

QUELLES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES AVEC LES ORDINATEURS DANS L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES ?

Daniel Beaufile
Naoum Salamé

L'apport de l'informatique à l'enseignement des sciences physiques, de la biologie, et de la géologie en France, est examiné en fonction du renouvellement des approches expérimentales et du niveau des activités intellectuelles qui peuvent être proposées aux élèves. Le travail sur de nouveaux dispositifs d'expérimentation, l'exploration et la construction de modèles, le traitement statistique de banques de données sont analysés, et la complémentarité de ces approches pour l'étude de phénomènes complexes est mise en évidence. L'augmentation du niveau d'initiative des élèves, l'extension des méthodes d'analyse et la place des représentations graphiques sont soulignées.

années 60 :
l'informatique
entre dans
l'enseignement
des sciences

émergence
d'utilisations
spécifiques dès
les années 70

années 80 :
évolution
importante des
matériels

Les modalités d'utilisation des ordinateurs dans l'enseignement des sciences expérimentales font l'objet d'investigations depuis le milieu des années soixante. Peu après les initiatives américaines (à Stanford et à Irvine) les premiers projets lancés en France - dans l'enseignement supérieur - ont porté en particulier sur la médecine, la biologie et les sciences physiques (1). Ces travaux ont continué avec l'introduction des ordinateurs dans l'enseignement secondaire au début des années soixante-dix en Grande Bretagne et en France, mettant en évidence des utilisations spécifiques des disciplines scientifiques : recours aux capacités de calcul pour la vérification ou la mise en évidence de lois en physique, constitution et exploitation de banques de données en biologie, modélisation et simulation dans les deux disciplines (2). Au début des années quatre-vingt, la présence de l'informatique dans l'éducation devient plus significative avec l'apparition des micro-ordinateurs. L'évolution des caractéristiques de ces matériels favorise le développement de nouvelles approches : l'application étendue de méthodes numériques élaborées (résolution d'équations), l'expérimentation assistée par ordinateur rendue possible par l'existence d'interfaces de communication et d'instruments de mesure adaptés, l'utilisation du graphisme, et l'ex-

(1) Hôpital St Louis (puis CHU Cochin) et Faculté des Sciences de l'Université de Paris.

(2) *Dix ans d'informatique dans l'enseignement secondaire. 1970-1980.* Recherches Pédagogiques. n° 113. INRP. 1981.

pl exploitation des images numériques prises par les satellites (3). Nous nous proposons d'examiner rapidement dans un premier temps comment le contexte général des idées sur l'enseignement des sciences permet d'expliquer l'intérêt que suscite l'introduction des ordinateurs. Ensuite, quelques exemples typiques de leurs utilisations actuelles dans les lycées en France nous permettront de montrer comment l'informatique peut être la source d'une réflexion sur les activités expérimentales en sciences physiques et en biologie, conduisant à faire évoluer ces activités et à les renouveler (4).

1. LES ORDINATEURS DANS L'ÉVOLUTION DE L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES EXPÉRIMENTALES

L'enseignement des sciences évolue sur le plan des pratiques pédagogiques du fait de l'apparition de matériels didactiques nouveaux (en particulier dans l'équipement des laboratoires). Il évolue également sur le plan des contenus et des méthodes d'investigation du fait de l'acquisition de connaissances nouvelles (intégrant de manière spécifique l'évolution des technologies). L'insertion de l'informatique dans cet enseignement s'est réalisée progressivement, alors que par ailleurs un certain scepticisme entoure la faisabilité de la démarche expérimentale et l'apport réel des travaux pratiques.

1.1. L'ordinateur pour résoudre les problèmes de l'expérimentation

Sur le plan des pratiques pédagogiques, l'affirmation du caractère "avant tout expérimental" de l'enseignement des sciences a contribué à la recherche de possibilités d'ancrage des connaissances à enseigner sur des faits observables, mesurables et analysables, et a abouti à la réalisation et à l'utilisation de dispositifs ad hoc plus ou moins sophistiqués (tel que le banc à coussin d'air en physique). Cela a contribué à l'augmentation de la partie expérimentale des cours, mais a conduit, inversement, à une réduction des TP. En effet les dispositifs sont devenus moins accessibles aux élèves, que ce soit en raison de

dans la
recherche
d'améliorations
des expériences

-
- (3) Cette évolution a débouché récemment sur des actions nationales d'équipement des laboratoires de sciences des lycées, et des programmes de développement centrés sur les utilisations de l'ordinateur comme outil de laboratoire et sur l'exploitation des images de télédétection.
 - (4) Nous avons conservé le regroupement des disciplines adopté dans le rapport *Technologies de l'Information et Apprentissages de Base*, fascicule *Les concepts scientifiques et technologiques*. OCDE-CERI. Paris. 1986.

leur unicité dans le laboratoire (du fait de leur coût) ou en raison de difficultés de mise en oeuvre (fragilité, complexité des réglages, etc).

On conçoit dans ce contexte l'importance prise récemment par l'ordinateur outil de laboratoire comme aide didactique. La tendance est actuellement de construire en priorité des outils devant apporter à l'expérience de laboratoire des qualités supérieures, tant sur le plan de la valeur scientifique (accès à des phénomènes plus nombreux et plus proches de la réalité, meilleure estimation des grandeurs mesurées, facilitation de l'analyse de données grâce aux possibilités d'acquisition automatique, de traitement numérique, et de représentation graphique), que sur le plan de "l'impact médiatique" auprès des élèves (simultanéité des mesures et des représentations, qualité des graphiques, etc).

1.2. L'ordinateur nouvel élément à intégrer dans les contenus enseignés

Sur le plan des contenus, l'évolution technologique a conduit en physique, d'une part à introduire de nouveaux objets d'étude tels que la diode puis l'ampli-opérationnel, et d'autre part à inscrire plus tôt dans le curriculum des notions ou des concepts qui y sont associés, comme le codage binaire ou les fonctions logiques (5). L'influence des dispositifs technologiques de plus en plus élaborés sur les méthodes et les savoir-faire pratiqués dans l'enseignement est encore plus marquée. Ainsi, dans le domaine des appareils de mesure on est passé des dispositifs à aiguille, à l'oscillographe et au multimètre numérique, puis récemment à la centrale de mesure automatisée.

En biologie, l'évolution des connaissances fondamentales et des applications intervenue au cours des deux dernières décennies est le facteur le plus remarquable : les explications scientifiques des phénomènes se situent maintenant dans les mécanismes cellulaires et moléculaires, les transformations physico-chimiques, les relations systémiques. Les programmes enseignés ont intégré cette évolution sans que l'instrumentation nécessaire soit toujours accessible : on peut noter par exemple que, si beaucoup d'établissements sont équipés de matériels d'électrophysiologie, le besoin de nouveaux matériels se fait sentir pour la spectrophotométrie, l'électrophorèse et même pour les méthodes isotopiques (utilisées de manière croissante dans de nombreux secteurs mais dont le transfert dans l'enseignement reste difficile à envisager) (6).

(5) Cette introduction est faite dans les programmes de mathématiques, mais les notions sont considérées comme des prérequis dans l'enseignement des sciences physiques.

(6) Le rapport pré-cité de l'OCDE parle des "conséquences dramatiques" de cette évolution sur l'enseignement de la biologie.

l'ordinateur est
devenu un outil
de laboratoire

en relation avec
l'évolution des
techniques

et des savoirs

Les ordinateurs sont donc entrés dans l'enseignement comme suite logique de l'évolution technologique, à la fois en tant qu'outils et en tant qu'objets d'étude : ceci s'est concrétisé par la création des "Options Sciences Physiques et Informatiques" où l'ordinateur est considéré comme outil de mesure, de contrôle de processus et de traitement numérique, et dont le principe de fonctionnement (de la circulation de l'information dans les circuits électroniques jusqu'à la programmation dans un langage évolué) fait partie des connaissances à acquérir au même titre que celui d'un oscillographe.

c'est aussi un
objet d'étude

Les ordinateurs sont également apparus comme des facteurs susceptibles de rapprocher l'enseignement de l'évolution technique en cours dans la société et plus précisément comme des moyens permettant d'introduire les méthodes et les instruments utilisés dans l'enseignement supérieur et dans la recherche. Dans les typologies des utilisations des ordinateurs, trois modalités que l'on rencontre fréquemment dans les publications nous intéressent particulièrement : la saisie de données (acquisition automatique ou semi-automatique), le traitement des données (calculs de grandeurs secondaires, méthodes statistiques, traitement d'images), la simulation de phénomènes.

et un moyen de
transfert de
nouvelles
méthodes

1.3. Mais des interrogations sur les activités expérimentales subsistent

La réflexion sur les utilisations pédagogiques de l'ordinateur en classe de sciences a conduit à s'interroger plus fondamentalement sur la nature et l'importance des activités expérimentales. En effet, les espoirs mis dans l'informatique sont intervenus alors que, après une période où cet enseignement était considéré comme la simple transmission d'un ensemble de connaissances constitué, l'accent a été mis sur l'enseignement de la science à travers ses méthodes (ou l'idée qu'on s'en faisait) : observer, faire des hypothèses, concevoir et réaliser des expériences, rassembler des résultats expérimentaux, analyser et interpréter les résultats, conclure. La pratique de cette démarche a été parfois critiquée, parce que, considérée strictement, elle ne correspondait pas au travail réel des chercheurs dont elle n'était qu'une reconstruction. Sa mise en oeuvre s'est heurtée, en outre, à des problèmes de faisabilité technique et pédagogique et à des limites dans la compétence des élèves (7). De plus, les études menées sur les objectifs spécifiques des travaux pratiques ou des expériences, conduisent à plus de

la pratique de la
démarche
expérimentale
n'étant pas
simple

(7) La conduite de cette démarche dans des situations d'exploration ouverte, laissant place à une part d'initiative des élèves et évitant le dogmatisme, s'est également avérée difficile, peut-être parce que n'existaient pas encore des dispositifs appropriés. Voir à ce sujet les travaux de : J.P. ASTOLFI, A. GIORDAN, G. GOHAU, etc.

et l'importance
des travaux
pratiques
discutée

modestie quant à leur rôle effectif (8). Ces études avancent que la nécessité du travail sur le "concret" dans l'enseignement des sciences expérimentales, tient peut-être plus du dogme qu'il n'est fondé sur des avantages prouvés, ce qui bouscule les idées communément admises. Moore et Thomas (9) font état de recherches qui montrent que la manipulation d'objets réels pourrait même constituer un obstacle à l'abstraction ; ils émettent l'hypothèse que les travaux pratiques pourraient être une survivance fossile de la vision du scientifique habile manipulateur d'appareillages du 19ème siècle. Richmond (10) constate que certains pays développés ont peu ou pas du tout de travaux pratiques dans leurs enseignements scientifiques. Il n'est pas besoin de rappeler les critiques portant sur les conditions de réalisation des expériences de laboratoire, et sur les limites de l'expérience unique généralement pratiquée, à la fois comme preuve et comme facteur d'apprentissage.

De plus, si les auteurs reconnaissent généralement l'efficacité des travaux de laboratoire pour installer des habiletés manipulatoires et des comportements, ceux-ci ne revêtent plus l'importance qui leur était accordée précédemment. De différentes publications (11) il ressort que trois arguments peuvent être sérieusement avancés en faveur des travaux pratiques :

-
- (8) R.T. WHITE, R.P. FISHER : "Research on natural sciences", in *Second handbook of research on teaching*. 1985. pp. 874-905.
R. MILLAR : "Towards a role for experiment in the science teaching laboratory". *Studies in Sci. Educ.* 14. 1987. pp. 109-118.
R. MILLAR, R. DRIVER : "Beyond Processes". *Studies in Sci. Educ.* 14. 1987. pp. 33-62.
- (9) J.L. MOORE, F.H. THOMAS : "Computer simulation of experiments : a valuable alternative to traditional laboratory work for secondary school science teaching". *SSR*. 1983. pp. 641- 655.
- (10) P.E. RICHMOND : "Who needs laboratories ?". *Physics Education*. 1979. pp. 349-50.
- (11) voir notamment :
G.C. BATES : "The role of the laboratory in secondary school science programs". *NSTA commission on professional standards and practices*. Washington. 1978. pp. 55-81.
A. HOFSTEIN, V.N. LUNETTA : "The role of laboratory in science teaching". *Review of Educational Research*. Vol. 52. n°2. 1982. pp. 210-217.
J.W. LAYMAN : "Un appareil de travaux pratiques : le micro-ordinateur", in *Tendances nouvelles de l'enseignement de la physique*. Vol. 4. UNESCO. 1986. pp. 211-213.
K. TOBIN : "Secondary science laboratory activities". *European Journal of Science Education*. Vol. 8. n° 2. 1986. pp. 199-211.
J. SOLOMON : "Learning through experiment". *Studies in Sci. Educ.*, 15. 1988. pp. 103-108.
C.T. OPIE : "Developping scientific thinking through the use of computer monitoring", in *Actes 5ème Conférence Internationale, Technology and Education*. Edinburgh. Mars 1988. Vol 2. pp. 97-100.

- les activités expérimentales ont un rôle de motivation, les expériences suscitant l'intérêt des élèves pour le phénomène étudié,
- les activités expérimentales constituent un des éléments perceptifs, complémentaires des énoncés linguistiques, nécessaires à la compréhension et l'assimilation du discours enseigné,
- l'expérimentation constitue l'une des façons d'impliquer les élèves dans l'apprentissage (apprentissage actif).

2. CONTRIBUTIONS DE L'INFORMATIQUE A L'ÉVOLUTION DES ACTIVITÉS EXPÉRIMENTALES

il faut s'en tenir à des objectifs réalistes

Le survol de l'évolution des idées dans le domaine de l'enseignement des sciences expérimentales nous amène à essayer d'analyser les apports spécifiques de l'informatique à ces disciplines, en focalisant notre attention sur la manière dont celle-ci permet d'envisager des solutions aux problèmes centraux que pose l'expérimentation. En particulier, il nous paraît important de montrer ses capacités à :

- maintenir dans l'enseignement des expériences concrètes, les améliorer et les renouveler, multiplier les exemples différents qui illustrent un phénomène ou certains de ses aspects ;
- proposer aux élèves des activités intellectuelles de haut niveau, en relation avec ce qui est requis des formations scientifiques (planification et contrôle des expériences, traitement et analyse des données, etc.) ;
- aider et guider les élèves dans les activités qui leur sont proposées, et contribuer à évaluer leurs savoir-faire et leurs capacités de raisonnement, évaluation qui pose actuellement problème.

Nous essayerons de cerner ces apports à partir des activités qui peuvent être développées avec les environnements évoqués précédemment, et qui sont déjà installés dans les pratiques pédagogiques : les dispositifs expérimentaux, les simulations de phénomènes, les banques de données.

2.1. Le travail avec des dispositifs expérimentaux

Les séances autour de dispositifs expérimentaux (TP ou TP-cours) sont censées conduire à des activités scientifiques généralement résumées dans la courte liste suivante, empruntée à L.T. Rogers (12) : manipulation d'appareils, observation, inter-

(12) L.T. ROGERS : "The computer assisted laboratory". *Physics Education*, n° 22. 1987. pp. 219-224.

l'ordinateur
facilite
l'expérimentation

rogations, mesures, collecte de données, analyse de données, émission d'hypothèses, communication des résultats. Nous avons montré que les ordinateurs pouvaient prendre en charge des aspects techniques importants à travers la facilitation de l'acquisition de données (rapidité, meilleure qualité de la mesure, collecte automatique), et l'aide à l'analyse (calculs de grandeurs, d'équations, affichages graphiques automatiques, etc.).

mais pour quelles
activités ?

Si les dispositifs qui permettent la visualisation de caractéristiques des systèmes étudiés (potentiel d'action le long d'une fibre nerveuse, relation courant-tension pour un dipôle, etc.) ne sont pas dénués d'intérêt pour la présentation des concepts par l'enseignant, ils ne sont pas directement porteurs d'activités notables pour les élèves. Or les questions qui viennent alors au premier plan portent précisément sur ces activités : des données plus nombreuses et plus précises, pour quoi faire, dans quelle démarche ? Quelles activités sont laissées aux élèves lorsque l'expérience est contrôlée par l'ordinateur ? La disparition de certaines d'entre elles est-elle compensée par d'autres plus intéressantes, plus riches ? etc.

Dans les deux disciplines qui nous concernent ici, les exemples qui illustrent les potentialités de l'ordinateur au laboratoire, exploitent les mêmes avancées techniques (capteurs, sondes, télémesure) et ont recours aux mêmes fonctionnalités (acquisition, visualisation, traitement), conduisant ainsi à des activités en partie identiques. Néanmoins, des finalités sensiblement différentes sont poursuivies, tenant compte de l'esprit et des contraintes propres à l'enseignement de chacune des disciplines.

en physique

Pour illustrer la tendance des travaux en sciences physiques, trois exemples pris parmi les ensembles matériels et logiciels qui sont représentatifs de l'utilisation actuelle de l'ordinateur au laboratoire, seront principalement évoqués : le logiciel BANC (13) conçu pour l'étude quantitative de la quantité de mouve-

(13) Le dispositif d'acquisition est constitué d'un ensemble de capteurs photoélectriques (2 cellules par capteurs), d'une interface de mesure, et d'un ensemble de logiciels spécialisés, pour mesurer les dates et les vitesses des mobiles sur le banc (réalisation INRP-DP5). Des utilisations pédagogiques sont décrites dans :

D. BEAUFILS, F.M. BLONDEL, J.C LE TOUZE, N. SALAME : "Mécanique en Seconde avec un banc et un ordinateur". in *Cours et TP de physique et chimie avec ordinateur*. Paris: UDP-INRP. 1987. pp. 21-39.

D. BEAUFILS : "Conception et manipulations de physique avec ordinateur : apport d'une expérimentation". in *Communication, Education et Culture Scientifiques et Industrielles. Actes des Xèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1988. pp. 379-386.

ment et de l'énergie cinétique lors d'éclatements ou de chocs, et les logiciels CHUTE (14) et PENDULE (15) qui permettent une étude cinématique, dynamique et énergétique du mouvement (d'une bille en chute libre pour le premier, d'un pendule pesant ou de torsion pour le second) et dont les versions les plus récentes proposent des fonctionnalités de représentation graphique des mesures et des calculs, de tracé de fonctions, et de simulation numérique pour des activités de modélisation mathématique.

On peut analyser les activités des élèves avec ces logiciels, en détaillant plusieurs points :

1 - l'observation de phénomènes : on sait que cette activité est en fait très fortement liée, d'une part, à la tâche dévolue à l'élève, et d'autre part, aux connaissances qu'il possède par avance et aux informations qui lui sont apportées au moment de l'observation. Le premier point relève presque exclusivement du rôle de l'enseignant, alors que les deux autres peuvent s'appuyer sur l'interaction avec l'ordinateur. Ainsi, la saisie automatique de données avec affichage des valeurs numériques ou de représentations graphiques, quasiment en temps réel, constitue un apport d'information qui peut jouer un rôle primordial. Dans un logiciel comme PENDULE, les représentations graphiques de la vitesse angulaire ou de l'énergie cinétique, par exemple, peuvent être obtenues "en direct" avec le phénomène visible, et la superposition graphique de plusieurs séries de mesures sur un même mouvement permet d'étudier la périodicité des oscillations. L'idée développée ici n'est pas seulement que les informations envoyées par l'ordinateur sont plus riches que le simple suivi des grandeurs physiques visibles, mais bien que la présence simultanée de ces informations entraîne en

l'observation

(14) Le dispositif (capteurs photoélectriques, interface, logiciels) permet de mesurer les dates et les vitesses de passage d'une bille, en fonction de la hauteur, et de calculer toutes les grandeurs dérivées utiles (réalisation INRP-DP5).

D. BEAUFILS, J.C. LE TOUZE : "L'ordinateur graphique, un outil didactique pour la modélisation expérimentale en classe de physique des lycées ?", in *Actes des XIèmes Journées Internationales*, 1989, à paraître.

(15) Ce logiciel permet l'acquisition très rapide d'un grand nombre de mesures de l'angle d'un pendule au cours du temps, grâce à un dispositif potentiométrique lié à l'axe du pendule. Logiciel et documentation co-édités par le Centre National de Documentation Pédagogique et Langage et Informatique.

et la
comparaison de
phénomènes
réels

retour une meilleure observation du phénomène lui-même (16). Plus généralement, l'activité peut être centrée sur la comparaison des comportements d'un système dont on modifie la valeur d'un paramètre (comparaisons plus nombreuses facilitées par les affichages numériques ou graphiques).

le contrôle de
l'acquisition des
données

2 - la prise de mesures : si l'ordinateur peut la réaliser, il ne se charge pas du choix des variables à mesurer. Or contrairement à un dispositif classique de mesure qui impose le mode de suivi (donc de modélisation), l'emploi de l'ordinateur au laboratoire permet d'accéder à tout le jeu des grandeurs dérivées (comme la vitesse ou l'énergie potentielle à partir des grandeurs longeur et temps). De ce fait, on peut proposer aux élèves des activités d'analyse modélisante d'un phénomène qui explicitent, en particulier, le mode de description du phénomène, puis le choix des grandeurs à étudier et à mesurer, et du mode de représentation. Ainsi dans CHUTE on peut travailler directement dans l'espace énergie cinétique/travail du poids pour étudier le comportement énergétique du système.

et le choix par
l'élève des
méthodes
d'analyse

3 - l'analyse : l'ordinateur permet d'affranchir les élèves (lorsque cela n'est l'objectif visé) du travail de compilation des données, de calcul et de représentation graphique des résultats, et de leur proposer des activités d'interprétation, mettant en oeuvre des compétences différentes. Là également, si l'ordinateur peut effectuer certaines déterminations automatiques de paramètres ou d'équations à partir de données expérimentales, le choix des représentations, des outils numériques et du moment de leur utilisation, de même que l'interprétation de la signification et des limites des résultats ainsi obtenus sont à la charge de l'utilisateur, et peuvent (en partie) être confiés aux élèves.

numériques

Les méthodes statistiques (calculs de moyenne et d'écart-type, de corrélation, régression polynomiale) ont donné les premiers outils informatiques d'analyse de données. Mais les notions ainsi introduites sont délicates et les utilisations parfaitement justifiées restent limitées dans la pratique. En particulier, il convient d'être prudent quant à l'utilisation de ces possibilités pour une meilleure vérification de lois.

et statistiques

(16) F. SOURDILLAT : "L'ordinateur synthétiseur d'images et auxiliaire du discours pédagogique dans une démarche expérimentale", in *Signes et discours dans l'éducation et la vulgarisation scientifiques. Actes des VIèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1984. pp. 69-72.

R.K. THORNTON : "Tools for scientific thinking : microcomputer-based laboratories for physics teaching". *Physics Education*. 22. 1987. pp. 230-238.

H. BRASELL : "The effect of real-time laboratory graphing on learning graphic representations of distance and velocity", *Jour. Res. Sc. Teach.* vol 24. n°4. april 87. pp. 385-395.

J. MOKROS, R. TINKER : "The impact of micro-computer-based labs on children's ability to interpret graphs", *Jour. Res. Sci. Teach.* vol 24. n°4. 1987. pp. 369-384.

pour la
modélisation
mathématique

Les capacités graphiques ont contribué à l'extension d'une autre méthode où l'élève a plus le contrôle de l'analyse mathématique. En effet les possibilités d'obtention rapide du tracé représentatif d'une relation mathématique entre deux variables définies par l'utilisateur, permettent d'une part l'accès à des modèles mathématiques (modèles de comportement ou de représentation) (17) autres que la fonction linéaire, et d'autre part de proposer une activité de mise au point de modèle par confrontation des tracés théoriques et des points expérimentaux. Ces possibilités sont proposées par des logiciels-outils généraux (18), mais on trouve aujourd'hui ces fonctionnalités incluses dans des logiciels dédiés à une étude particulière. Dans le logiciel CHUTE il est ainsi possible de déterminer le comportement de la bille décrit par la vitesse et le temps ($v = 9.8*t$) à partir d'une série de résultats expérimentaux. Là aussi l'accès à un estimateur numérique de l'écart entre les deux ensembles de données peut aider à obtenir une meilleure adéquation.

Ajoutons ici que la présence de l'expérience et la connaissance du dispositif matériel et logiciel utilisé (estimation des imperfections du montage ou des manipulations effectuées par l'utilisateur) sont indispensables à l'analyse des données expérimentales recueillies. En effet, que ce soit pour mener une analyse qualitative (tendance générale d'une évolution, existence d'une corrélation entre deux grandeurs) ou pour chercher une estimation plus rigoureuse d'une grandeur (par la mise en oeuvre de méthodes statistiques), il faut pouvoir revenir à tout moment sur la mesure soit pour vérifier un résultat déjà acquis, soit pour obtenir une nouvelle valeur venant compléter l'ensemble déjà constitué.

bénéficient des
représentations
graphiques

Il nous semble que l'ordinateur est, actuellement, l'élément permettant de ramener dans un même ensemble l'acquisition et l'analyse de données. Dans le logiciel CHUTE, il est possible, dans l'espace des énergies, d'exécuter une première analyse visant à déterminer l'équation d'une droite représentative des premiers points obtenus, puis de réaliser une nouvelle série de mesures avant de revenir à l'analyse. La disponibilité d'outils numériques d'estimation peut également contribuer à un meilleur souci de la qualité de l'expérimentation. On a observé que des élèves, disposant d'un indicateur de corrélation, retournaient vers l'expérience pour tenter d'affiner leurs mesures et d'améliorer la valeur de cet indicateur (19).

(17) J.C. TRIGEASSOU : *Recherche de modèles expérimentaux assistée par ordinateur*. Collection Informatique. Tec Doc / Lavoisier. Paris. 1988.

(18) Par exemple : GRAPHIX (Institut de Recherche sur l'Enseignement des Mathématiques, Marseille) et TGM (Centre National de Documentation Pédagogique).

(19) R. RICARD : "Mécanique en 2de : étude de la chute libre", in *Cours et TP de physique et chimie avec ordinateur*. INRP-UDP. 1987. pp. 13-20.

en biologie.

En biologie, la connexion des ordinateurs à des oxymètres, photomètres, thermomètres, hygromètres, tensiomètres, etc., aboutit actuellement à l'émergence de deux orientations principales.

renouvellement
des domaines
d'expérimentation :

Les nouveaux dispositifs constituent un support à l'enseignement de la physiologie et sont complétés par des représentations graphiques pour visualiser l'anatomie et le fonctionnement des organes du corps humain. Les réalisations typiques développées en Grande Bretagne dans le domaine de la santé et de la physiologie humaine (20) portent sur la mesure du rythme cardiaque, du rythme respiratoire et de la température, dans différentes conditions d'activité (sportives notamment). Ces mesures sont effectuées sur les élèves eux-mêmes, qui analysent et comparent leurs données respectives.

données
recueillies sur les
élèves eux-
mêmes

Cette connexion fournit des indices et des informations utilisables dans la recherche d'éléments explicatifs des phénomènes étudiés : en France, le métabolisme respiratoire chez l'Homme (et chez la Souris) a également donné lieu à des réalisations, mais avec une insistance moindre sur les aspects physiologiques et un intérêt plus marqué pour le concept d'énergie. Le dispositif proposé par A. Videaud et son équipe (21), permet de mesurer la consommation d'oxygène par l'organisme, de calculer l'intensité respiratoire, de mettre celle-ci en relation avec un travail extérieur réalisé par le sujet, de calculer la libération d'énergie par le métabolisme respiratoire. Les variations inter-individuelles et les modifications entraînées par un changement dans le travail peuvent également être étudiées.

expériences en
biologie cellulaire

Dans le même esprit, d'autres réalisations sont actuellement expérimentées sur la photosynthèse (étude du dégagement et de la consommation d'oxygène en relation avec l'énergie lumineuse reçue et la température) et sur la respiration au niveau cellulaire.

A travers ces différents exemples on constate que les activités qui sont liées à l'observation et à la mesure sont largement communes aux deux disciplines expérimentales ; la mise en évidence de propriétés inaccessibles dans l'expérimentation classique, et l'intégration de cette visualisation dans un processus d'investigation et de recherche d'explications, sont plutôt spécifiques de l'enseignement de la biologie, alors que les traitements quantitatifs visant l'établissement ou la validation de relations mathématiques (activités d'analyse et de modélisation) sont beaucoup plus développées en sciences physiques.

(20) "Using computer to study health and fitness. Monitoring human physiology with micro-computers". Projet soutenu par le Health Promotion Research Trust.

(21) "Ordinateur outil pédagogique au laboratoire et à l'atelier". *Journées EVARISTE*. CNAM, 1987 et 1988.

2.2. Le travail sur des modèles

l'opposition
expérience -
simulation : un
faux débat

La simulation constitue l'une des utilisations pédagogiques les plus anciennes de l'informatique. De ce fait, elle a donné lieu à un grand nombre de logiciels consacrés le plus souvent à des phénomènes physiques ou biologiques, quelques fois à l'appareillage de laboratoire, et parfois aux interactions qui se déroulent dans la situation d'enseignement. Il n'est pas dans notre propos de faire une revue exhaustive de ces diverses modalités, ni d'entrer dans une discussion sur les réalisations auxquelles conviendrait l'appellation de simulation entendue de manière stricte, qui seraient à distinguer de celles qui correspondent à des extensions du sens de ce terme (22).

les simulations
s'appuient sur des
modèles

Nous rappelons cependant qu'au départ, des exemples peu adaptés et d'autres mal compris, ont suscité la méfiance vis-à-vis de ces produits, et renforcé la défense de la composante expérimentale des sciences physiques et de la biologie dans l'enseignement secondaire. S'en tenir à l'opposition entre simulation et expérience nous paraît aujourd'hui s'enfermer dans un faux débat alors que la simulation numérique constitue une extension des possibilités d'investigation, et que le "réel" lui-même est interrogé à travers des théories et des modèles (souvent exprimés sous une forme mathématique et informatisés) : ceci est vrai dans de multiples domaines de la physique, mais aussi en biologie moléculaire, et en géologie (dynamique du globe terrestre), par exemple.

Nous nous intéresserons ici à la simulation de phénomènes qui correspondent à des lois fondamentales ou au fonctionnement de systèmes complexes, en nous plaçant principalement du point de vue des activités expérimentales requises des élèves. Nous distinguerons ces simulations en fonction des deux types majeurs d'activités auxquelles elles peuvent donner lieu : l'exploration de phénomènes modélisés et simulés, et la conception de modèles.

- L'exploration de phénomènes modélisés

mathématiques

Dans beaucoup de cas, les connaissances concernant les phénomènes étudiés peuvent être représentées sous la forme de modèles mathématiques. Il s'agit le plus souvent de modèles analytiques, c'est-à-dire décrits par un ensemble d'équations plus ou moins complexes, qui expriment les relations entre les divers facteurs dont dépend un phénomène donné.

En biologie, plusieurs exemples appartenant à cette catégorie peuvent être mentionnés : la transmission de l'influx nerveux ;

(22) D. BEAUFILS et al. : "L'ordinateur en sciences physiques, quelles simulations ?", in *Modèles et simulation, Actes des IXèmes journées sur l'éducation scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 321-328.

les lois de la génétique qui, compte tenu de leur complexité, continuent à faire l'objet de nouveaux logiciels ; les mécanismes régulés, particulièrement celui de la glycémie et les phénomènes métaboliques (la nutrition, la transpiration, la respiration, etc.) ; les relations entre les êtres vivants (compétition entre les espèces, entre prédateurs et proies par exemple), pour lesquels divers modèles ont été construits par les chercheurs (23).

En physique, parmi les logiciels de simulation réalisés dès le début des années soixante-dix, on trouve l'étude du phénomène de réflexion (recherche de la loi par la construction de "l'image optique"), ou des logiciels de balistique (étude de trajectoires d'objets lancés dans un champ de pesanteur) (24). Parmi ceux réalisés plus récemment, on trouve des logiciels comme RESAIR (25) où l'étude est centrée sur la simulation de l'effet de l'air sur le mouvement d'une sphère en translation, ou comme TENNIS (26) où l'utilisateur dispose d'un modèle très complet permettant de simuler tous les effets sur les balles.

Il existe également de nombreux phénomènes, tout particulièrement en biologie, qui ne peuvent être décrits par des modèles mathématiques, mais pour lesquels il y a quand même des modèles. Ces phénomènes peuvent être représentés par des relations fonctionnelles connues (entre organes par exemple), ou bien par les résultats acquis expérimentalement (qui traduisent ces relations). Différents exemples peuvent être évoqués en illustration de notre propos.

En médecine, pour certaines pathologies, la démarche générale de raisonnement diagnostique d'un expert peut être décrite pour le système informatique sous la forme de conditions permettant de progresser d'un diagnostic à un autre plus

et des relations
fonctionnelles

(23) Pour des descriptions détaillées des logiciels correspondants, se reporter en particulier à :

Dossier Biologie et Informatique. *Bulletin de l'APBG*. n° 3 et 4. Paris. 1978.

P. JEROME : "L'informatique, support logique de la démarche expérimentale en sciences naturelles". *Bulletin de l'APBG*. n° 4. Paris. 1979. *Impact de l'introduction de l'Informatique sur les disciplines scientifiques, dans l'enseignement secondaire en France*. Étude pour la CEE 1362-82-7. INRP. 1983.

(24) REF (Centre National de Documentation Pédagogique) est l'un des premiers logiciels proposant une activité de modélisation.

(25) RESAIR : logiciel diffusé par le Centre Académique de Ressources et de Formation en Informatique de Versailles.

(26) TENNIS : logiciel réalisé à l'École Normale de St Cloud, et diffusé par le Centre Académique de Ressources et de Formation en Informatique de Versailles.

A. DUREY : *Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs. Exemples : trajectoires, frappés et rebonds de balles en rotation*. Thèse d'Etat. Université Paris VII. 1987. 263p.

exemples : la
démarche
diagnostique en
médecine

les mécanismes
régulés

le comportement
animal, etc.

précis, en fonction des résultats des examens envisageables. Ensuite, à partir des examens réalisés sur des malades réels (extraits des dossiers médicaux) on propose aux étudiants de résoudre le problème posé par des cas simulés de malades (27).

En biologie, divers logiciels illustrent cette approche, dans le domaine de la régulation hormonale. Un premier exemple (basé sur un modèle des relations connues entre les glandes en cause) propose de rechercher l'origine de troubles (dûs à la thyroïde et à l'hypophyse) qui affectent le déclenchement de la métamorphose chez des batraciens, en procédant à des ablations ou à des greffes d'organes, à des injections, des dosages, etc. (28). Plus récemment, le logiciel REHOR (29), fonctionnant sur le même principe, et offrant encore plus de possibilités d'intervention, propose aux élèves d'établir l'action de certaines hormones hypophysaires et hypothalamiques sur la régulation de la sécrétion des hormones sexuelles chez la Rate. Les résultats qui sont fournis aux élèves correspondent tous à des expériences réelles effectuées dans les laboratoires de recherche ou disponibles dans la littérature.

D'autres domaines sont aussi favorables à la conception de simulations de ce type. En éthologie, par exemple, on peut chercher à étudier les sens qui interviennent dans les différentes phases d'un comportement animal. L'élève fixe les conditions de déroulement d'une expérience en agissant soit sur les caractéristiques de l'animal, soit sur celles de la proie (dans le cas du comportement prédateur). Les résultats qui lui sont fournis reprennent plus ou moins strictement (des adaptations sont parfois nécessaires) ceux observés par les chercheurs (30).

L'importance indéniable de la modélisation mathématique a conduit certains à considérer ces logiciels comme de fausses simulations. Or de tels produits sont fondés sur des propriétés, des relations physiologiques, et des résultats, ce qui correspond à des formes communes de description des connaissances en biologie. Même en physique, il est tout aussi concevable

(27) Voir en particulier :

B. VARET et al. "L'enseignement assisté par ordinateur en médecine. Dix ans après". *Presse Médicale*. n° 12. Paris. 1983, pp. 2418-2422.

J. MARSAC, J. CHABOT. *Exercice pratique de la pneumologie*. Ellipses. Paris. 1984.

(28) M. DUPONT, N. SALAME : "Simulation d'expériences et contrôle de raisonnement. un exemple en endocrinologie". in *Modèles et Simulations. Actes des IXèmes Journées Internationales d'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 193-202.

(29) C. LEVEQUE, "Régulation de la sécrétion des hormones sexuelles", in *Informatique et Sciences Naturelles*. INRP. 1984. pp. 110-119.

(30) Plusieurs logiciels sont maintenant disponibles sur le comportement prédateur de la Vipère, le chant en relation avec la notion de territoire chez les Oiseaux, ou la signification de la danse chez les Abeilles.

de remplacer la partie systématique d'acquisition de données, non par les résultats fournis par une simulation fondée sur un modèle mathématique, mais par ceux qui ont été obtenus dans des conditions expérimentales déterminées. A l'élève qui fait des propositions d'expériences ou de mesure, le logiciel peut renvoyer la ou les valeurs des grandeurs effectivement mesurées dans les conditions proposées (ou dans celles qui s'en rapprochent le plus).

on peut proposer
aux élèves

Quelle que soit la nature de la représentation des connaissances retenue, ces logiciels peuvent être utilisés avec les élèves, soit dans une optique d'acquisition des concepts et de formalisation des lois, soit dans une perspective de renforcement des connaissances déjà acquises. Les activités généralement demandées tournent autour de l'étude du comportement du phénomène ou du système simulé, en fonction de divers facteurs. Suivant les connaissances initiales des élèves, et l'importance accordée à la maîtrise des modèles ou des relations sous-jacentes, les objectifs de cette étude peuvent être :

d'identifier les
équations

1 - d'établir de manière précise les lois qui régissent le phénomène. Si quelques exemples peuvent illustrer cet objectif en biologie (en génétique et en écologie), c'est surtout en physique que l'explicitation des modèles sous-jacents est de règle, et peut parfois aller jusqu'à l'écriture formelle des équations.

ou les paramètres
pertinents

2 - connaissant les facteurs pertinents propres au système étudié (sachant que d'autres facteurs externes peuvent intervenir dans certaines conditions), d'établir leurs modalités précises d'action ou d'interaction. Il s'agit souvent de mettre en évidence le sens des variations et co-variations, et quelquefois de construire des relations quantitatives (cas de la régulation de la glycémie, par exemple). Dans les cas complexes, comme celui de la biocénose, de multiples facteurs peuvent intervenir simultanément, avec des effets non linéaires et des régulations ; ce qui est généralement visé c'est l'identification des facteurs qui interviennent de manière significative, ou bien l'étude isolée de l'action d'un facteur (toutes choses égales par ailleurs). La mise en commun des résultats des investigations ponctuelles réalisées par les groupes d'élèves, et la formalisation des relations d'ensemble, sont généralement assurées par l'enseignant.

3 - dans certains cas, ni la nature ni la structure du modèle sous-jacent ne sont de première importance. Les simulations servent alors de support dynamique à l'acquisition de savoirs et de compétences dans le domaine traité. La maîtrise d'une démarche de raisonnement diagnostique constitue un exemple typique.

de pratiquer une
démarche de
raisonnement

Pour tirer des simulations les informations intéressantes, il est indispensable que les élèves mènent les explorations de manière organisée, c'est-à-dire en mettant en oeuvre une méthode d'investigation, de collecte et d'analyse des résultats. Cette démarche systématique fait implicitement appel aux activités intellectuelles associées à la démarche expérimentale. Il faut

noter cependant que, par définition, les simulations permettent l'obtention d'un grand nombre de résultats, en fonction des variations des facteurs intégrés dans le modèles, ou des résultats expérimentaux accessibles. De ce fait, l'élève n'est pas dans la situation classique où un nombre limité d'expériences, généralement pertinentes et démonstratives, sont réalisées. Les activités d'anticipation et de planification deviennent alors cruciales, faute de quoi l'élève risque vite de se perdre dans les données recueillies trop facilement. L'exploration des environnements simulés devrait d'autant plus répondre aux exigences requises lors du travail sur matériel réel, notamment : réflexion et prévision guidant l'action, économie des gestes et des moyens, mise en forme des résultats, comptes rendus intermédiaires et terminaux précis, etc. Que ces prescriptions soient en réalité plus ou moins suivies relève plutôt des méthodes d'enseignement que de la nature des supports utilisés.

les activités des élèves
 D'autres caractéristiques des simulations nous semblent importantes pour le déroulement des activités d'investigation et la réalisation des objectifs qui leur sont assignés :

dans des environnements plus riches
 1 - la richesse conceptuelle des phénomènes simulés (et surtout la fiabilité scientifique des modèles implantés et des données utilisées), la variété des méthodes d'investigation auxquelles ils se prêtent, et dans une certaine mesure leur complexité. Ceci est particulièrement vrai pour le second cycle de l'enseignement secondaire, où on constate que les situations simples tombent rapidement en désuétude (cas de l'influx nerveux, en biologie),

peuvent être libres
 2 - la marge d'initiative laissée aux élèves dans l'exploration et la recherche de solutions, suivant que celles-ci passent par des actions et des cheminements obligatoires ou optionnels (rigidité de la conception), permettent de développer un raisonnement divergent, de mettre en évidence plusieurs solutions, etc. Cette marge est souvent en relation avec les modalités d'échanges, la souplesse et la variété des interactions,

ou guidées
 3 - l'existence de systèmes d'aide associés, qui s'avèrent indispensables parce que l'exploration d'environnements ouverts et complexes n'est pas une activité triviale (31). Ces aides peuvent être factuelles, apportant des informations complémentaires susceptibles d'aider à résoudre le problème posé, "logistiques", pour l'application de techniques, de méthodes, et pour la conservation et la mise en forme des résultats, "stratégiques", quand elles portent sur le raisonnement à partir des données enregistrées, ou sur la prévision des actions ultérieures.

Peu de systèmes d'enseignement offrent actuellement de telles

(31) B. VARET et al. : "Comparison between a prescribed and a permissive process, in computer assisted training, in *Decision making. Information Processing*. IFIP Congress. North-Holland Publishing Company. Amsterdam. 1977. pp. 343-346.

potentialités. La conception de ces systèmes d'aide, qu'ils soient des "partenaires de résolution" ou des experts du domaine, constitue aujourd'hui un des axes de recherche dans le domaine des environnements (intelligents) de l'enseignement (32).

• La construction de modèles par la simulation

Dans les exemples décrits ci-dessus, lorsque l'action porte sur le modèle, elle est alors limitée à la modification des valeurs attribuées à des variables (conditions initiales par exemple) ou à des paramètres du modèle (intensité de la pesanteur, taux de mortalité d'une population, etc.). Des améliorations significatives de l'interactivité ont été enregistrées ces dernières années, allant dans le sens des possibilités d'action, en "temps réel" sur la simulation (33). Il n'en reste pas moins que les facteurs pertinents sont toujours pré-établis, et que la forme du modèle est figée dans le logiciel.

L'exploration permet de tirer beaucoup d'informations de ces modèles simulés. Elle n'est cependant pas forcément l'activité la plus favorable à la perception fine de l'action des facteurs et des domaines de validité des modèles utilisés. Cette perception est particulièrement ardue lorsqu'il faut envisager les effets qui résultent d'une action combinée de plusieurs facteurs.

Pour fournir une vue synthétique d'un problème complexe, une deuxième approche est explorée : l'utilisation des ordinateurs pour la mise au point de modèles construits avec les élèves (plus souvent que par ces derniers). Cette démarche consiste, en partant de relations simples ou évidentes, ou bien d'informations disponibles dans la littérature, à construire une succession de modèles partiels qui sont progressivement enrichis par l'intégration de variables ou de conditions supplémentaires. Les équations qui décrivent chaque modèle partiel sont mises sur ordinateur. Des exécutions successives (simulations) fournissent des résultats qui sont comparés à la réalité, entraînant des corrections, des ajustements, et l'élaboration de nouvelles équations descriptives du phénomène.

La faisabilité pédagogique de cette approche n'est pas de toute évidence et se heurte jusqu'à à diverses limitations, au

l'élaboration de
modèles

mis à l'épreuve
par la simulation

(32) Voir en particulier :

M. ALCHER, F.M. BLONDEL, N. SALAME : "Aide à la déduction dans le raisonnement expérimental en biologie". EAO87. Cap d'Agde. 1987.

M. STEIBEL, et al. : "MENDEL : an intelligent tutoring system for genetics problem solving, conjecturing and understanding". *Machine-Mediated Learning*. n° 2. 1987. pp. 130-159.

(33) E. SCANLON, R.B. SMITH : "A rational reconstruction of a bubble chamber simulation using the Alternate Reality Kit". *Comput. Educ.* vol 12. n°1. 1988. pp. 199-207.

bénéficie de
nouveaux outils

premier rang desquelles figurent la disponibilité d'informations scientifiques de référence, la compétence des élèves, la longueur de la tâche. Sur le plan technique, le problème posé concernait la réalisation informatique des modules de description du modèle (variables et relations), d'exécution des équations définies et de réalisation des tracés et représentations graphiques nécessaires. C'est sur ce second point que des progrès significatifs ont été enregistrés ces dernières années. Il existe maintenant sur micro-ordinateurs, des logiciels spécialisés orientés vers la réalisation de ces modélisations : Micro-dynamo, Stella, Dynamic Modelling System, pour n'en citer que quelques-uns. Ces outils ont en commun, de demander à l'utilisateur de nommer les variables, de leur affecter les valeurs initiales, de décrire les relations qui les relient entre elles. Le système vérifie que tous les éléments nécessaires ont été introduits, et gère les itérations nécessaires et les visualisations. Les différences entre ces outils résident principalement dans la "convivialité" et l'interactivité qui y sont intégrées (34).

Pour illustrer cette démarche en biologie, les exemples sont souvent empruntés à l'éthologie, et particulièrement aux modèles qui décrivent le développement de populations, la compétition entre espèces, et les résultats de l'action (régulatrice ou dérégulatrice) de l'homme sur les milieux naturels ou gérés. En partant d'un problème simplifié (étude de la croissance d'une espèce isolée), on peut dans un premier temps construire un modèle qui ne tient compte que d'un taux de reproduction annuel constant, pour constater que ce modèle exponentiel n'est pas réaliste, et introduire ensuite des variations de ce taux en fonction de la densité de la population totale et des limites d'accueil du milieu, ou bien en tenant compte d'autres facteurs tels que le taux naturel de mortalité, ou la sensibilité de la population à des épidémies, etc. Progressivement, le modèle initial est étendu à la compétition entre deux espèces, avec ou sans relations de prédation entre elles, et à des projections d'évolution de l'ensemble du milieu en fonction de différentes stratégies de gestion qui peuvent être adoptées (35). Cette démarche est envisageable dans les domaines quantifiables : transformations énergétiques (photosynthèse), circulation des éléments minéraux dans un système, etc.

(34) H. J. BECKER : "Instructional uses of school computers". *Johns Hopkins University*, 1, 1986.

J. R. HARTLEY : "Learning from computer based learning". *Studies in Science Education*. n° 15. 1988. pp. 55-76.

(35) Voir notamment

C. BRAVARD : "Equilibre d'une biocénose". *Bulletin de l'APBG*. n° 3. 1978. pp. 690-706.

P. VAN KLAVEREN : "Le langage micro-dynamo : exemples d'utilisation pour la construction de modèles écologiques". in *Modèles et Simulations. IXèmes Journées Internationales sur l'Education Scientifique*. Université Paris VII. 1987. pp. 549-553.

En physique, des exemples ont été développés dans lesquels l'élève peut agir sur le modèle, en choisissant lui-même tout ou partie des équations. Ces exemples concernent principalement l'étude de la mécanique, et sont conçus dans des langages tels que Logo. Les activités consistent à reconstruire ou à reproduire des mouvements simples ou complexes, étudiés expérimentalement avec des dispositifs stroboscopiques. L'élève met en oeuvre des connaissances acquises ou propose des relations nouvelles qu'il pourra tester par la simulation (36).

et peut aller
jusqu'à la
programmation

Ce type de simulation a été également proposé par Ogborn et Wong (37) sous la forme d'activités plus proches de la programmation : l'introduction des procédés de résolution numérique par itération (au niveau de l'algorithme) permet d'accéder à l'exploration et à la compréhension des équations différentielles.

Ceci est à rapprocher d'un courant actuel de la recherche en physique : la "physique sur ordinateur" (Computational physics, (38)), considérée par certains comme une branche à part entière de la physique, qui, parce qu'elle tient à la fois de la physique expérimentale et de la physique théorique, assure une jonction entre ces domaines.

Dans l'enseignement, la difficulté d'établir des liens suffisants avec la réalité ou les données expérimentales (soit parce qu'elles font défaut soit parce que s'interposent des problèmes de forme des données, d'échelle de représentation, de précision de la méthode, etc) constitue la limite de ces utilisations.

l'analyse de
résultats
expérimentaux

Ces problèmes ne se posent plus lorsque la simulation numérique est disponible comme outil complémentaire dans un logiciel d'analyse de données. Il ne s'agit plus dans ce cas d'obtenir une simple description des résultats expérimentaux : l'élève doit déterminer les grandeurs qui vont lui permettre d'étudier le système, construire à partir de ses connaissances

-
- (36) A. TEXTIER. *Des ailes pour la tortue, simulation de mouvements en LOGO*. CNDP. 1987. Cette publication est aujourd'hui disponible avec la disquette de programmes.
A. TEXTIER : "Simulation, modélisation et apprentissage", *Feuilles d'épistémologie appliquée et de didactique des sciences*. n°8. 1986. pp. 121-126.
- (37) J. OGBORN : "A microcomputer modelling system and the teaching problem structure". in *Recherches en didactique de la physique. Actes du colloque international de La Londe les Maures*. PARIS. CNRS. 1983. pp. 441-444.
F. ROBSON, D. WONG : "Teaching and learning with the Dynamical Modelling System". *SSR*. June 85. pp. 682-695.
- (38) A.D. BOARDMAN et al. "Computational physics - a new discipline", in *The Fifth International Conference on Technology and Education*. Edinburgh. 1988. Vol 1. pp. 133-136.
J.F. COLONNA, M. FARGE. "L'expérimentation numérique par ordinateur". *La Recherche*. n° 187. 1987. pp. 444-457.

peut aussi faire
appel à la
simulation

un modèle théorique et écrire le jeu des équations qui s'appliquent (modèle de frottement et équation générale du mouvement, par exemple) ; il utilisera l'ordinateur à la fois pour stocker ou acquérir automatiquement des données expérimentales et pour résoudre les équations et confronter directement les différents résultats ainsi obtenus. Là encore, à côté d'outils généraux on trouve maintenant des logiciels (CHUTE, PENDULE) où il est possible d'entrer une loi de force de son choix et d'obtenir la solution numérique de l'équation différentielle du mouvement du système étudié ; la solution est exprimée directement dans les grandeurs étudiées et la confrontation graphique avec les points expérimentaux, permet d'accéder à un modèle théorique (mathématique) pour le frottement fluide (modèle en V par exemple), qui "explique" le comportement amorti observé.

2.3. Le travail sur des banques de données

Des trois orientations que nous examinons, le traitement de banques de données quantitatives est de loin celle qui a été la moins développée, et n'est observée qu'en biologie et en géologie.

Sur divers exemples on a pu montrer que les élèves pouvaient réunir de petits ensembles de données ponctuelles : données d'observation recueillies au cours de sorties pour étudier la nature et la répartition de la végétation par exemple, échantillons de sables se prêtant à une étude gravimétrique pour mettre en évidence des origines différentes etc. Si cette approche fait bien percevoir le processus d'ensemble qui implique la définition des données à rassembler, leur recueil, leur organisation, leur traitement, etc., elle est aussi longue et difficile. En particulier, la fiabilité des données recueillies par les élèves, ainsi que leur volume, ne permettent pas de pousser très loin le traitement, et incitent à la prudence quant aux résultats qu'on peut en tirer.

quelques
réalisations
intéressantes

De petites banques de données ont également été constituées à partir des informations communiquées par des organismes scientifiques. Au cours des quinze dernières années, quelques "banques" seulement ont été réunies :

1 - données biologiques et physico-chimiques sur le lac Léman, réunissant les mesures de 20 facteurs, effectuées en différents endroits du lac de 1976 à 1980. Avec ces données, on peut procéder à l'étude de phénomènes qui affectent de manière cyclique le milieu, tels que la production de phytoplancton et de zooplancton, ou le brassage thermique des eaux, ou celles des interactions entre les êtres vivants et les différents facteurs du milieu, etc.

en biologie

2 - données sur les analyses sanguines de personnes "tout venant" fournies par la sécurité sociale, et celles de malades fournies par un service hospitalier, qui peuvent servir pour étudier les variations des constantes sanguines (cholestérol,

urée, glucose, etc.). Une démarche typique consiste à établir d'abord les limites de variation d'un élément dans une population, de rechercher les corrélations possibles avec l'âge ou la masse des sujets, d'étudier l'influence éventuelle du sexe, de comparer les domaines de variation dans diverses sous populations,

et géologie

3 - données sur les séismes mondiaux de 1970 à 1977 (réunies par des géographes), dont le traitement fournit des cartographies mettant en évidence les zones d'activités sismiques du globe.

ont été exploitées

Ces banques de données (39) malgré leurs dimensions réduites, peuvent donner lieu à des activités individuelles : on peut demander à chaque élève (plus souvent à des binômes) de rechercher, de traiter, et de représenter graphiquement, les informations relatives à un facteur donné, ou celles qui sont pertinentes pour l'étude d'un thème. Elles peuvent aussi fournir l'occasion de travaux de synthèse collective : regroupement et comparaison des résultats en vue de la recherche d'explications biologiques ou géologiques.

Cette activité de traitement et d'interprétation de données est une partie intégrante de la démarche de l'expérimentateur, mais cette étape du raisonnement a été peu favorisée dans l'enseignement, sauf quand il s'agissait de résultats qualitatifs. Le travail intellectuel qui doit être effectué par les élèves est similaire à celui qui est développé à partir d'observations classiques. Les données sont des faits qu'il faut savoir regarder et à partir desquels il est possible d'exprimer des interrogations et de formuler des hypothèses. Le test de ces hypothèses se fait à travers des traitements adéquats. Les résultats des traitements nécessitent le même effort d'évaluation et d'interprétation que les résultats d'une expérience. Ils appellent également des mises en forme adaptées : tableaux et représentations graphiques, le plus souvent.

avec les banques de données actuelles

On peut aller aujourd'hui bien plus loin. De nombreuses banques de données existent dans les centres de recherche et dans les milieux professionnels, notamment auprès d'organismes tels que l'INSERM, l'INRA ou le CNRS. Il est donc tout à fait

(39) Pour une description détaillée de ces banques de données et de leurs utilisations pédagogiques, voir dans *Informatique et enseignement des sciences naturelles*. Communications aux journées de Sèvres. INRP. 1984. les articles de :
 R. VANDROUX : "Une banque de données : Léman". pp. 120-133.
 S. DUPOUY, J.P. MAURIES : "Taux des éléments du liquide extracellulaire". pp. 148-158.
 P. JEROME : "Banques de données granulométriques et modélisation". pp. 165-176.
 Voir également J. UNDERWOOD, G. UNDERWOOD : "Data organisation and retrieval by children". *The British Journal of Educational Psychology*. Vol 57. n° 3. 1987. pp. 313-329.

possible de réunir un ensemble de banques représentant une masse critique suffisante, et dont les résultats des traitements sont reliés aux connaissances enseignées, rendant possible une approche plus systématique des problèmes par les données.

et les logiciels
professionnels
disponibles

La faisabilité de cette approche se pose maintenant en des termes nouveaux, dans la mesure où on peut s'appuyer sur les banques qui sont informatisées, traitées, interprétées et publiées, sachant que les outils informatiques de saisie et de manipulation des données, de traitement statistique et de représentation graphique sont devenus disponibles sur les micro-ordinateurs courants, avec des fonctionnalités satisfaisantes (40).

Le recours à de telles banques implique la nécessité de s'assurer de la fiabilité des données et de situer pour les élèves la place des données dans le processus d'expérimentation qui a conduit à leur collecte : il est rare, en effet, que le biologiste recueille des données qui ne correspondent pas à une hypothèse au départ, ou qui n'entraînent pas une méthode de collecte et une idée préalable des traitements qui leur seront appliqués.

l'initiation des
élèves au
processus de
traitement

L'exploitation de données quantitatives s'est heurtée jusque là à divers problèmes techniques et pédagogiques. Faisant appel à des méthodes et à des concepts statistiques qui sont couramment assimilés aux mathématiques, elle pose la question de la répartition disciplinaire des connaissances nécessaires aux élèves, et de la formation souhaitable des enseignants en statistiques (41). En réalité, c'est à tort que ce problème est considéré a priori comme un obstacle insurmontable, car dans de nombreux cas, les connaissances requises sont à la portée des élèves et des enseignants.

apporte des
activités
nouvelles

On peut maintenant constater que dans la plupart des domaines professionnels, la lecture des résultats des traitements est d'un usage quotidien, parce que ces traitements sont à la fois des moyens de validation et de communication des résultats. La maîtrise du traitement et de l'interprétation des données étant devenue indispensable pour la formation des enseignants de biologie, de géographie, d'économie, etc. chaque discipline est maintenant appelée à intégrer les méthodes statistiques dont elle a besoin, et aura probablement à en assurer l'enseignement. On peut ainsi concevoir que, dans la formation des élèves en biologie, la sélection des données pertinentes pour l'étude des problèmes, la conduite des processus de traitement, d'interprétation et de conclusion, fourniront de nouveaux travaux

(40) H. ROUANET, B. LEROUX, M.C. BERT : *Statistiques en sciences humaines. Procédures naturelles*. Dunod. Paris. 1987.

(41) Des différences de besoins et d'approches avaient déjà été notées dans les recherches précédentes de l'INRP, sur l'introduction de la statistique en mathématiques, en économie et en biologie.

pratiques, qui font partie des savoir-faire modernes nécessaires en sciences expérimentales.

3. CONCLUSION

Nous avons essayé de présenter tout au long de cet article celles des utilisations de l'informatique qui sont actuellement porteuses de transformations dans les activités expérimentales. A travers l'installation progressive de ces usages, plusieurs éléments remarquables méritent d'être soulignés.

1 - Après avoir servi en premier lieu pour exploiter des modèles et pour effectuer des calculs simples, les ordinateurs ont été utilisés comme des instruments de mesure, apportant tout de suite des améliorations techniques notables aux expériences concrètes (rapidité et précision des mesures par l'acquisition automatique), et des perspectives de renouvellement des systèmes étudiés ou des méthodes d'investigation (systèmes plus complexes, accès à des données plus nombreuses). Mais dans un deuxième temps, l'accroissement des possibilités des matériels a permis l'intégration de fonctionnalités complémentaires de traitement et d'analyse numériques. Cette évolution a eu comme conséquence une modification sensible des tâches effectuées par les élèves : l'intérêt s'est déplacé de la collecte des mesures à l'analyse et l'interprétation des données. Les exemples que nous avons choisis dans le domaine de l'expérimentation assistée par ordinateur montrent que l'amélioration des expériences concrètes ne s'est pas limitée à la prise en charge des tâches répétitives, mais s'est traduite également par le renouvellement des activités intellectuelles.

2 - Nous avons également vu qu'il est devenu artificiel, de séparer l'acquisition de mesures, des traitements statistiques et numériques, ou de la simulation, et que l'utilisation optimale de ces ressources réside dans leur accessibilité en fonction des nécessités de l'étude, et non dans un ordre séquentiel. Il faut cependant reconnaître que ces approches qui s'appuient toutes sur les capacités de représentation graphique, deviennent parfois complexes et même sophistiquées, et s'assurer que cette complexité est réellement accompagnée d'une extension des activités des élèves.

3 - Il convient également de noter que, malgré l'évolution que nous venons de décrire, les utilisations proposées des ordinateurs restent assez conservatrices des contenus et des méthodes disciplinaires. De plus, la tendance commune à toutes les approches que nous avons signalées, est la part toujours plus importante accordée au traitement numérique, et aux représentations abstraites. Ainsi, même quand les ordinateurs se connectent au "réel", l'informatique peut ne faire que renforcer, sous couvert d'une extension des activités intellectuelles, le formalisme qui caractérise déjà ces disciplines.

au delà des
améliorations
techniques

le renouvellement
des approches
pédagogiques

Nous pensons que l'informatique peut servir à renouveler les objets d'étude et les approches en prenant plus en compte l'évolution des pratiques et des méthodes dans la recherche et dans l'industrie, et ne pas se cantonner dans l'amélioration des exercices scolaires. La télédétection en fournit un exemple : en s'inspirant des techniques de traitement et des capteurs utilisés par les satellites d'observation de la terre, on peut étudier au laboratoire ou sur le terrain, l'activité photosynthétique des végétaux à partir de leurs réponses radiométriques suivant leurs états de développement. Ceci fournit de nouveaux travaux pratiques de radiométrie et de traitement d'images, complémentaires des manipulations classiques que les ordinateurs peuvent améliorer.

et des activités
intellectuelles

La question importante reste donc la nature des activités indispensables à l'apprentissage. S'agissant des simulations par exemple, on peut signaler que certains des auteurs que nous avons cités trouvent un intérêt à ce que soient modélisées et simulées, précisément, des expériences réalisables au laboratoire. Ces simulations seraient des outils de recherche, constituant un des termes de comparaison nécessaires pour cerner les apprentissages qui peuvent être atteints par l'expérimentation réelle, et les distinguer de ceux qui peuvent être installés avec des substituts. Ce travail revêt pour l'avenir une importance particulière.

constitue la
promesse
essentielle

4 - Reste enfin à signaler les limites pratiques des approches décrites. De multiples obstacles sont à lever, sur le plan de la conception des outils matériels et logiciels, comme sur celui de l'organisation de l'enseignement, pour atteindre une masse critique suffisante pour que ces approches aient un impact effectif. Cette masse n'est pas atteinte, si on se réfère aux produits réellement disponibles et utilisés dans les classes. La réalisation d'ensembles matériels et logiciels cohérents revêt une grande importance dans l'avenir, pour réaliser avec les ordinateurs un enseignement qui ne soit pas marginal et procéder à des évaluations fiables (42). Il existe maintenant plusieurs exemples qui montrent des effets pédagogiques positifs, lorsqu'on dispose de tels ensembles qui proposent aux élèves une utilisation significative, en termes de volume horaire et d'homogénéité dans la manière d'utiliser l'informatique, sur des objectifs bien identifiés. Pour nous en tenir au domaine des sciences, nous renvoyons aux travaux effectués avec les ensembles de logiciels développés à Stanford en mathématiques par P. Suppes (43), aux résultats enregistrés en France dans

(42) A. BORK : "The potential for interactive technology". *Byte*. Vol. 12. n° 2. 1987. pp. 201-206.

(43) P. SUPPES : "Current trends in computer assisted instruction". *Advances in Computers*. Vol. 18. 1979. pp. 173-229.

l'enseignement médical (44), et plus récemment à ceux observés par Rivers et Vockell avec un ensemble de six logiciels de biologie (des simulations) (45).

Daniel BEAUFILS
Naoum SALAME
INRP
Département Technologies nouvelles et
enseignement (DP5)

(44) F.M. BLONDEL et al. : "L'entraînement au diagnostic médical par simulation à l'aide de l'ordinateur". *Informatique et Sciences Humaines*. n° 40-41. Paris. 1978. pp. 347-365.

(45) R. H. RIVERS, E. VOCKELL : "Computer simulations to stimulate scientific problem solving". *Journal of Research in Science Teaching*. vol. 24. n° 5. 1987. pp. 403-416.