques communs, c'est-à-dire habituels courants ; de ce point de vue, leur élaboration a constitué une véritable rupture avec la connaissance commune et c'est cette difficulté, cette rupture nécessaire qui pose problème pour les enseigner. Une solution consiste à imaginer et produire des systèmes complexes, qui simulent ou qui reproduisent les conditions théoriques de validité du modèle tétralogique (frottements nuls, balles à forts coefficients de restitution...). La table à coussin d'air, typique de cette démarche, constitue depuis plusieurs années le complément expérimental nécessaire suffisant et exclusif de l'enseignement des débuts de la mécanique.

Les modèles théoriques ainsi introduits sont en revanche de portée plus générale et ont une valeur heuristique qui facilite l'approche d'autres domaines empiriques où ils restent toujours valables. Le choix des modèles généraux pour l'enseignement implique un référent empirique ad-hoc, ou son absence. Du point de vue de l'élève, cela revient souvent au même, dans la mesure où le système physique

ad-hoc, souvent techniquement sophistiqué, est perçu comme un dispositif «pour que cela marche». C'est ainsi qu'on établit une véritable coupure entre les connaissances acquises en cours de physique et de la vie réelle (la physique, ça marche en classe de physique avec le matériel du labo, mais ça n'a rien à voir avec le réel). Même si le dispositif est étudié et présenté comme un système particulier, cas limite de cas réels, il faut à ce moment là, introduire le phénomène que l'on a tenté d'éliminer au moins de vue qualitatif.

On est donc dans la situation paradoxale qui consiste à parler d'un phénomène qu'on veut justement ne pas étudier. Cette coupure entre la classe de sciences et la vie la société la ressent très vivement. Beaucoup de réformes et de physiciens ont essayé de répondre à cette attente sociétale, mais sans succès. Une des raisons principales est la non prise en compte de référents empiriques déjà constitués organisés en domaines reconnus socialement comme par exemple la biomécanique, l'électronique, l'acoustique musicale, etc. Les éléments de familiarité introduits dans les cours ont toujours été très ponctuels et très artificiels, dépassant souvent très largement ce que les éléments de physique du cours étaient capables d'expliquer. La référence systématique à un domaine d'application permet de cerner un référent empirique précis et large qui donne de l'autonomie au savoir enseigné.

## Annexe 1

---

A titre d'exemple nous allons expliciter les concepts et relations que nous avons utilisés dans les modélisations successives que nous avons faites du rebond d'une balle sur un sol.

**Modèle 1** - Le choc parfaitement élastique d'un point matériel sur une paroi infinie.

Conservation de l'énergie et conservation de la quantité du mouvement.

**Modèle 2** - Le choc d'une sphère rigide sur un plan.

On étudie toujours le rebond comme un choc. Cela suppose que l'événement rebond est de durée très courte par rapport à l'événement trajectoire. Dans ce cas, on ne se préoccupe pas de ce qui se passe pendant ce temps très bref, mais on considère qu'il y a une discontinuité

dans les grandeurs physiques caractérisant le système - sous l'effet d'une impulsion.

$V'z = -eVz$  traduit la perte d'énergie en introduisant le coefficient de restitution du choc.

Celui-ci peut être relié à la hauteur du rebond par le théorème de l'énergie cinétique. La modélisation des interactions de contact pendant le choc est réduite à un couple et une force.

La force de frottement  $P$  qui a une composante normale au plan  $N$  et une composante dans le plan  $T$ . Le couple de frottement  $G$  a une composante normale (couple de frottement de pivotement) et une composante dans le plan (couple de frottement de roulement).

Globalement on dira que la balle a glissé sur l'axe  $ox$  si  $|T| = f |N|$  c'est-à-dire si  $|Px| = f |Pz|$ . De même, on dira qu'il y a eu roulement sans glissement si  $|T| = f |N|$ .

Dans ce cas  $w'y = V'x / r$  avec  $r$  : rayon de la balle.

Ceci traduit simplement le fait que le point de la balle en contact avec le sol a une vitesse nulle par rapport au sol.

**Modèle 3** - Déformations visco-élastiques de la balle au cours du choc

Dans ce cas on utilise les relations sous leurs formes non intégrées. Le théorème de la résultante cinétique et le théorème du moment cinétique avec les hypothèses complémentaires suivantes. Le paramètre ( $f$  coefficient de frottement) peut être gardé mais il peut être pris comme une fonction de l'écrasement, puisque à chaque instant on calcule cet écrasement et donc à chaque pas de calcul, on peut prendre sa valeur correspondant à l'état du système. Dans un premier temps, nous avons pris pour  $f$  la valeur quasi-statique obtenue par mesure de  $N$  et de  $T$ .

Hypothèse visco-élastique pour remplacer le paramètre  $e$  : La force élastique habituelle ( $-kx$ ) n'introduit pas de perte d'énergie. Pour introduire une dissipation énergétique ; on prend un modèle visco-élastique (Kelvin-Voigt) qui adjoint une force proportionnelle à  $dx/dt$ . Le coefficient de proportionalité est un paramètre du modèle qu'il faut ajuster avec les données expérimentales.

## RÉFÉRENCES

M. HULIN - «Quelques thèses pour la didactique de la physique». Communications aux journées du CIRDDS, novembre 1983.

J.L. MARTINAND - «Questions pour la recherche : la référence et le possible dans les activités scolaires» in Recherches en didactique de la physique, 227-249 p.

J.L. MARTINAND (1986) - «Connaître et transformer la matière, des objectifs pour l'initiation aux Sciences et Techniques, Berne, P. LANG, 322 p.

Y. CHEVALLARD - «Les programmes et la transposition didactique, illusions, contraintes et possibles». Bulletin des professeurs de math de l'enseignement public, n° 352, 1986.

Y. CHEVALLARD - «La transposition didactique, du savoir savant au savoir enseigné», la pensée sauvage, Paris 1980.

Y. CHEVALLARD - «Pourquoi enseigne-t-on les mathématiques ?». Colloque Finalités des enseignements scientifiques. CCSTI, Marseille, janvier 1989.

C. KEITEL - «Le rapport entre savoir scientifique et savoir scolaire : Éléments pour une discussion». In Actes du premier colloque franco-allemand de didactique des mathématiques et de l'informatique. La pensée sauvage, 1988.

J. DESAUTEL, M. ANADON, M. LAROCHELLE - «Le culte de la science, les programmes d'enseignement en question», Université Laval, Collection rapports de recherche n° 26.

A. DUREY (1987) - «Vers des activités didactiques de mise au point de modèles en physique avec des micro-ordinateurs. Exemple de trajectoires, frappés et rebonds de balle en rotation». Thèse d'État, Université Paris VII.

A. DUREY, M. LAURENT, R. JOURNEAUX - «Avec des micro-ordinateurs, faire de la physique d'abord». B.U.P. n° 652, Mars 1983, Paris, p. 757-780.