

# **modélisation et simulation**

numéro coordonné par

**Maryline Coquidé  
et Jean-François Le Maréchal**

**La revue Aster est indexée dans la base de données FRANCIS  
produite par l'Institut de l'information scientifique et technique (INIST).**

**© INRP, 2006**

**ISBN 10 : 2-7342-1064-9**

**ISBN 13 : 978-2-7342-1064-1**

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes des paragraphes 2 et 3 de l'article L. 122-5, d'une part, que les « copies et reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, sous réserve de mention du nom de l'auteur et de la source, que « les analyses et les courtes citations justifiées par le caractère critique, polémique, pédagogique, scientifique ou d'information », « toute représentation ou reproduction totale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite » (article L. 122-4). Une telle représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

**Directeur de la publication**

---

**Serge Calabre**, directeur de l'INRP

**Comité de rédaction**

---

**Alain Chomat**, INRP, France  
**Maryline Coquidé**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP), France  
**Pierre Fillon**, collège Charles-Péguy, Paris ; UMR STEF (ENS Cachan et INRP), France  
**Claudine Larcher**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP), France  
**Nathalie Magneron**, IUFM Orléans-Tours, Orléans, France  
**Brigitte Peterfalvi**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP), France  
**Karine Robinault**, UMR ICAR (université Lumière-Lyon 2, ENS-LSH, ENS Lyon, INRP, CNRS), France  
**Guy Rumelhard**, lycée Condorcet, Paris ; UMR STEF (ENS Cachan et INRP), France  
**Stéphane Tirard**, centre François-Viète, université de Nantes, France

**Rédacteurs en chef**

---

**Yves Girault**, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, France  
**Christian Orange**, IUFM des Pays-de-la-Loire ; CREN, université de Nantes, France

**Secrétaire de rédaction**

---

**Yann Lhoste**, IUFM Basse-Normandie ; CREN, université de Nantes ; INRP, France

**Comité de lecture**

---

**BELGIQUE**

**Cécile Vander Borgh**, université catholique de Louvain

**BRÉSIL**

**Silvânia Sousa do Nascimento**, universidade federal, Minas Gerais

**CANADA**

**Michel Aubé**, université de Sherbrooke  
**Barbara Bader**, université de Laval  
**Lucie Sauvée**, université de Qu ebec, Montr eal

**ESPAGNE**

**Pedro Canal de León**, universidad de Sevilla  
**Daniel Gil Perez**, universitat de València  
**Roza Martín Del Pozo**, universidad complutense de Madrid  
**Rafaël Porl n Ariza**, universidad de Sevilla

**FRANCE**

**Jean-Pierre Astolfi**, université de Rouen  
**Michel Caillot**, université René-Descartes-Paris 5  
**Pierre Clément**, université Claude-Bernard-Lyon 1  
**Cara Cohen-Azria**, université Charles-de-Gaulle-Lille 3  
**Bernard Darley**, IUFM d'Aquitaine, Bordeaux  
**Béatrice Desbeaux-Salviat**, lycée Louis-le-Grand, Paris ; INRP

**Michel Develay**, université Lumière-Lyon 2  
**Anne-Marie Drouin**, université de Bourgogne-Dijon, Dijon  
**Jean-Jacques Dupin**, IUFM de l'académie d'Aix-Marseille, Marseille  
**Jean-Michel Dusseau**, IUFM de l'académie de Montpellier, Montpellier  
**Monique Goffard**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP)  
**Gabriel Gohau**, lycée Janson-de-Sailly, Paris  
**Jack Guichard**, Palais de la découverte, Paris  
**Daniel Jacobi**, université d'Avignon et des Pays-du-Vaucluse  
**Samuel Johsua**, UMR ADEF université de Provence-Aix-Marseille 1 ; IUFM d'Aix-Marseille, INRP  
**Alain Kerlan**, ISPEF, université Lumière-Lyon 2  
**Joël Lebeaume**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP)  
**Jean-Louis Martinand**, UMR STEF (ENS Cachan et INRP)  
**Patricia Marzin**, LIDSET ; IUFM académie de Grenoble, Grenoble  
**Hélène Merle**, LIRDES ; IUFM de l'académie de Montpellier, Montpellier  
**Élisabeth Pl **, IUFM Champagne-Ardenne, Reims  
**Hélène Richoux**, lycée Marcel-Pagnol, Athis-Mons ; UMR ICAR (université Lumière-Lyon 2, ENS-LSH, ENS Lyon, INRP, CNRS)  
**Guy Robardet**, IUFM académie de Grenoble, Grenoble  
**Monique Saint-Georges**, IUFM du Limousin, Limoges  
**Patricia Schneeberger**, IUFM d'Aquitaine, Bordeaux ; DAEST, université Victor-Segalen-Bordeaux 2  
**Laurence Simonneaux**, ENFA, Toulouse  
**Andrée Tiberghien**, UMR ICAR (université Lumière-Lyon 2, ENS-LSH, ENS Lyon, INRP, CNRS)  
**Jacques Toussaint**, IUFM de l'académie de Lyon, Lyon  
**Éric Triquet**, IUFM académie de Grenoble, Grenoble  
**Michel Vignes**, IUFM de l'académie de Montpellier, Montpellier

**GRÂCE**  
**Vassilia Hatzinikita**, Hellenic Open University, Patras  
**Konstantinos Ravanis**, université, Patras

**ISRAËL**  
**Amos Dreyfus**, faculté d'agriculture, Rehovot

**ITALIE**  
**Maria Arca**, universita La Sapienza, Rome  
**Silvia Caravita**, Istituto di scienze e technologie della cognizione del CNR, Rome

**SÉNÉGAL**  
**Babacar Gueye**, université Cheick-Anta-Diop, Dakar

**SUISSE**  
**André Giordan**, université de Genève  
**Anne-Nelly Perret-Clermont**, université, Neuchâtel

# aster

*une revue pour l'enseignement des sciences expérimentales*

---

Cette revue créée par l'équipe de didactique des sciences expérimentales de l'INRP s'adresse à la fois aux chercheurs en didactique, aux formateurs et aux enseignants concernés par la didactique. Elle publie trois catégories d'articles :

- des études et recherches didactiques sur l'enseignement des sciences expérimentales, à caractère théorique, qui soient accessibles à des enseignants et à des chercheurs non familiers avec la problématique de l'auteur;
- des travaux issus de disciplines autres que la didactique abordant des points qui éclairent les questions proprement didactiques (épistémologie, psychologie, linguistique);
- des descriptions d'activités pédagogiques qui donnent lieu à une analyse des caractéristiques du dispositif, du modèle pédagogique de référence, des activités intellectuelles sollicitées, de l'évolution des représentations.

Chaque numéro est centré sur un thème.

Pour proposer un article vous devez envoyer un texte d'une vingtaine de pages (60 000 signes incluant les documents et la bibliographie), par courriel à :

**aster@inrp.fr**

Vous trouverez les appels à contribution ainsi qu'une fiche technique à destination des auteurs sur le site ([www.inrp.fr/publications/aster](http://www.inrp.fr/publications/aster)). Votre article sera soumis à deux membres du comité de lecture, leurs avis confrontés à celui du comité de rédaction permettront de prendre la décision de sa publication en vous demandant éventuellement des modifications et compléments.

# Modélisation et simulation

numéro coordonné par **Maryline Coquidé**  
et **Jean-François Le Maréchal**

---

## **Introduction**

- ▶ **Maryline Coquidé et Jean-François Le Maréchal**  
*Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : usages et impacts*..... 7

## **Articles**

- ▶ **François-Xavier Bernard, Annick Weil-Barais et Michel Caillot**  
*Les jeunes enfants peuvent-ils acquérir des connaissances sur le monde physique en utilisant un simulateur ?* ..... 17
- ▶ **Berktan Bodur et Jack Guichard**  
*Simuler un phénomène biologique*..... 35
- ▶ **Martin Riopel, Gilles Raïche, Patrice Potvin, Frédéric Fournier et Pierre Nonnon**  
*Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur*..... 57
- ▶ **Jean-François Le Maréchal et Karine Bécu-Robinault**  
*La simulation en chimie au sein du projet Microméga®* ..... 81
- ▶ **Béatrice Desbeaux-Salviat et Dominique Rojat**  
*Réalité et virtualité dans l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre*..... 109
- ▶ **Muriel Ney**  
*Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie*..... 133
- ▶ **Gérard Sensevy et Jérôme Santini**  
*Modélisation : une approche épistémologique*..... 163
- Résumés**..... 189



# Modélisation et simulation dans l'enseignement scientifique : usages et impacts

**Maryline Coquidé**, UMR STEF (ENS Cachan, INRP); maryline.coquide@inrp.fr

**Jean-François Le Maréchal**, UMR ICAR, groupe COAST (CNRS,  
université Lumière-Lyon 2, ENS Lyon, INRP, ENS-LSH); lemarch@ens-lyon.fr

---

La modélisation et la simulation représentent un vaste champ pour les recherches relatives à l'enseignement scientifique et technologique, exploré depuis plusieurs décennies déjà (Giordan & Martinand, 1987). Les travaux les plus anciens concernant la modélisation en sciences ont été listés par Drouin (1992) qui proposait près de 250 références basées sur l'épistémologie, sur la psychologie cognitive ou sur la didactique des sciences. Plusieurs outils didactiques ont été élaborés : outil d'analyse didactique basé sur la modélisation considérée comme pouvant catégoriser savoir savant, savoir enseigné et fonctionnement de l'élève face à ces savoirs (Tiberghien, 1994), schéma distinguant des registres et modélisant des contraintes pour un projet d'enseignement de la modélisation (Martinand, 1992, 1994).

L'apprentissage par la modélisation dans l'enseignement des sciences a, depuis, été le thème d'un numéro spécial de l'*International Journal of Science Education* (2000). Dans la revue de questions sur les apports de la technologie informatique pour l'enseignement des sciences, réalisée par Linn (2003), « *la visualisation de phénomènes scientifiques* » et « *les modèles scientifiques et la simulation* » représentent deux des principaux domaines parmi ceux abordés par l'auteur. Nombreuses sont les revues qui publient régulièrement articles et contributions de recherches, d'innovations ou de développements de la modélisation et de la simulation pour l'enseignement scientifique et technologique. Les questions abordées dans ce numéro d'*Aster*, consacré à la modélisation et à la simulation dans l'enseignement scientifique, sont donc pleinement d'actualité.

L'appel à contribution orientait l'écriture des articles pour mieux connaître la manière dont on peut enseigner et faire apprendre en concevant, en construisant, en manipulant et en adaptant des objets (réels ou virtuels) dans un but de modélisation scientifique. Ce numéro visait donc à proposer un état des lieux des recherches actuelles sur ces questions. L'association des termes

modélisation et simulation a probablement orienté la réception de propositions qui étaient majoritairement centrées sur des modélisations et des simulations informatiques. Distinguer enseignement de la modélisation et enseignement par la modélisation et la simulation, n'est par ailleurs pas toujours aisé. Un enseignement de la modélisation prend aussi en charge des contenus scientifiques, tandis qu'un enseignement par la modélisation et par la simulation prend souvent en compte la nature des modèles. Hogan et Thomas (2001) ont, par exemple, étudié l'utilisation, par des élèves de lycée, du logiciel de modélisation dynamique quantitative *Stella*<sup>®</sup> pour construire des modèles dynamiques d'écosystèmes et pour favoriser le développement d'une pensée systémique. Les articles réunis ici montrent la diversité des cadres théoriques utilisables dans les différents contextes de recherche, qu'ils abordent la thématique de cet ouvrage selon des registres plutôt épistémologique, psychologique ou pédagogique. Ils incitent à réfléchir aux fonctions de la modélisation et de la simulation. De même l'enseignement de la modélisation et par la modélisation et la simulation est discuté ; cela montre la nécessité d'une poursuite de recherche dynamique dans ce domaine.

## **I. Diversité de travaux, de cadres théoriques et de visées**

### ***I.1. Contexte actuel d'usages et de fonctions dans les laboratoires et dans les classes***

Des schémas de molécules qui tournent et se déploient sur l'écran, des modèles qui miment l'évolution du climat, des images animées qui représentent les interfaces entre pointe microscopique et surface... : dans les laboratoires, la puissance numérique des technologies informatiques permet de multiplier les dimensions, d'accélérer le temps, d'accéder à des représentations visuelles ou bien de modéliser des phénomènes complexes. L'extraordinaire puissance du calcul et d'analyse des données offertes par l'ordinateur autorise des traitements statistiques sur des masses énormes de données. La simulation informatique facilite la mise en scène et la lisibilité des résultats. Tout cela implique un nouveau type d'expérience. Dans de nombreuses activités scientifiques et technologiques contemporaines, l'ensemble indissociable théorie, modélisation, simulation et expérimentation est omniprésent. Les modélisations numériques et les simulations informatiques fournissent l'occasion de renouveler le débat du statut épistémologique de la modélisation et de celui de la simulation. Elles questionnent les notions de phénomène, d'expérimentation et même de laboratoire, et il apparaît indispensable de conserver constamment à l'esprit qu'une simulation ne permet d'accéder qu'à la phénoménologie du modèle qu'elle contient.

Dans l'enseignement scientifique, les usages de la modélisation et de la simulation se multiplient. En France, le chapeau commun aux programmes de *sciences physiques et sciences de la vie et de la Terre* (SVT) pour le lycée souligne que



« l'exercice de modélisation du réel est sans doute la démarche la plus importante et aussi la plus difficile dans la démarche scientifique ». Paradoxalement, les programmes d'enseignement des différentes disciplines scientifiques pour le secondaire restent, ensuite, discrets à ce sujet tandis que le décret relatif au socle commun de connaissances et de compétences semblerait plus explicite (2006). Le volet culture scientifique et technologique envisage ainsi que l'élève soit capable de « pratiquer une démarche scientifique », « savoir regarder, questionner, observer, formuler une hypothèse et la valider, argumenter, modéliser de façon élémentaire ; comprendre le lien entre les phénomènes de la nature et le langage mathématique qui s'y applique et aide à les décrire ». Ces compétences visées restent cependant peu commentées et l'on pourrait s'interroger sur la signification, et la faisabilité éventuelle, de « modéliser de façon élémentaire ». L'élève devrait par ailleurs être aussi capable de « manipuler et d'expérimenter » et, entre autres, de « percevoir la différence entre réalité et simulation ».

Les différentes contributions du présent numéro d'Aster montrent la variété des activités, scolaires ou non scolaires, qui font usage de modélisation et de simulation.

## **1.2. Des contributions variées**

Les articles retenus font se côtoyer divers cadres théoriques, différentes approches, différentes visées, différents domaines scientifiques, différents contextes et niveaux d'enseignement.

Quatre articles soumettent des travaux empiriques, deux réalisés auprès de lycéens ou d'étudiants, et deux autres auprès de jeunes élèves ou enfants.

L'étude de François-Xavier Bernard, Annick Weil-Barrais et Michel Caillot, réalisée dans un contexte muséologique, étudie ainsi l'impact sur les apprentissages d'enfants de 3 à 5 ans, d'un dispositif de simulation de mélange de couleurs exposé à la *Cité des sciences et de l'industrie* (Paris). Elle montre que l'âge de 4 ans semble constituer un palier pour que les enfants soient capables de mettre en œuvre les procédures acquises au moyen du simulateur dans des conditions favorables d'accompagnement. L'article de Berktañ Bodur et Jack Guichard, de son côté, étudie la modélisation auprès d'élèves de 8-10 ans et compare les modélisations et les simulations les plus favorables à leur compréhension de la flexion-extension du bras. En effet, la possibilité d'utiliser la modélisation chez les plus jeunes élèves ne fait pas unanimité et a été débattue (Tytler & Peterson, 2004). Ceux qui avancent une impossibilité se recommandent de Piaget pour qui les opérations formelles (à laquelle l'activité de modélisation peut-être assimilée) ne peuvent advenir avant l'adolescence (Inhelder & Piaget, 1955). Les activités scientifiques pour les plus jeunes sont alors considérées comme devant se centrer uniquement sur des activités de classification, de description et de manipulation d'objets matériels (Metz, 1995). Des études, défendant le même point de vue, ont montré que, avant

l'adolescence, l'enfant distinguait difficilement preuve expérimentale et théorie (Kuhn *et al.*, 1988; Kuhn, 1997). À l'opposé, Canal *et al.* (1992) ont montré que des élèves de primaire étaient susceptibles d'avoir une activité de modélisation. Par ailleurs, de jeunes élèves semblent pouvoir distinguer preuve et croyance (Sodian *et al.*, 1991), ou coordonner preuve et théorie lors de situations de covariance (Ruffman *et al.*, 1993).

Trois autres articles adoptent davantage une perspective d'analyse critique ou de contribution théorique. L'article de Béatrice Desbeaux-Salviat et Dominique Rojat, considère ainsi les productions scientifiques et la modélisation sous une forme inhabituelle qui croise les entrées théoriques. Il dialectise la relation fait-théorie et étudie le statut des documents dans l'enseignement des SVT en soulignant ses tentations empiristes.

## 2. Fonctions de la modélisation et de la simulation

Sorte d'expérience, outil intellectuel ou théorique d'analyse, ou bien intermédiaire entre théorie et expérience et source d'information sur la nature des choses, le statut épistémologique des simulations est controversé parmi les scientifiques et les épistémologues (Parrochia, 2000; Varenne, 2006). Bien que leur statut épistémologique fasse débat, modélisation et simulation peuvent, dans l'enseignement scientifique, fonctionner comme un pont entre théorie scientifique et monde réel et être soumises à l'expérience (Gilbert, 2004). Si on s'intéresse non pas au statut mais aux fonctions des modèles et de la simulation, le débat peut se révéler bien constructif. C'est avec une vision élargie, et qui lui est propre, de la notion d'expérience que l'article de Muriel Ney discute ainsi différentes fonctions pédagogiques des modèles et des simulateurs, et l'importance théorique d'une composante « *expérientielle* » dans ces enseignements. Instruments pour explorer la réalité, les modèles peuvent, en effet, avoir des rôles très différents : ils peuvent décrire, expliquer, prévoir ou aider à une prise de décision. Legay (1997) distingue ainsi les « *modèles d'hypothèse* », les « *modèles de mécanisme* » (actuellement les plus répandus), et les « *modèles de décision et de prévision* » (les moins développés mais les plus demandés par la société). De même, les fonctions de la simulation peuvent varier dans chaque domaine concerné et dans chaque cas. Le sommaire du numéro spécial de *Clefs CEA* (2002), revue du Commissariat à l'énergie atomique, consacré à la simulation, propose ainsi « *simuler pour comprendre* », « *simuler pour concevoir* » et « *simuler pour agir* ». L'approche sociologique, de son côté, considère la construction sociale de la preuve. C'est à une découverte de l'épistémologie de Nancy Cartwright (1983; 1999) que nous invite l'article de Gérard Sensevy et Jérôme Santini, avant d'en discuter les conséquences didactiques. Cette épistémologie considère de façon originale l'activité scientifique, elle intègre l'aspect social de la modélisation et elle valorise l'importance de l'expérience, de la situation et des instruments dans la production des modèles.

### 3. Enseigner la modélisation, enseigner par la modélisation et la simulation

Nous avons commenté la difficulté de la distinction entre enseignement de la modélisation et enseignement par la modélisation et la simulation. Dans ce numéro d'Aster, plusieurs articles se situent plutôt dans une visée d'enseignement-apprentissage par la modélisation et par la simulation ; seul l'article de Muriel Ney prend explicitement pour objectif principal une analyse de l'enseignement de la modélisation. Un état des lieux de l'enseignement de la modélisation dans une formation en biologie en université y est présenté.

Dans l'enseignement par la modélisation et la simulation, l'objectif pédagogique principal est que les élèves construisent des savoirs en modélisant des phénomènes scientifiques. Les cadres théoriques sollicités peuvent être divers.

Dans le *model-based learning* de la littérature anglophone, il s'agit de faire évoluer les modèles mentaux des élèves vers des modèles plus scientifiques. Dans ce cadre théorique, un aspect essentiel de l'apprentissage des sciences (Hodson, 1992) consiste alors en la construction par les élèves ou les étudiants de modèles mentaux aussi proches que possible des modèles scientifiques et historiques. Ces différents modèles, modèles mentaux et modèles scientifiques, ne sont absolument pas du même ordre, registre psychologique pour les uns, épistémologique pour les autres. Se pose alors la question de savoir comment peut s'envisager le passage de l'un vers l'autre. Les versions simplifiées des modèles scientifiques, issues de ces études, peuvent faire partie des programmes scolaires et être appelées « *modèles enseignés* » (Gilbert, Boulter & Elmer, 2000). Pour Clément (2000), cette théorie de l'apprentissage s'inscrit dans le développement d'une théorie du changement conceptuel.

L'utilisation de la simulation en classe peut aussi remettre en question l'idée que l'on se fait de la notion d'échafaudage (*scaffolding*). Rappelons que l'échafaudage, issu du modèle socioconstructiviste vygotkien de l'apprentissage, doit permettre à l'élève ou à l'étudiant d'exercer une activité cognitive au-delà de capacités acquises. Il est considéré comme intervenant dans un contexte d'interactions sociales (Vygotski, 1978). Vergnaud (2000) précise que les processus de médiation dans la théorie de Vygotski présentent deux dimensions distinctes mais non indépendantes : la médiation par l'adulte et la médiation par les signes. Dans un contexte scolaire, c'est généralement l'enseignant qui joue le rôle de personne-guide. Avec les usages scolaires des technologies informatiques, une nouvelle interrogation émerge : savoir si l'implantation du modèle au sein d'une simulation peut contribuer à cet échafaudage. Plusieurs travaux avaient apporté des éléments de discussion (Guzdial, 1995 ; Linn, 1995 ; Bell & Davis, 2000). Dans le projet d'apprentissage qu'il avait mis en œuvre, Guzdial avait, par exemple, proposé à des étudiants des « blocs » de modèle pouvant être utilisés « *comme un tout* », plutôt que de les faire modéliser à partir de rien.

### **3.1. Évaluer un impact**

Il peut s'agir de mieux connaître les usages scolaires de l'enseignement, et l'impact sur les apprentissages, de la modélisation et de la simulation. Ainsi, de nombreuses études avaient, de longue date, comparé les effets sur l'apprentissage d'un enseignement basé sur une simulation, par rapport à celui réalisé de façon transmissive sous forme d'exposé. Des domaines tels que la biologie (Rivers & Vockell, 1987), la mécanique (Rieber, Boyce & Assad, 1990), ou bien encore l'électricité (Carlsen & Andre, 1992), avaient notamment été abordés. D'autres travaux (de Jong *et al.*, 1999) montraient que l'apprentissage au moyen de la simulation était plus efficace dans un environnement qui offrait des possibilités d'investigation et de découverte.

L'environnement informatique original pour la formation à la mécanique, présenté dans la recherche de Martin Riopel, Gilles Raiche, Frédéric Fournier et Pierre Nonnon, intègre l'enregistrement automatique des cheminements des étudiants. Ces données, associées à l'analyse des commentaires de ces derniers peut contribuer à appréhender leurs raisonnements lors des différents épisodes. Les recherches françaises semblent explorer davantage les procédures d'enseignement ou de médiation ayant recours à de la simulation. L'article de François-Xavier Bernard, Michel Caillot et Annick Weil-Barrais, et celui de Berktañ Bodur et Jack Guichard, montrent ainsi l'importance du contexte d'enseignement ou d'apprentissage et la nécessité d'une médiation adaptée, en particulier pour les plus jeunes élèves.

### **3.2. Contribuer à une recherche développement**

Il peut s'agir aussi de participer à la recherche-développement d'un logiciel, d'un simulateur ou d'un projet éducatif d'ensemble. L'article de Jean-François Le Maréchal et Karine Bécu-Robinault analyse ainsi un projet de recherche et développement de la simulation pour l'enseignement de la chimie. Une analyse, du point de vue de la modélisation et de la représentation des connaissances, conduit à une proposition de catégorisation des simulateurs.

Celui de Martin Riopel, Gilles Raïche, Frédéric Fournier et Pierre Nonnon présente une recherche de développement d'un environnement informatisé d'apprentissage de la mécanique qui associe un système d'expérimentation assistée par ordinateur et un système de simulation. Cet environnement original permet aux étudiants de comparer séquence vidéo animée et simulation, grâce à une superposition directe d'images d'objets réels et virtuels.

## **4. Des besoins de recherche**

La mise en œuvre de démarches de modélisation et le développement de la simulation en classe supposent aussi de mieux connaître les usages qu'en font les

enseignants et les exigences ou contraintes d'utilisation pour des apprentissages. L'appel à communication pour ce numéro incitait à des propositions sur ces questions. Il s'agissait de s'interroger sur les facteurs qui déterminent la conception des outils pédagogiques pour la modélisation et la simulation, sur les contraintes d'usage, sur les conceptions des enseignants, sur les compétences requises, sur les formations éventuelles. Plusieurs articles ont déjà été publiés sur ces questions : analyse des conceptions sur la modélisation d'élèves (Treagust *et al.*, 2002) ou d'enseignants (Van Driel & Verloop, 2002 ; Justi & Gilbert, 2003), impact d'une formation d'enseignants (Crawford & Cullin, 2003), analyse des difficultés et de la faisabilité d'un enseignement de modélisation compartimentale (Orange, 1997), analyse de contraintes d'usage de la modélisation et de la simulation informatique (Beaufils *et al.*, 1999 ; Buty, 2003 ; Beaufils & Ramage, 2004), mais de nombreuses questions demeurent en suspens. Quelles difficultés la modélisation pose-t-elle aux élèves ? Comment les aider à appréhender le statut de la modélisation et celui de la simulation ? La mise à disposition et l'adaptation, pour l'enseignement, de pratiques et d'outils scientifiques permettent, en outre, de bâtir de nouvelles situations d'apprentissage utilisant les simulations. Comment se font ces adaptations ? Avec quelles règles de conception ? Sous quelles contraintes ? Avec quelles perspectives d'usage ? ■

## BIBLIOGRAPHIE

- BEAUFILS D. & RAMAGE M.-J. (2004). Simulation informatique et enseignement de la physique : regards didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 866, p. 1081-1090.
- BEAUFILS D., RICHOUX H. & CAMGUILHEM C. (1999). Savoirs et savoir-faire associés à l'utilisation d'instruments informatisés dans des activités de travaux pratiques de physique. *Aster*, n° 28, p. 131-148.
- BELL P. & DAVIS E.A. (2000). Designing Mildred: Scaffolding students' reflection and argumentation using a cognitive software guide. In S. O'Connor-Divelbiss (Éd.). *Proceedings of the fourth international conference of the learning sciences*. Mahwah, NJ: Erlbaum, p. 142-149.
- BUTY C. (2003). Richesses et limites d'un modèle matérialisé informatisé en optique géométrique. *Didaskalia*, n° 23, p. 29-64.
- CANAL J.-L., GENZLING J.-C., PIERRARD M.-A. & SARRAZIN L. (1992). La modélisation à l'école élémentaire. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 55-117.
- CARLSEN D. & ANDRE T. (1992). Use of a microcomputer simulation and conceptual change text to overcome students preconceptions about electric circuits. *Journal of Computer-Based Instruction*, n° 19, p. 105-109.

- CARTWRIGHT N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford: Oxford University Press.
- CARTWRIGHT N. (1999). *The dappled world: a study of the boundaries of sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Clefs CEA (2002), n° 47, hiver 2002-2003.
- CLEMENT J. (2000). Model based learning as a key research area for science Education. *International Journal of Science Education*, vol. 22, n° 9, p. 1041-1053.
- CRAWFORD B. & CULLIN M. (2003). Supporting prospective teachers' conceptions of modelling in science. *International Journal of Science Education*, vol. 26, n° 11, p. 1379-1402.
- DROUIN A.-M. (1992). Cheminement bibliographique. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 23-53.
- GILBERT J.K. (2004). Models and modelling: routes to more authentic science Education. *International Journal of Science and Mathematics Education*, n° 2, p. 115-130.
- GILBERT J.K., BOULTER C.J. & ELMER R. (2000). Positioning models in science Education and in design and technology Education. In J.K. Gilbert & C.J. Boulter (Éd.). *Developing models in science Education*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, p. 3-18.
- GIORDANA A. & MARTINAND J.-L. (Éd.) (1987). Modèles et Simulation. *Actes des IX<sup>e</sup> Journées Internationales sur l'Éducation Scientifique*. Paris : UER de didactique des disciplines, université Denis-Diderot-Paris 7.
- GUZDIAL M. (1995). Software-realized scaffolding to facilitate programming for science learning. *Interactive Learning Environments*, n° 4, p. 1-44.
- HODSON D. (1992). In search of a meaningful relationship: An exploration of some issues relating to integration in science and science Education. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 5, p. 541-562.
- HOGAN K. & THOMAS D. (2001). Cognitive comparisons of students' systems modelling in ecology. *Journal of Science Education and Technology*, vol. 10, n° 4, p. 319-345.
- INHELDER B. & PIAGET J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Paris : PUF.
- International Journal of Science Education* (2000), vol. 22, n° 9.

- JONG (de) T., MARTIN E., ZAMARO J.M., ESQUEMBRE F., SWAAK J. & JOOLINGEN W.R. (1999). The integration of computer simulation and learning support: an example from the physics domain of collisions. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 36, n° 5, p. 597-615.
- JUSTI R. & GILBERT G. (2003). Teacher's views on the nature of models. *International Journal of Science Education*, vol. 25, n° 11, p. 1369-1386.
- KUHN D. (1997). Developmental psychology and science Education. *Review of Educational Research*, 67, 141-150.
- KUHN D., AMSEL E. & O'LOUGHLIN M. (1988). *The development of scientific thinking skills*. London: Academic Press.
- LEGAY J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Paris : INRA Éditions.
- LINN M.C. (1995). Designing computer learning environments for engineering and computer science: The scaffolded knowledge integration framework. *Journal of Science Education and Technology*, n° 4, p. 103-126.
- LINN M.C. (2003). Technology and science Education: starting points, research programs and trends. *International Journal of Science Education*, vol. 25, n° 6, p. 727-758.
- MARTINAND J.-L. (dir.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- MARTINAND J.-L. (dir.) (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- METZ K. (1995). Reassessment of developmental constraints on children's science instruction. *Review of Educational Research*, n° 65, p. 93-127.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- PARROCHIA D. (2000). L'expérience dans les sciences : modèles et simulation. In Y. Michaud (dir.). *Qu'est-ce que la vie ?* vol. I. Paris : Éd. Odile Jacob, p. 193-203.
- RIEBER L.P., BOYCE M. & ASSAD C. (1990). The effects of computer animation on adult learning and retrieval tasks. *Journal of Computer-Based Instruction*, n° 17, p. 46-52.
- RIVERS R.H. & VOCKELL E. (1987). Computer simulations to stimulate scientific problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 24, p. 403-415.

- RUFFMAN T., PERNER J., OLSON D. & DOHERTY M. (1993). Reflecting on scientific thinking: Children's understanding of the hypothesis-evidence relation. *Child Development*, n° 64, p. 1617-1736.
- SODIAN B., ZAITCHICK D. & CAREY S. (1991). Young children's differentiation of hypothetical beliefs from evidence. *Child Development*, n° 62, p. 753-766.
- TIBERGHEN A. (1994). Modeling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 10, n° 4, p. 71-87.
- TREAGUST F., CHITTLEBOROUGH G. & MAMIALA T. (2002). Students understanding of the role of scientific models in learning. *International Journal of Science Education*, vol. 24, n° 4, p. 357-368.
- TYTLER R. & PETERSON S. (2004). From "Try-it and See" to strategic exploration: characterizing young children's scientific reasoning. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 41, n° 1, p. 94-118.
- VAN DRIEL J.H. & VERLOOP N. (2002). Experienced teachers' knowledge of teaching and learning of models and modelling in science Education. *International Journal of Science Education*, vol. 24, n° 12, p. 1255-1272.
- VARENNE F. (2006). *Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations*. Paris : Éd. Pétra.
- VERGNAUD G. (2000). *Lev Vygotsky. Pédagogue et penseur de notre temps*. Paris : Hachette.
- VYGOTSKY L.S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge: Harvard University Press.



# **Les jeunes enfants peuvent-ils acquérir des connaissances sur le monde physique en utilisant un simulateur ?**

**François-Xavier BERNARD**, université René-Descartes-Paris 5, laboratoire éducation et apprentissages ; bernardfx@vjf.cnrs.fr

**Annick WEIL-BARAIS**, université d'Angers, laboratoire de psychologie : processus de pensée ; annick.weil-barais@univ-angers.fr

**Michel CAILLOT**, université René-Descartes-Paris 5, laboratoire éducation et apprentissages ; caillot@paris5.sorbonne.fr

---

*Dans le contexte d'une exposition pour jeunes enfants à la Cité des sciences et de l'industrie, deux études ont été réalisées avec l'objectif d'évaluer si l'utilisation d'un dispositif multimédia simulant des mélanges de couleurs leur permet ultérieurement de réaliser les mélanges appropriés pour obtenir des couleurs déterminées. La première étude a porté sur vingt enfants âgés de 2 ans et 6 mois à 5 ans et 6 mois observés dans un contexte expérimental de manipulation, sous la conduite d'un tuteur expert. Les analyses conduites, visant à cerner l'âge à partir duquel les enfants sont capables de mettre en œuvre des procédures acquises au moyen du simulateur dans des conditions favorables d'accompagnement, mettent en évidence que pour le domaine de connaissance considéré, l'âge de 4 ans semble constituer un palier. La seconde étude a donc concerné des enfants âgés d'au moins 4 ans (vingt-cinq au total) observés dans le contexte habituel d'utilisation, accompagnés soit d'un parent soit d'un animateur. La comparaison de leurs conduites à un prétest et à un posttest (tâche de coloriage avec des objets matériels) a permis d'évaluer l'apport de l'usage du simulateur. Les résultats montrent que celui-ci peut permettre l'acquisition de connaissances sur le monde physique, mais que le rôle de l'adulte qui exerce le tutorat reste déterminant pour les enfants de moins de 5 ans.*

Aujourd'hui le recours à la simulation en situation d'apprentissage est très fréquent, aussi bien pour la formation professionnelle que pour l'enseignement général ou technologique aux niveaux secondaire et supérieur. Un contexte d'apprentissage rarement évoqué, où des situations de simulation sont également proposées, est celui des musées de sciences. Les institutions muséales à caractère scientifique et technique sont en effet considérées, par un certain nombre d'auteurs, comme des lieux d'apprentissage potentiels, compléments de l'éducation formelle dispensée par l'institution scolaire dont elles sont aujourd'hui un partenaire privilégié (Allard, 1993; Delacôte, 1997; Giordan, 1998; Guichard & Martinand, 2000; Girault, 2000, 2003; Fortin-Debart, 2004). Sans revenir en détail sur les bénéfices pour les élèves de la rencontre entre ces deux mondes, disons seulement que, lorsqu'elle est anticipée, cette rencontre a un effet largement positif aux plans cognitif, culturel, mais aussi affectif et social (Abrougui & Clément, 1996; Guichard & Guichard, 1997; Royon *et al.*, 1999; Cohen, 2001). Les élèves de tous âges sont concernés, y compris les plus jeunes, certaines structures proposant des expositions spécifiquement destinées aux enfants, accessibles parfois dès l'âge de 2-3 ans (Coquidé-Cantor & Giordan, 1997; Noé, 2003). Ces expositions, lieux d'investigation, s'appuient sur des environnements interactifs dans lesquels le plaisir est associé à la découverte active des sciences et des techniques. L'enfant, en interaction avec l'environnement matériel et humain, développe des attitudes faisant appel à la curiosité, au questionnement, à l'observation, au tâtonnement expérimental, démarches prescrites par les programmes scolaires pour les sciences et les techniques (Guichard, 1999). Or, la simulation peut être nécessaire dans les expositions, pour rendre compte de phénomènes naturels ou de systèmes techniques, impossibles à présenter sous forme réelle : soit que leur échelle de temps, trop rapide ou trop lente, ne coïncide pas avec le temps de la visite, soit que leurs dimensions les rendent impossibles à reconstituer dans l'espace d'exposition, soit, enfin, que leur nature n'est tout simplement pas compatible avec les contraintes inhérentes à de tels environnements. Dans le domaine des sciences naturelles, comme le rappelle Van-Praët (1988), peu de réactions biologiques s'accordent avec la durée de visite, « *si l'on excepte les réactions sensorielles, par définition compatibles avec une brève démonstration, les vitesses des réactions moléculaires sont trop rapides et à l'inverse celles des mécanismes écologiques et évolutifs trop lentes pour permettre de les présenter directement dans une exposition* ».

Les musées pour enfants font également appel à des dispositifs de simulation en sciences, comme substituts en lieu et place des expériences réelles, depuis déjà plusieurs années (Guichard, 1987). Or nous savons peu de choses sur l'impact de ce type de dispositifs en termes d'apprentissages, lorsqu'ils sont utilisés dans les conditions particulières d'une visite d'exposition par des jeunes enfants. C'est pourquoi nous avons effectué une recherche à partir d'un cas particulier de dispositif de simulation informatique, mettant en jeu un contenu de savoir déterminé. Nous avons tout d'abord tenté de cerner l'âge auquel les enfants sont capables de

mettre en relation les objets et les transformations simulées avec les objets matériels et les actions, le domaine de validité des résultats obtenus étant limité à ce contenu de savoir. Nous avons ensuite essayé d'évaluer l'incidence de la tutelle exercée par l'adulte. La recherche s'est déroulée dans le contexte de la *Cité des enfants* à la *Cité des sciences et de l'industrie* (Paris), dans une exposition pour enfants âgés de 3 à 5 ans. Deux séries d'observations ont été conduites à propos du dispositif muséologique *Dessine avec ton doigt* simulant des mélanges de couleurs, la première dans un contexte expérimental de manipulation sous la conduite d'un tuteur expert, appliquant un protocole d'aides graduées en fonction des conduites manifestées par les enfants, la seconde dans le contexte naturel où les enfants sont accompagnés d'un de leurs parents ou d'un animateur scientifique.

## **I. Mettre en relation des représentations et le monde des objets**

En tant qu'outils de simulation, les ordinateurs confrontent les utilisateurs, non pas à des objets matériels comme le font les expériences réelles mais à des représentations symboliques censées rendre compte de ces objets. Ce constat soulève une question essentielle, pourtant peu traitée, qui est celle de la mise en relation par les utilisateurs de ces deux formes d'objets, symboliques et matériels. Perriault (2002) rappelle ainsi que le passage de l'écran à la réalité externe ne va pas de soi, y compris pour les adultes. La question est donc d'autant plus vive pour les jeunes enfants qui, d'une manière générale, comme le souligne Jamet (2002), font l'objet de peu de travaux dans le domaine de l'apprentissage à l'aide des outils informatiques, et dont on connaît mal les capacités à relier le monde des objets virtuels visualisés à l'écran de l'ordinateur et celui des objets réels représentés.

Deloache (1987, 1995) a travaillé sur la capacité des jeunes enfants à acquérir des informations à partir de représentations symboliques tels que les maquettes, les dessins ou les photographies. Elle a montré que les enfants, dès l'âge de 3 ans, sont capables de considérer ces représentations pour leur fonction symbolique et de les utiliser en tant qu'instruments pour résoudre des problèmes dans le monde physique. En revanche, lorsque les jeunes enfants sont face à un écran d'ordinateur, nous savons peu de choses.

Avec des sujets plus âgés, plusieurs recherches se sont intéressées à la question de la place du virtuel par rapport au réel dans une perspective d'apprentissage, en ayant recours à des logiciels de simulation (Nonnon, 1998 ; Vivet, 2000 ; Smyrniou, 2003 ; Smyrniou et al., 2003 ; Guichard et al., 2004). Ces recherches, réalisées dans différents contextes (scolaire, muséal, professionnel) avec des sujets d'âge varié (élèves du cycle 3 du primaire, du secondaire, adultes en formation), portent sur l'appréhension de différents phénomènes scientifiques ou technologiques. Les méthodologies retenues sont sensiblement identiques et consistent à faire réaliser aux sujets une même expérience, à l'aide d'un logiciel puis à l'aide d'objets matériels.

Sur la base de grilles d'observations et d'entretiens, il s'agit de déterminer le type de manipulation le plus favorable à la compréhension du phénomène cible. Certains critères, comme l'ordre des manipulations, l'origine socioculturelle des sujets, le logiciel employé, peuvent être retenus. Concernant la question initiale du rapport virtuel/réel, ces recherches aboutissent à une même conclusion et montrent que la réalisation d'expériences avec un logiciel est complémentaire à la réalisation d'expériences portant sur les objets matériels, mais ne saurait être suffisante : le tâtonnement sur le réel demeure le plus efficace du point de vue de la compréhension. L'animation virtuelle ne pouvant s'y substituer, elle permet au mieux de l'enrichir en tant qu'outil d'accompagnement.

Ce constat appelle plusieurs remarques compte tenu du contexte et du public cible retenus dans le cadre de notre recherche. Dans un espace d'exposition, les dispositifs interactifs multimédias, lorsqu'ils sont envisagés comme outils de simulation, le sont précisément pour médiatiser une réalité dont on ne peut rendre compte autrement, nulle manipulation matérielle ne venant accompagner et enrichir l'activité virtuelle. Or s'agissant du public cible, à savoir de très jeunes enfants, la nécessité de la confrontation aux objets matériels est considérée comme nécessaire à la compréhension de phénomènes scientifiques<sup>1</sup>. Si l'on s'en tient strictement au modèle piagétien du développement intellectuel, les capacités cognitives de l'enfant demeurent dépendantes du concret avant d'accéder au niveau formel vers 12-14 ans.

Par ailleurs, la manipulation de ces dispositifs se fait dans des conditions qui sont celles d'une visite d'exposition, lieu d'apprentissage particulier différant du cadre scolaire à plus d'un titre. Contrairement à l'école, l'enfant visiteur n'est pas tenu de parvenir à des objectifs précis et il n'y a pas de validation des acquis. Comme le rappelle Guichard (1999, p. 95), « *l'absence d'interaction entre le concepteur d'un média et son public diffère complètement de celle [l'interaction] entre l'enseignant et l'élève dans le cadre scolaire* ». En outre, les adultes qui accompagnent ces enfants sont le plus souvent leurs parents qui ne sont pas *a priori* des professionnels de la médiation en sciences. Enfin, s'agissant des conditions matérielles de visite, dans des expositions comme celles de la *Cité des enfants*, elles sont *a priori* peu favorables à un apprentissage : l'ambiance sonore est élevée, les sollicitations tant humaines que matérielles sont importantes, et l'enfant évolue parmi un nombre de visiteurs souvent important ce qui limite généralement le temps de manipulation des dispositifs muséologiques à quelques minutes.

Compte tenu de ces remarques, il est donc légitime de s'interroger sur l'impact des dispositifs de simulation proposés dans les expositions scientifiques pour enfants : leur utilisation dans le cadre d'une visite permet-elle aux enfants

---

<sup>1</sup> Les propos tenus à cet égard dans l'ouvrage collectif *La main à la pâte* (Charpak et al., 1996, p. 32) sont sans ambiguïté : « *Seule la confrontation au réel modifie en profondeur sa [l'enfant] perception des choses et lui permet de faire évoluer ses concepts.* »

d'acquérir des connaissances sur le monde physique ? Telle est la question essentielle abordée dans le cadre de cet article.

## 2. Méthode générale

La recherche a été menée en deux temps, tout d'abord dans un contexte expérimental de manipulation, puis dans un contexte naturel de visite au musée. Dans les deux cas, le même environnement informatique a été utilisé.

### 2.1. L'environnement informatique

Le dispositif muséologique *Dessine avec ton doigt*, dans l'espace d'exposition destiné aux enfants de 3 à 5 ans de la *Cité des enfants*, a été utilisé comme support d'activité. Ce multimédia interactif propose un environnement logiciel évoquant un contexte familier : une feuille de dessin, des pots et tubes de peinture de différentes couleurs. Par le biais d'une interface tactile (figure 1), les enfants sont invités à dessiner avec leurs doigts en utilisant les différentes couleurs proposées dans les pots ou leurs propres couleurs qu'ils créent en effectuant des mélanges à partir des trois tubes de couleurs primaires : rouge magenta, bleu cyan et jaune. On notera que les couleurs proposées pour le mélange sont les couleurs primaires dans le système de la synthèse soustractive, c'est-à-dire celles qui sont utilisées dans le mélange des pigments, de la peinture, de l'imprimerie.



**Figure 1** Capture d'écran du jeu *Dessine avec ton doigt*  
Exposition 3 ans, *Cité des enfants*, *Cité des sciences et de l'industrie*

L'environnement logiciel place l'enfant face à un système de représentation figurative dynamique. L'intérêt du modèle simulé est qu'il rend compte de manière dynamique du mélange en tant que moteur d'une transformation physique. C'est ici la force des systèmes de simulation vis-à-vis des expérimentations sur les objets

réels. « L'outil multimédia offre la possibilité d'appréhender la dimension dynamique des phénomènes scientifiques. [...] Les interfaces peuvent souligner les caractéristiques importantes qui concourent aux phénomènes étudiés et de ce fait favoriser leur intégration dans la représentation du sujet » (Jamet, 2002, p. 167). Partant d'un état initial – deux peintures de couleurs différentes –, la transformation aboutit à un état final modifié – une peinture unique d'une couleur nouvelle. L'enfant, au fur et à mesure qu'il tapote sur les tubes de peintures, voit le mélange se réaliser dans le pot représenté en dessous. Les tubes se vident goutte à goutte à chaque nouvelle pression. Le lien de causalité entre l'action de l'enfant sur les tubes – par le choix des couleurs et des proportions – et la couleur finale obtenue apparaît de manière explicite. Le rôle de l'adulte sera d'attirer l'attention de l'enfant sur ce lien de cause à effet, à travers l'évolution d'un état initial vers un état final, matérialisé par le changement progressif de la couleur du mélange.

## 2.2. La situation-problème

Des scénarios identiques placent les enfants face à la même *situation-problème* : comment peindre avec une couleur donnée, alors que je n'ai pas cette couleur parmi les peintures dont je dispose ? Par exemple, comment puis-je peindre en vert, alors que je n'ai que du jaune, du cyan et du magenta ? Le recours à l'opération de mélange est donc nécessaire. Or, si les enfants ont tous fait l'expérience du mélange de peintures, en constatant plus ou moins fortuitement qu'une nouvelle couleur apparaît en mettant en contact des peintures de couleurs différentes, ils n'ont pas nécessairement appréhendé la transformation dans sa dimension relationnelle, autrement dit les deux états de cette transformation (initial et final), ne sont pas reliés de façon consciente. Il leur est donc difficile, en imaginant une couleur donnée (état final), d'envisager la possibilité de son obtention, par mélange de deux autres couleurs (état initial).

## 2.3. Population

Pour l'ensemble de la recherche, le public cible est constitué d'enfants en âge de visiter l'exposition des petits de la *Cité des enfants*, c'est-à-dire âgés d'au moins 2 ans et d'au plus 6 ans. Concernant leur statut de visiteur, nous nous sommes adressés à des enfants venus effectuer une visite dans un cadre de loisir familial et non pas de sortie scolaire. Ce choix a été motivé par deux raisons essentielles. L'intérêt de s'adresser à des enfants non issus de groupes scolaires est non seulement de pouvoir constituer des échantillons hétérogènes d'individus, aux plans social et culturel, mais aussi de travailler avec des sujets qui n'ont pas d'expérience collective commune, ce qui permet d'éviter les réponses stéréotypées. En outre, à la *Cité des sciences et de l'industrie*, les individuels représentent deux tiers des visiteurs fréquentant les expositions pour enfants (Département évaluation et prospective, 2005), contre un tiers constitué de visiteurs venus en groupes (scolaires ou autres). Il nous semblait donc plus pertinent de faire porter notre recherche sur ce type de public.

Les enfants et leurs parents ont été sollicités, soit une fois entrés dans l'exposition, soit durant leur attente avant l'entrée, sachant que les visites des expositions de la *Cité des enfants* s'effectuent selon des séances d'une heure trente, à raison de quatre ou cinq séances par jour. Le choix des enfants s'est fait selon des critères visuels d'appartenance à la tranche d'âge retenue.

### **3. Première étude : âge à partir duquel les enfants mettent en relation virtuel et réel**

L'objectif de cette première étude est d'identifier les enfants susceptibles de mettre en œuvre les procédures de mélange acquises au moyen du simulateur, ce qui suppose de leur part la mise en relation des deux formes d'activités.

#### **3.1. Activité dans l'exposition**

L'activité de l'enfant face au dispositif multimédia est conduite par un tuteur expert, médiateur scientifique de la *Cité des enfants*. Son expertise est liée à sa connaissance préalable du dispositif, mais aussi à la nature de son interaction avec l'enfant, aussi bien en termes de discours que de conduite. Celle-ci répond aux critères énoncés par Bruner (2002) pour caractériser l'interaction de tutelle. Le tuteur a pour fonction de mobiliser l'attention de l'enfant sur des aspects spécifiques de l'activité : il pose des questions ouvertes, participe, relance, observe tout en lui laissant l'initiative. Par ailleurs, le tuteur, tout en s'adaptant aux besoins individuels des enfants, conserve une procédure similaire d'un enfant à l'autre, en respectant un enchaînement selon trois phases préalablement définies : une phase de découverte libre du dispositif, une phase portant spécifiquement sur la partie permettant les mélanges, et une troisième phase de renforcement par un jeu de questions. Préalablement, afin d'introduire l'activité mais aussi de collecter des informations sur ce qu'il sait des mélanges, le tuteur mène un bref entretien verbal avec l'enfant.

La dernière phase de l'activité a pour objet de faire appréhender aux enfants la transformation liée au mélange des peintures, en mettant l'accent sur la propriété modifiée à l'issue de cette transformation : la couleur. Les questions posées visent à faire saisir l'articulation entre les deux états de la transformation, en partant soit de l'état initial (« *si je mélange deux couleurs, que se passe-t-il ?* »), soit de l'état final (« *si je veux obtenir une nouvelle couleur, que faire ?* »). Lorsque l'enfant est capable, seul, d'envisager le recours au mélange en réponse à cette dernière question, et de produire ce mélange, l'activité prend fin.

#### **3.2. Entretien postactivité**

Au cours de l'entretien qui suit l'activité, l'enfant est confronté à des objets matériels : une feuille blanche et trois tubes de peinture jaune, cyan et magenta,

comme sur l'écran de l'ordinateur. Après un temps d'appropriation, l'enfant est invité à dessiner en vert. Le rôle de l'expérimentateur consiste à soutenir son activité par une suite d'aides d'intensité croissante, jusqu'à la résolution de la *situation-problème*. Cette suite d'aides est destinée à déterminer le degré de disponibilité de chaque enfant à effectuer la mise en relation entre l'activité sur simulateur et l'expérience avec des objets réels.

Nous avons distingué deux niveaux de relance, explicite et non explicite, selon leur pouvoir plus ou moins évocateur, pour l'enfant, de son activité sur l'ordinateur. Trois relances successives sont susceptibles d'être délivrées par l'expérimentateur, dans un même ordre, au fur et à mesure des difficultés rencontrées par l'enfant pour parvenir au résultat. Les relances étant d'intensité graduelle, elles permettent de quantifier l'aide apportée à chaque enfant dans la résolution du problème. L'hypothèse que nous faisons est qu'il y a un lien entre le nombre de relances nécessaires et la capacité de l'enfant à mettre en relation les deux formes d'activités.

La première relance est verbale et non explicite. Elle ne renvoie pas précisément à l'activité précédente, c'est-à-dire au vécu de l'enfant, mais évoque le concept de transformation en mettant l'accent sur l'état initial de la transformation : « *Est-ce que tu ne peux pas faire du vert avec ces couleurs ? (en référence aux tubes de peinture qui se trouvent devant l'enfant)* ». La seconde relance également verbale est explicite, autrement dit en lien direct avec la première activité : « *Tu te souviens de ce qu'on a fait tout à l'heure ? Comment as-tu fait pour obtenir du vert ?* ». La troisième et dernière relance est également explicite et s'appuie de plus sur un support visuel qui est la capture d'écran du jeu informatique (figure 1) : « *Regarde l'image de l'ordinateur sur lequel on a joué tout à l'heure. Qu'est-ce que tu as fait pour obtenir du vert ?* »

### **3.3. Recueil et traitement des données**

De façon à pouvoir relier les verbalisations et les actions des sujets, toutes les activités ont été enregistrées au moyen d'un caméscope. Les enfants ont été filmés par une tierce personne, mobile, ce qui a permis de saisir leurs conduites au plus près. Les enregistrements ont été intégralement retranscrits. Au total, vingt enfants âgés de 2 ans et 6 mois à 5 ans et 6 mois ont été sollicités. Seuls quinze d'entre eux ont été retenus, certains enfants ayant eu une attitude (inhibition, manque d'intérêt pour l'activité) qui a rendu l'entretien non significatif en termes de résultats.

### **3.4. Résultats**

À partir de l'examen de la suite des réponses de chaque enfant et des aides dont il a éventuellement bénéficié, cinq profils ont pu être caractérisés (tableau 1). Notre hypothèse est que les enfants n'ayant pas bénéficié de relances explicites pour parvenir au mélange (profils 1 et 2) sont susceptibles d'avoir mis en relation l'expérience réelle avec l'expérience virtuelle.



**Tableau I. Répartition des enfants selon le nombre d'aides dont ils ont bénéficié pour effectuer le mélange**

Profil	Tranches d'âge	2 a 6 m <	3 a 6 m <	4 a 6 m <
		≤ 3 a 6 m	≤ 4 a 6 m	≤ 5 a 6 m
(1) Mélange réalisé sans relance		0	2	3
(2) Mélange réalisé après une relance (non explicite)		0	1	1
(3) Mélange réalisé après deux relances (une non explicite et une explicite)		3	0	1
(4) Mélange réalisé après trois relances (une non explicite et deux explicite)		1	1	0
(5) Mélange non réalisé malgré les trois relances		1	1	0

Les résultats montrent que seuls les enfants appartenant aux deux groupes d'âges les plus élevés (3 ans et 6 mois à 5 ans et 6 mois) ont réussi à résoudre le problème posé sans bénéficier de relances explicites. Pour ces enfants qui ont apparemment su tirer parti de l'utilisation du simulateur, le lien entre l'expérience virtuelle et l'expérience réelle semble donc avoir été établi. Le relevé de l'âge de chacun des enfants indique qu'ils ont tous au moins 4 ans. En revanche aucun enfant du groupe d'âge inférieur (2 ans et 6 mois à 3 ans et 6 mois) n'a réussi à réaliser le mélange sans bénéficier d'au moins une aide explicite. Selon notre hypothèse, ce résultat indique qu'il n'y a pas eu, de leur part, de recours spontané à la procédure acquise au moyen du simulateur et donc de mise en relation entre l'expérience réelle et l'activité virtuelle.

### 3.4. Discussion des données de la première étude

Pour le domaine de connaissance considéré, et compte tenu du fait que les quinze enfants ont bénéficié de conditions favorables d'accompagnement, il apparaît que l'âge de 4 ans est approximativement l'âge à partir duquel ils sont susceptibles d'acquérir des connaissances au moyen du simulateur. Toutefois il convient d'être prudent avec ces résultats, car même si les enfants ont semblé découvrir le procédé du mélange de couleurs durant la manipulation du jeu informatique, cela ne nous permet pas d'affirmer qu'ils ne le connaissaient pas avant. Il n'est donc pas prouvé que l'activité menée dans l'exposition soit la seule cause de réussite des enfants dans la résolution du problème qui leur a été soumis avec les objets matériels. Seul un entretien initial basé sur une activité de peinture réelle permettrait de s'en assurer.

## 4. Seconde étude : comparaison de l'utilisation du dispositif de simulation par les enfants dans deux contextes, avec un parent et avec un animateur

Pour la seconde étude, nous n'avons retenu que des enfants de plus de 4 ans puisque les enfants plus jeunes ne sont apparemment pas en mesure de tirer profit de ce qu'ils ont fait avec le simulateur de mélange de couleurs. Afin de mettre à

jour les connaissances préalables des enfants dans le domaine considéré, un entretien initial a été réalisé avant l'utilisation du simulateur. Nous avons ensuite confié la conduite de l'activité aux parents, comme cela se produit d'ordinaire dans l'exposition lorsqu'ils accompagnent leur enfant. Enfin un entretien a été conduit auprès des enfants, à l'issue de l'activité, afin de déterminer si l'utilisation du simulateur leur a permis d'acquérir les connaissances visées. Un groupe contrôle a par ailleurs bénéficié du soutien d'un médiateur expert selon ce même déroulement.

#### **4.1. Population et recueil des données**

Pour cette seconde étape de la recherche, vingt-cinq enfants âgés de 3 ans et 10 mois à 5 ans et 10 mois ont été sollicités. Seuls les résultats de quinze d'entre eux ont été analysés. Les critères d'exclusion retenus sont la non participation de l'enfant aux activités proposées (cinq exclus) et la réussite au prétest (cinq exclus). Les activités ont été filmées, dans l'exposition pendant la manipulation du dispositif avec le parent, de même que les entretiens avec l'enfant, avant et après la manipulation avec le simulateur. Les enregistrements ont été intégralement retranscrits.

#### **4.2. Entretien initial pour cerner les connaissances des enfants sur le mélange de couleurs**

Cet entretien qui se déroule juste avant le début de la visite dans un atelier proche de l'exposition a pour objet de déterminer les capacités de l'enfant à prédire et à réaliser un mélange de couleurs. Afin de s'affranchir d'un éventuel problème de perception de la part de l'enfant, le but est également de vérifier ses capacités à nommer, montrer et associer des couleurs identiques présentées sur des supports différents. L'entretien, qui dure au total une dizaine de minutes, commence ainsi par une série de questions à propos de formes cartonnées de six couleurs différentes, jaune, cyan, magenta, bleu, rouge et vert, qui ne sont autres que les couleurs primaires et leurs complémentaires. L'ensemble est présenté comme un jeu à l'enfant. Pour l'ensemble des questions, les enfants interviewés n'ont pas rencontré de difficulté particulière, si ce n'est pour nommer les couleurs primaires en raison d'un déficit de vocabulaire. Les termes clair et foncé n'étant pas maîtrisés, le bleu cyan primaire et le bleu secondaire font l'objet de confusions, et le rouge magenta est assimilé à du rose. Par contre, nous n'avons observé aucune difficulté pour reconnaître visuellement les couleurs et les associer.

Les épreuves de reconnaissance et d'appariement des couleurs étant réalisées, l'entretien se termine par une activité de peinture, toujours présentée sous forme de jeu. L'enfant est invité à compléter un dessin, en peignant certaines parties colorées inachevées, en magenta, cyan, jaune, vert et noir<sup>2</sup>. Il dispose de seulement

---

2 Rappelons que l'obtention du vert se fait pas mélange de cyan et de jaune, et que celle du noir se fait par celui des trois couleurs primaires, magenta, cyan et jaune.

trois tubes de peinture, qui sont les trois couleurs primaires cyan, magenta et jaune. Ce sont les couleurs qu'il retrouvera dans le jeu *Dessine avec ton doigt*.

Après la présentation du matériel et l'explicitation de la consigne, sous forme de questions, l'enfant débute l'activité. Les enfants ont commencé à peindre les parties du dessin ayant les mêmes couleurs que celles dont ils disposaient. Arrivés aux deux dernières parties à compléter en vert et en noir, ils se sont arrêtés puisqu'ils n'avaient pas ces couleurs devant eux. Le rôle de l'expérimentateur est alors de faire verbaliser l'enfant, par un jeu de questions/réponses, sur les difficultés qu'il rencontre et sur les solutions qu'il envisage pour les contourner. L'objectif final étant de vérifier s'il est capable de recourir à l'opération de mélange pour fabriquer de nouvelles couleurs, les dernières questions vont jusqu'à induire l'idée qu'il est possible d'utiliser plusieurs peintures. Malgré cela, seuls cinq enfants ont proposé un mélange pour faire du vert; en revanche aucun d'entre eux n'a trouvé comment obtenir du noir. L'expérimentateur stoppe alors l'activité et propose à l'enfant d'achever son dessin après la visite de la *Cité des enfants*.

#### **4.3. Activité dans l'exposition**

L'échantillon d'enfants a été divisé en deux groupes sensiblement équivalents du point de vue des classes d'âge représentées : les enfants du premier groupe sont avec un de leur parent, tandis que ceux du second groupe sont avec un médiateur expert comme dans la première étude. À l'issue de l'entretien préalable, il est rappelé aux parents qu'ils doivent faire découvrir le jeu *Dessine avec ton doigt* à leur enfant, notamment pour lui faire appréhender le procédé du mélange des couleurs. Un rendez-vous est fixé avec eux dans l'exposition à mi-parcours de visite, trois quarts d'heure après l'entrée. Avant de commencer l'activité, une aide écrite est apportée aux parents pour leur rappeler les différentes possibilités de mélanges réalisables avec les trois couleurs primaires. Selon les enfants, l'activité a duré entre moins de 3 minutes et plus de 8 minutes. Elle prend fin par abandon d'un des deux partenaires, les parents et leur enfant reprenant le cours de leur visite.

#### **4.4. Entretien postactivité**

À la fin de la visite, soit environ trois quarts d'heure après la manipulation du jeu, un entretien final a été proposé à l'enfant. Le dessin laissé inachevé est repris et la consigne rappelée à l'enfant. Il lui est tout simplement demandé de terminer son dessin commencé avant la visite. L'objet de cet entretien est d'identifier les enfants susceptibles de mettre en œuvre les procédures de mélange découvertes au moyen du simulateur. Nous faisons l'hypothèse que si un enfant recourt au mélange pour créer la couleur manquante alors qu'il n'en avait pas été capable avant la visite, la manipulation virtuelle a joué un rôle. La réussite dans la résolution de ce problème est donc l'expression d'une mise en relation entre les représentations symboliques manipulées et les objets réels.

#### 4.5. Résultats

Les résultats des enfants au cours de l'entretien final sont récapitulés dans le tableau 2.

**Tableau 2. Résultats selon l'âge des enfants et leur appartenance à l'un ou l'autre groupe**

Tranche d'âge	Groupe expérimental Tutorat exercé par le parent		Groupe contrôle Tutorat exercé par le médiateur	
	Nombre d'enfants par tranche d'âge	Nombre d'enfants recourant au mélange	Nombre d'enfants par tranche d'âge	Nombre d'enfants recourant au mélange
3 a 10m ≤ âge < 4 a 10 m	6	0	2	1
4 a 10m ≤ âge < 5 a 10m	4	3	3	3

Nous observons une différence sensible des résultats selon la tranche d'âge à laquelle appartiennent les enfants, puisque les plus jeunes d'entre eux n'ont quasiment pas réussi à mettre en relation la manipulation virtuelle avec l'expérience réelle. Par ailleurs, lorsque le tutorat est exercé par le médiateur, le nombre d'enfants ayant réussi est supérieur pour l'ensemble des deux tranches d'âge. Ces résultats sont bien sûr à considérer avec prudence, compte tenu de l'effectif restreint de notre échantillon.

#### 4.6. Discussion des données de la seconde étude

Nous pouvons nous interroger sur les écarts observés en ce qui concerne les enfants de la première tranche d'âge. En effet, si l'on s'en tient aux résultats de la première étude – sur lesquels nous nous sommes appuyés pour constituer ce second échantillon –, la majorité de ces enfants auraient dû réussir. Vraisemblablement, les stratégies tutorielles développées par les parents et celles développées par l'animateur ne sont pas les mêmes. L'impact des modes d'interactions parents/enfants sur l'appropriation des connaissances scientifiques, dans le contexte de visites à la *Cité des enfants*, a fait l'objet de plusieurs recherches (Piani & Weil-Barais, 1998; Ailincai et al., 2005). Ces travaux montrent que, majoritairement, lorsqu'ils accompagnent les enfants à la découverte de l'exposition, les parents interviennent auprès d'eux d'une manière qui n'est pas la plus adaptée à l'appropriation des connaissances en jeu dans les dispositifs explorés. Ils sont généralement assez directifs, agissant souvent à leur place, et sont plus préoccupés des actions des enfants et de leur réussite que de leur compréhension des mécanismes explorés.

Les dispositifs étudiés (mécaniques) pour ces recherches ne sont pas de même nature que celui (informatique) auquel nous nous intéressons, puisqu'ils sont basés sur la manipulation d'objets bien réels. Nous retrouvons néanmoins les mêmes conduites de la part des parents. L'analyse des transcriptions montre que la plupart

d'entre eux sont relativement directifs avec leur enfant et accordent peu de place à l'autonomie. Concernant la teneur des échanges verbaux, nous constatons que les parents tiennent des discours pauvres en contenus conceptuels. Leur intérêt porte le plus souvent sur les aspects formels de l'activité : le résultat à obtenir, la façon d'utiliser le dispositif. En outre, étant ici confrontés à un objet technique, ils peuvent également être accaparés par des difficultés liées à son utilisation. L'exemple suivant est un extrait de l'échange entre Paul (4 ans et 5 mois) et son père qui lui dit comment dessiner une pomme à l'écran. La question relative au mélange des couleurs n'est pas abordée.

Père (P) : D'accord ok, ça marche... (*lâche la main de son fils et essaie seul.*)  
Tu vois si tu tapotes, t'as vu hop... Tapote encore un peu. (*prends à nouveau la main de son fils et lui fait appuyer du doigt sur le tube de jaune.*) Voilà... on va obtenir un peu de vert et avec ça tu vas dessiner une pomme.

Enfant (E) : (*Attend.*)

P : Donc, tu vas amener ton doigt là, je pense... (*prends le doigt de son fils pour appuyer sur le pot à mélanges.*) Et tu vas amener... voilà... (*lui fait tracer un trait sur la feuille.*) Maintenant tu peux dessiner une pomme.

E : (*Appuie avec son doigt sur le pot à mélanges*)

P : Vas-y le pot est renversé, dessines une pomme à l'écran.

E : (*Trace un trait*)

P : Une pomme comme celle-là ?

E : (*Appuie à nouveau sur le pot à mélanges*)

P : Non, non, mais tu prends ton doigt et maintenant t'as plus besoin de tremper ton doigt dans la peinture, il est plein de peinture alors vas-y dessine une pomme.

E : (*Trace des traits*)

P : Tu fais les contours, tu vas dessiner les contours et après tu vas la remplir (en montrant un point sur l'écran).

E : (*Trace des traits*)

P : Alors, tu la dessines comment ta pomme ?

E : **Comme ça...** (*Essaie de colorier avec son doigt*)

P : Comme ça... Mais elle est un peu ronde quand même non ?

E : (*Arrête et attend*)

P : Comment tu la fais ronde ?

E : (*Trace une forme à l'écran*)

P : Oui, on va dire que c'est un peu rond...

E : (*Attend*)

P : Et puis ensuite tu vas faire, euh... la petite queue ici.

E : (*Appuie sur le mélange*)

P : Voilà.

Afin d'avoir un aperçu de la nature des échanges entre le médiateur et les enfants, voici un extrait de dialogue avec Julien (âgé de 4 ans et 8 mois). Au cours de cet échange, le médiateur tente d'attirer l'attention de l'enfant sur le changement de couleur opéré par le mélange.

Médiateur (M) : Alors tiens, les roues de la voiture..., tu voudrais les faire de quelle couleur ?

Enfant (E) : **Euh, violet** (*l'enfant est en train de dessiner avec du cyan*) ?

M : Violet ?

E : (*Continue à colorier les roues avec la couleur initialement obtenue : cyan*)

M : Alors, si tu rajoutes un peu de violet... ? Regarde ce qu'il se passe... (*le médiateur utilise les mêmes termes que l'enfant pour désigner les couleurs, ici violet pour nommer le magenta*)

E : (*Appuie sur le tube de magenta*)

M : Tu as vu en dessous, de quelle couleur c'est devenu ?

E : (*Arrête d'appuyer et regarde*) **C'est du bleu.**

M : Pourquoi c'est devenu comme ça ?

E : **Parce que ça s'est mélangé avec du bleu...** (*en montrant le tube de cyan*)

M : Voilà, exactement, t'as vu ? Tu as mélangé du bleu et du violet et ça... ça donne un bleu différent (*en montrant les tubes de peinture correspondants*).

E : (*Appuie sur le pot à mélanges et continue son dessin... Appuie sur l'icône pour changer de feuille et commence à appuyer sur le tube de cyan*)

M : Si tu essayais de faire du vert maintenant..., là tu mets du bleu.

E : (*Vide le tube de cyan puis arrête d'appuyer*)

M : Et comment tu pourrais faire du vert ?

E : **Euh... avec du... jaune** (*en montrant le tube de jaune avec le doigt*) ?

M : Exact ! Avec du jaune, vas-y rajoute du jaune.

E : (*Appuie sur le tube de jaune*)

M : Super ! Regarde le pot, il est devenu de quelle couleur ?

E : **Vert** (*montre le pot à mélanges*).

M : Il est... un beau vert, vas-y tu peux l'utiliser

Pour revenir aux conduites déployées par la plupart des parents, celles-ci pourraient donc expliquer les résultats obtenus par les enfants les plus jeunes qui n'ont visiblement pas compris le mélange de couleurs en terme de transformation. La dimension relationnelle de cette transformation, la mise en relation des deux états du système, n'a semble-t-il pas été appréhendée au moment de l'activité sur le support informatique dans l'exposition.

Pour les enfants plus âgés, de la tranche 5/6 ans, les conduites des parents n'ont pas été différentes. À titre d'exemple, voici un extrait de l'échange ayant eu lieu entre Mathilde (5 ans) et son père. Celui-ci s'attache particulièrement à l'aspect du dessin que sa fille est en train de réaliser à l'écran de l'ordinateur.

Père (P) : Tu peux faire plusieurs... hein comme ça... plusieurs couleurs, elles seront pareilles, tu vas faire un bouquet de fleurs.

Enfant (E) : *(Reprend son dessin)*

P : Il faut la mettre un peu plus bas hein, la fleur... c'est pas grave.

E : *(Continue)*

P : Voilà, (inaudible)... trace bien les traits.

E : *(Reprend...)* J'arrive pas...

P : Mais... mais concentre-toi...

E : *(Continue)*

P : Voilà comme ça c'est bien, c'est mieux, alors maintenant tu vas faire les pétales, fais les... les petites fleurs.

E : *(S'arrête, regarde son doigt)*

P : Les petites, les petites fleurs avec...

E : ... Incompréhensible *(En montrant l'icône pour changer de feuille)*

P : Oui comme ça... non, pas du jaune, tu peux faire comme... avec le bleu vas-y continue avec les plantes.

E : *(Reprend son dessin)*

P : Non, non, non, c'est pas ça.

E : Eh il faut... *(s'arrête... Reprend, remplit l'intérieur des fleurs)*

P : Tu veux colorier ?

E : *(Ne répond pas, continue)*

P : Non, mais t'as pas besoin de colorier pour l'instant.

E : *(Arrête)*

P : Il faut faire le dessin, fais le dessin et après tu vas colorier.

E : *(Reprend)*

P : Voilà... faut soigner ça mieux que ça Mathilde...

Malgré tout, les enfants plus âgés ont majoritairement réussi à produire un mélange dans le contexte de l'expérience réelle. Notre hypothèse est que l'activité de simulation a réactivé chez ces enfants des connaissances acquises antérieurement et dont l'enfant n'avait pas nécessairement conscience.

## 5. Conclusion

Au cours de cette recherche nous sommes partis d'un cas particulier de simulateur dans une exposition scientifique pour jeunes enfants. Notre objectif était de déterminer si l'utilisation de ce simulateur, dans les conditions d'une visite, permettait à ces enfants d'acquérir des connaissances sur le monde physique. Les deux études menées successivement nous ont permis d'établir un certain nombre de faits. En dessous d'un âge palier, que nous avons identifié aux environs de 4 ans, les enfants observés ne mettent pas en relation la simulation avec le monde des

objets physiques. Au-delà, et jusqu'aux alentours de 5 ans, le rôle de l'adulte apparaît comme déterminant et le bénéfice au plan cognitif de l'utilisation du simulateur va se réaliser selon le discours plus ou moins conceptualisant associé à la manipulation. Après 5 ans, l'utilisation du simulateur semble bénéfique, quel que soit ce discours, notre hypothèse étant qu'elle ne fait que réactiver et formaliser des connaissances déjà acquises mais non nécessairement conscientisées par l'enfant. Bien sûr cette conclusion est à prendre avec toute la prudence qui convient.

Concernant le recours aux simulateurs dans les expositions scientifiques, il semble qu'il soit pertinent dans la mesure où leur prise en main est facilitée, tant au niveau de leur utilisation matérielle qu'au niveau des concepts scientifiques qu'ils véhiculent. Nous avons vu en effet que les parents visiteurs pouvaient rapidement consacrer leur énergie à gérer des aspects liés au fonctionnement de l'outil de simulation. Si dans une situation de classe l'enseignant connaît parfaitement le dispositif qu'il va mettre en place auprès des élèves, et se trouve donc en principe à l'abri d'éventuelles difficultés liées à son fonctionnement, ce n'est pas le cas dans une exposition où les parents découvrent le dispositif en même temps que les enfants. Par ailleurs, comme l'ont montré différents travaux déjà cités (Piani & Weil-Barais, 1998; Ailincai *et al.*, 2005), nous avons constaté que, dans le contexte d'une exposition scientifique, les parents ont des conduites peu favorables en terme de transmission des connaissances. Les enfants qui ont bénéficié de la médiation d'un professionnel s'avèrent plus performants que ceux qui ont été accompagnés par un parent. Cette différence plaide en faveur de la nécessité d'une aide explicite, visuelle ou sonore, accompagnant la manipulation du simulateur. On peut supposer que ce type d'aide pourrait permettre aux parents de se dégager des aspects matériels pour pouvoir tenir un discours davantage conceptualisant, plus propice à l'appropriation des connaissances. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- ABROUGUI M. & CLÉMENT P. (1996). Évolution des conceptions d'élèves de dix ans sur la génétique à la suite d'activités scolaires incluant une visite scolaire à la *Cité des enfants*. *Didaskalia*, n° 8, p. 33-60.
- AILINCAI R., CAILLOT M. & WEIL-BARAIS A. (2005). De l'étude des interactions parents/enfants dans un contexte muséal scientifique à une proposition d'intervention innovante auprès des parents. *Actes des quatrièmes rencontres de l'ARDIST*, Lyon, octobre 2005. Lyon : INRP, p. 5-12.
- ALLARD M. (1993). Le musée comme lieu d'apprentissage. *Vie pédagogique*, n° 84, p. 41-43.
- BRUNER J.S. (2002). *Le développement de l'enfant. Savoir faire, savoir dire*. Paris : PUF.



- CHARPAK G. (1998). *La main à la pâte : Les sciences à l'école primaire*. Paris : Flammarion.
- COHEN C. (2001). *Quand l'enfant devient visiteur : une nouvelle approche d'un partenariat école/musée*. Paris : L'Harmattan.
- COQUIDÉ-CANTOR M. & GIORDAN A. (1997). *L'enseignement scientifique à l'école maternelle*. Nice : Z'éditions.
- DELACÔTE G. (1997). *Savoir apprendre*. Paris : Odile Jacob.
- DELOACHE J.S. (1987). Rapid change in the symbolic functioning of very young children. *Science*, n° 238, p. 1556-1557.
- DELOACHE J.S. (1995). Early understanding and use of symbols. *Current Directions in Psychological Science*, n° 4, p. 109-113.
- FORTIN-DEBART C. (2004). *Le partenariat école musée pour une éducation relative à l'environnement*. Paris : L'Harmattan.
- FRANCE : MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA RECHERCHE : DÉPARTEMENT ÉVALUATION ET PROSPECTIVE (2005). *Les visiteurs de la Cité des sciences et de l'industrie. Synthèse des études réalisées de 1986 à 2004*. Paris : Cité des sciences et de l'industrie.
- GIORDAN A. (1998). *Apprendre !* Paris : Belin.
- GIRAULT Y. (Éd.) (2000). *Prise en compte des intérêts des élèves dans le cadre de l'appropriation des savoirs scientifiques dans les espaces muséaux*. Rapport de recherche. Comité national de coordination de la recherche en éducation, 316 pages.
- GIRAULT Y. (Éd.) (2003). *L'accueil des publics scolaires dans les muséums : aquariums, jardins botaniques, parcs zoologiques*. Paris : L'Harmattan.
- GUICHARD J. (1987). Modèles et simulation en situation muséologique pour les enfants. In A. Giordan & J.-L. Martinand (éd.). *Modèles et simulation*. Actes des neuvièmes journées internationales sur l'éducation scientifique, Chamonix, février 1987. Paris : université Denis-Diderot-Paris 7, p. 493-498.
- GUICHARD J. (1999). Fruits d'un partenariat école-musées, des expositions pour participer à la formation scientifique des élèves. *Aster*, n° 29, p. 131-145.
- GUICHARD J. & GUICHARD F. (1997). Des objets muséologiques pour aider à traiter des obstacles en sciences et techniques. *Aster*, n° 24, p. 113-139.
- GUICHARD J. & MARTINAND J.-L. (2000). *Médiatique des sciences*. Paris : PUF.
- GUICHARD J., LECHAUDEL A. & MANGEOT N. (2004). L'expérimentation directe à l'heure du multimédia. *La lettre de l'OCIM*, n° 91, p. 4-10.

- JAMET F. (2002). La construction des représentations des connaissances scientifiques. In D. Legros & J. Crinon (Éd.). *Psychologie des apprentissages et multimédias*. Paris : Armand Colin, p. 154-168.
- NOÉ F. (2003) La prise en compte du jeune public dans les musées de sciences naturelles. In Y. Girault (Éd.). *L'accueil des publics scolaires dans les muséums : aquariums, jardins botaniques, parcs zoologiques*. Paris : L'Harmattan, p. 227-256.
- NONNON P. (1998). Intégration du réel et du virtuel en sciences expérimentales. In F.-M. Blondel & M. Schwob (Éd.). *Actes des huitièmes journées informatique et pédagogie des sciences physiques*, Montpellier, mars 1998. Paris : INRP, p. 133-138.
- PERRIAULT J. (2002). *Éducation et nouvelles technologies*. Théorie et pratiques. Paris : Nathan.
- PIANI J. & WEIL-BARAIS A. (1998). Comment les parents accompagnent-ils leurs enfants dans la découverte des sciences et des techniques dans un musée ? In A. Dumas Carré & A. Weil-Barais (Éd.). *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Berne : Peter Lang, p. 251-267.
- ROYON C., HARDY M. & CHRÉTIENNOT C. (1999). Quatre jeudis à la Villette : construire en partenariat une pédagogie de la réussite. *Aster*, n°29, p. 171-202.
- SMYRNAIOU Z. (2003). *Modélisation : l'apport des logiciels éducatifs*. Thèse de doctorat, université René-Descartes-Paris 5, Paris.
- SMYRNAIOU Z., FERRET S. & WEIL-BARAIS A. (2003). L'enseignement scientifique ne peut-il être que virtuel ? *Actes du colloque organisé par le CIRCUISEF « Les technologies de l'information et de la communication : mutations dans la formation scientifique universitaire »*, Dakar, mars 2003. Disponible sur Internet : <http://www.dmi.usherb.ca/ciruisef/Dakar2003> (consulté le 19 octobre 2006).
- VAN-PRAËT M. (1988). De la galerie de zoologie à la galerie de l'évolution, vers un musée du quatrième type. In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éd.). *Communication, éducation et culture scientifiques et industrielle*. Actes des dixièmes journées internationales sur l'éducation scientifique, Chamonix, 1988. Paris : université Denis-Diderot-Paris 7, p. 395-399.
- VIVET M. (2000). Des robots pour apprendre. *Sciences et techniques éducatives*, vol. 7, n°1, p. 17-60.

# Simuler un phénomène biologique

## *Cas de la flexion-extension du bras*

**Berktan Bodur**, UMR STEF (ENS Cachan, INRP) ;  
berktan.bodur@stef.ens-cachan.fr

**Jack Guichard**, Palais de la découverte ; UMR STEF (ENS Cachan, INRP) ;  
jack.guichard@palais-decouverte.fr

---

***L'étude de nombreux phénomènes biologiques, en particulier ceux qui concernent le fonctionnement du corps humain, est difficilement réalisable par un recours à l'expérimentation directe. Il est souvent nécessaire de passer par des modélisations. Le multimédia peut permettre de créer des objets virtuels schématiques ou réalistes simulant le phénomène étudié. C'est le cas du positionnement et du rôle des muscles intervenant dans le mouvement de flexion-extension du bras chez l'homme.***

***Cette recherche a consisté à élaborer des simulations utilisant des supports visuels différents (dessin, schéma et photo animée) et à les tester auprès d'élèves de cycle 3 de plusieurs écoles élémentaires de Paris (élèves de 8-10 ans). Elle a permis de repérer les types de simulations les plus favorables à la compréhension du phénomène et à sa mémorisation à moyen terme.***

L'étude du corps humain et de son fonctionnement interne présente des difficultés pour une expérimentation directe et en conséquence, l'approche constructiviste par expérimentation sur le réel est souvent difficile à mettre en œuvre. Par ailleurs, on connaît les limites d'un enseignement frontal, ce que nous avons également vérifié en étudiant, un an après enseignement, les conceptions des élèves à propos du mouvement du bras chez l'homme. Nous avons posé aux élèves de cycle 3 (8 à 10 ans), dans le cadre de leur programme scolaire, la question suivante : « *Qu'est-ce qui se passe dans mon bras lorsque je le plie ?* ». Les réponses recueillies mettent en lumière un manque de compréhension du mode de fonctionnement pour le mouvement du bras.

Nous avons en particulier identifié une difficulté récurrente chez les apprenants qui ne positionnent pas le point d'attache des muscles de façon fonctionnelle. Pour qu'une articulation soit fonctionnelle, il faut la présence de certains éléments (os,

muscles, articulation) et un point d'attache des muscles qui permette de réaliser ces mouvements (cf. 2.1).

Ces résultats nous ont conduit à chercher des supports pédagogiques différents et, en particulier, le recours à ce que nous appellerons ici un modèle matériel. Traditionnellement à l'école primaire, ce modèle est basé sur une maquette (morceaux de cartons et ficelles) qui permet aux élèves de mettre en évidence les principes qui rendent l'articulation fonctionnelle. L'utilisation de cet outil nécessite ensuite une confrontation au réel (cuisse de lapin ou de poulet avec squelette et muscles en place). Nous nous sommes appuyés sur l'intérêt et les limites de ce protocole pédagogique pour concevoir et réaliser une simulation sur ordinateur à partir de différents types d'images, en particulier des photos du réel dont on pouvait manipuler les éléments (choisir les points d'attache des muscles et tester leur efficacité).

La confrontation au réel par la conception et la mise en fonctionnement technique d'un modèle matériel a mis en évidence une amélioration de la compréhension (Guichard, 1998). Pourtant ce recours au modèle présente des limites, car les élèves ne l'associent pas forcément à la réalité biologique. La recherche que nous présentons dans cet article vise à étudier l'utilisation d'une simulation sur ordinateur et les limites du recours au modèle matériel.

## **I. Quand l'expérimentation directe doit être remplacée par la simulation dans une situation d'apprentissage**

### ***1.1. La simulation informatique comme aide didactique***

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont bousculé la vie scolaire. Il est désormais possible de réaliser une multitude d'activités *via* des supports numériques. Les avantages sont multiples : l'attractivité, le déclenchement de la curiosité, le gain de temps, l'interactivité (Guichard & Martinand, 2000). En biologie, on trouve, essentiellement pour le secondaire, des logiciels d'*expérimentation assistée par ordinateur* (ExAO) qui simulent des expériences en permettant de modifier des paramètres. Pour le primaire, il existe dans ce domaine des *cd-roms* documentaires.

Les recherches réalisées sur les environnements interactifs d'apprentissage suggèrent qu'un dispositif technique peut aider par ses ressources l'apprenant à progresser (Baron & Bruillard, 1996). L'outil multimédia offre aussi la possibilité d'appréhender la dimension dynamique des phénomènes scientifiques (Legros & Crinon, 2002). Cette dernière s'avère importante pour les phénomènes biologiques. Dans notre recherche, nous avons ainsi utilisé un outil multimédia pour prendre en compte cette dimension dynamique.

La recherche en didactique s'intéresse, entre autres, à tous types d'utilisation de l'ordinateur comme outil de simulation. La décision d'utiliser ces outils dans des situations d'apprentissage est un véritable choix d'enseignement. Orange (1992) précise que les simulations peuvent être de véritables aides pour l'enseignant afin d'atteindre les objectifs d'apprentissage, tout en limitant le travail de l'élève aux tâches directement liées aux apprentissages visés.

Toutes ces qualités semblent être suffisantes pour promouvoir l'utilisation de ces technologies dans les activités scolaires. Une étude montre toutefois que l'utilisation massive des nouvelles technologies ne permet pas directement la compréhension des disciplines concernées (Linard, 1996). Les TIC peuvent accompagner, au plus près, l'acte d'enseignement, mais elles ne peuvent pas l'assurer à elles seules. Bien entendu, il existe plusieurs modèles d'enseignement et de conception d'environnements informatiques. Pour notre étude, nous avons sélectionné un modèle centré sur l'élève, celui-ci étant en situation d'acteur principal, gérant lui-même son activité d'apprentissage.

Ce modèle confronte l'élève à une situation problème (Fabre, 1999) avec formulation des hypothèses, la recherche et l'analyse d'informations. Ses connaissances antérieures jouent un rôle primordial. La simulation informatique, à travers la manipulation du modèle, permettrait une appropriation de celui-ci par l'élève. La simulation met l'élève en situation de recherche et lui permet de mener une démarche synthétisante (Dupont, 1992). Elle semble particulièrement adaptée quand le recours à l'expérimentation directe n'est pas possible.

### **1.2. Difficulté d'expérimentation sur le corps**

Le recours à l'observation, et en particulier à l'expérimentation du réel, favorise la compréhension des phénomènes biologiques à tous les niveaux d'enseignement (Guichard, 1998). En France, l'enseignement des sciences est principalement fondé sur l'investigation scientifique. Ainsi, la démarche préconisée par *La main à la pâte*<sup>®</sup> privilégie la construction des connaissances par l'exploration, l'expérimentation et la discussion. Les élèves observent un objet ou un phénomène du monde réel, proche et sensible, et expérimentent sur lui (Académie des sciences, INRP & MEN, 2000).

L'expérimentation directe sur des objets réels n'est pas toujours possible en classe, surtout lorsqu'il s'agit d'êtres vivants, en raison des contraintes éthiques et pratiques (Coquidé, 2000). De plus, certains phénomènes biologiques sont impossibles à reproduire en classe. D'autres problèmes didactiques sont spécifiques aux activités expérimentales en biologie (*ibid.*), comme ceux liés à la complexité, à la diversité, à la variabilité du vivant et à l'irréversibilité des phénomènes. Il faut ajouter à tout cela les coûts matériels ou le temps passé pour préparer certains dispositifs. Il faut également mentionner un point essentiel : la résistance du réel, parfois difficilement conceptualisable ou modélisable (Coquidé et al., 1999).

Pourtant, de nombreuses études ont montré l'intérêt de la modélisation dans l'éducation scientifique.

### **1.3. Prise en compte des conceptions et des difficultés des élèves**

Le concept de représentation a été l'objet de nombreuses recherches en didactique depuis les années 1970. Il désigne les conceptions connues d'un sujet, déjà présentes au moment de l'enseignement et susceptibles d'influencer l'apprentissage (Astolfi *et al.*, 1997). L'intérêt de connaître les représentations initiales des apprenants dans les situations d'apprentissage a été démontré à plusieurs reprises (Giordan & De Vecchi, 1987 ; De Vecchi & Giordan, 1989 ; Astolfi & Peterfalvi, 1993 ; Giordan, Girault & Clément, 1994).

Par conséquent, ne pas prendre en compte ces conceptions dans les cours de sciences de la vie ou de biologie gêne l'intégration de nouveaux savoirs, notamment en ce qui concerne le corps humain. Il semble donc nécessaire d'intégrer au préalable les conceptions des élèves puis de trouver ensuite les situations pédagogiques qui permettront de les réorganiser, voire de les modifier vers un système explicatif en conformité avec les savoirs enseignés.

### **1.4. Utilisation des modèles dans l'enseignement scientifique**

Lorsque l'observation seule de l'objet réel n'est pas suffisante, l'utilisation de modèles en lien avec ces objets réels s'impose. Ce genre d'activité trouve sa place aussi bien dans les sciences physiques que dans les sciences du vivant. Les démarches de modélisation dans les activités scientifiques à l'école ont un rôle majeur et elles peuvent être introduites lors des activités d'interprétation de certains phénomènes, dès l'école élémentaire (Rumelhard, 1988).

Un modèle peut être représenté par un objet matériel comme une maquette, un schéma simplificateur sous forme d'image réaliste ou encore une analogie avec ou sans figuration. Un modèle peut utiliser des images, mais il peut aussi être, en même temps, image et schéma (en fonction de l'acceptation que l'on fait du terme modèle). Les simulations sont également des modélisations qui tendent à faciliter la compréhension de certains phénomènes ou concepts (Martinand *et al.*, 1992).

Pour éviter les éventuelles confusions entre la réalité étudiée et une de ses représentations, il faut envisager d'utiliser plusieurs modèles alternatifs d'une même réalité (Martinand *et al.*, 1992). Partant de là, nous avons choisi, dans notre étude, d'utiliser différents support pour le même modèle : dans un cas, une maquette du bras réalisée avec des morceaux de cartons et de ficelles (Guichard, 1997) ; dans l'autre, avec des simulations informatiques utilisant différentes formes de visualisation. En effet, le rapport des élèves à l'image et aux différents types d'images scientifiques est un paramètre important à prendre en compte, ce que nous allons voir dans le paragraphe suivant.

### **1.5. Intérêt et difficultés du recours à l'image**

Nous vivons actuellement dans une civilisation de l'image et cela nous conduit à être en interactivité permanente avec différents types d'images dans la vie de tous les jours. Hebuterne-Poinssac (2000) parle de l'image comme « *éducatrice* » dans le sens où elle émerge dans l'univers de l'éducation et de la formation. Les images sont également un support central dans l'enseignement de la biologie. Elles peuvent être utilisées pour modéliser ou simuler un phénomène dans le but d'explorer ou faire comprendre la complexité du monde réel qui nous entoure (Mottet, 1996). Ainsi ses fonctions dans l'enseignement sont nombreuses : susciter l'intérêt, illustrer, apporter un témoignage, présenter une notion, observer, s'exprimer, lancer un débat, faciliter la mémorisation, comparer, récapituler (Mottet, 1995). Toutes les images mises en œuvre dans l'enseignement n'ont pas le même pouvoir explicatif ni la même vocation.

Moles (1981) propose une échelle d'iconicité composée de treize niveaux (un niveau 0 et douze niveaux classés de 1 à 12). Le premier (l'objet lui-même) et le dernier (la description en mots normalisés ou en formules algébriques) sont d'iconicité nulle. Les différentes images peuvent être situées sur cette échelle selon leur degré d'abstraction. Ainsi, si l'on prend comme référence ces différents degrés, une image photographique, proche de l'objet réel sera peut-être moins abstraite et plus compréhensible qu'un schéma figuratif. Dans notre étude, nous nous sommes attachés à vérifier cette hypothèse en utilisant plusieurs types d'images illustrant le phénomène biologique étudié.

## **2. Une démarche d'élaboration d'une simulation pour comprendre le mouvement du bras**

### **2.1. Les muscles dans le programme du cycle 3**

Les mouvements corporels, comme le fonctionnement des articulations et des muscles, trouvent leur place dans les programmes de 2002 de *sciences et technologie* en école primaire. Les élèves doivent construire la notion d'unité de fonctionnement du monde vivant en référence à leur propre corps. Les programmes précisent que l'étude du corps humain doit être effectuée en s'appuyant sur une activité, en *éducation physique et sportive* par exemple, et les enseignants doivent s'en tenir à dégager des modèles simplifiés des organes assurant diverses fonctions.

D'après ces documents officiels, l'élève doit acquérir des compétences spécifiques, comme « *être capable de distinguer la combinaison des mouvements élémentaires (flexions et extensions) qui permet la marche, la course, le saut... Être capable d'établir des relations par comparaison avec l'observation de pattes d'animaux... Être capable de concevoir et construire un modèle matériel très simple rendant compte de façon approchée du rôle des muscles antagonistes dans le mouvement d'une articulation.*

*Elle passe par la mise en place d'activités qui permettent aux élèves de remettre en cause leurs conceptions en se construisant une vision fonctionnelle du mouvement » (France : MEN, 2002). Une modélisation simple est suggérée, en référence à l'exploitation de documents radiographiques ou multimédias. Le niveau de formulation pour le cycle 3 est précisé comme suit : le moindre mouvement nécessite le fonctionnement simultané d'un ensemble d'éléments tels le squelette, les articulations et les muscles. On arrive à se mouvoir grâce aux articulations qui se trouvent entre les os. Elles sont les points de jonction entre les éléments du squelette et permettent des mouvements variés. Par exemple, l'articulation du coude, en forme de charnière, permet de bouger le bras dans un plan. Les muscles sont attachés aux os par les tendons de part et d'autre des articulations. Ils se raccourcissent quand ils se contractent, ce qui permet aux os de se mouvoir, l'axe de rotation étant constitué par l'articulation. On trouve deux principaux types de muscles. Les muscles fléchisseurs rapprochent les segments, tandis que les extenseurs les éloignent. Lors de la flexion du membre supérieur, le biceps se contracte, il se raccourcit et tire sur l'avant-bras, faisant pivoter les os autour de l'articulation du coude ; en même temps, le muscle antagoniste, le triceps, se relâche. Lors de l'extension du membre supérieur, c'est l'inverse qui se produit : le triceps est contracté et il est attaché à l'extrémité du cubitus, sur laquelle il tire pour tendre le bras. Le biceps est relâché pendant ce temps. La position des points d'attache de ces deux muscles détermine donc le bon fonctionnement de l'articulation du coude et le mouvement du bras (Hébrard, 1999).*

## **2.2. Un préalable pour la mise au point d'une situation d'apprentissage**

La recherche des difficultés rencontrées par les élèves dans une situation d'apprentissage permet de centrer les activités proposées sur ces difficultés. Les conceptions des élèves analysées avant l'activité constituent un matériau fondamental. Ainsi, nous avons recherché les conceptions relatives aux points d'attache des muscles du bras. Nous avons réalisé des entretiens auprès de 145 élèves de cycle 3 (8 à 10 ans) de quatre écoles parisiennes et mis en évidence un grand nombre de difficultés, pouvant être regroupées en six conceptions principales (tableau I). Elles sont illustrées en annexe I.

**Tableau I. Conceptions principales du membre supérieur**

<b>Conception</b>	<b>Description</b>	<b>Fréquence</b>
1	Plusieurs petits os avec petits muscles non attachés	10 %
2	2 os longs avec 1 ou 2 muscle(s) attaché(s) par segment	25 %
3	2 os longs avec 2 muscles attachés de part et d'autre de l'articulation	3 %
4	Membre rempli de muscles (sans os)	22 %
5	2 os longs avec 2 longs muscles non attachés	18 %
6	2 os longs avec 2 muscles non attachés à un seul segment	15 %
Autres	Différents autres types de représentations	7 %



L'analyse de ces conceptions montre que 25 % des élèves dessinent deux séries d'os long et un muscle attaché au même segment. Pour 22 % des élèves, on trouve un bras rempli de muscle sans indication des os.

Au total, 65 % des élèves interrogés n'attachent pas les muscles aux os. Pour presque tous les élèves (97 %), la difficulté est liée aux points d'attache du biceps et encore plus du triceps. En situant ce point au dessus de l'articulation du coude, celle-ci n'est pas fonctionnelle.

Il nous a donc semblé nécessaire d'aider les apprenants à comprendre ce phénomène biologique – flexion, extension du bras – par différents moyens : matériel et/ou virtuel.

### **2.3. L'intérêt et les limites d'un modèle matériel**

Les documents d'application du programme du cycle suggèrent une modélisation très simple afin de rendre les élèves aptes à concevoir et à construire un modèle matériel rendant compte, de façon approchée, du rôle des muscles antagonistes dans le mouvement d'une articulation. Ce modèle matériel classique, proposé depuis une quinzaine d'années dans les activités de classe en primaire, est une maquette qui utilise des objets concrets pour simuler le mouvement du bras. Les os sont remplacés par deux morceaux de carton découpés. Deux ficelles rouges représentent les muscles responsables de ces mouvements du bras. Les attaches parisiennes permettent d'attacher les deux os entre eux en les articulant. Une fois les éléments de la maquette mis en place, les élèves essaient de la faire bouger en tirant sur les ficelles. On commence par le muscle fléchisseur (biceps). Une fois la solution trouvée, on enchaîne avec le muscle extenseur (triceps).

Les élèves émettent dans un premier temps des hypothèses. Ils les testent une par une à l'aide du modèle matériel. Ils confrontent leurs conceptions initiales à la réalité par une expérimentation. Les limites constatées, à la fois sur les enfants et les adultes (Guichard & Guichard, 1997), ont conduit à nous concentrer sur le point d'attache des muscles, et à essayer ensuite de rechercher et/ou de proposer des activités.

Les enseignants qui utilisent ce modèle ont repéré depuis longtemps ses limites. En effet, d'un point de vue technique, les élèves comprennent où attacher les ficelles sur la maquette pour obtenir le mouvement. Pourtant, ils ne parviennent pas à transposer ce principe technique à la réalité biologique. Comme les documents d'accompagnement des programmes officiels le préconisent, certains enseignants font observer et manipuler une aile de poulet ou une cuisse de lapin pour dépasser cette difficulté. Ce rapport au réel biologique s'est donc avéré nécessaire suite à l'utilisation du modèle matériel.

Notre étude a consisté, dans un premier temps, à étudier l'impact de l'utilisation du modèle matériel seul (carton-ficelle) auprès d'élèves du cycle 3. À la fin de la

séquence, on leur demande de compléter un schéma sur lequel les os du bras sont dessinés. Les élèves doivent accrocher le muscle fléchisseur au bon endroit. Seuls 73 % des élèves parviennent à compléter correctement ces schémas, alors qu'une tâche identique à partir du schéma technique correspondant (schéma avec représentation des cartons et ficelles) ne leur pose pas de difficulté. Quant à la mémorisation à moyen terme (six mois après), seuls 56 % des élèves retiennent la position des points d'attache du muscle fléchisseur permettant le mouvement du bras.

#### 2.4. Les étapes de la conception d'une simulation informatique

Pour des raisons pratiques un certain nombre d'enseignants sont réticents à l'utilisation d'un modèle matériel suivie de l'observation d'une patte de poulet ou de lapin. Ce constat nous a amené à nous poser la question suivante : est-il possible de remplacer cette activité par une simulation informatique correspondant à une modélisation du bras sur écran ?

Nous avons confié à Pascal Jablonka, de l'IUFM de Paris, la réalisation d'un logiciel utilisant trois types d'images et proposant une activité par essais successifs, s'appuyant sur les erreurs de 97 % des élèves, donc centrée sur les points d'attache des deux muscles du bras : biceps et triceps. Ce logiciel permet, par ailleurs, de repérer et d'enregistrer tous les essais des élèves.

Étant données les difficultés de compréhension des schémas par les élèves et la nécessité d'une référence au réel biologique pour comprendre le mouvement du bras, nous avons décidé de tester plusieurs types d'images.

La première simulation (document 1) met en image un schéma dépouillé, mais directement compréhensible par l'élève, de l'ensemble squelette-muscle.

#### Document 1. Écran du logiciel avec schéma scientifique



**Document 2. Écran du logiciel avec photos animées du réel**



La seconde animation permet d'utiliser une potentialité spécifique du multimédia : la possibilité d'agir directement sur une image du vivant. Le logiciel (document 2) présente une photographie d'un ensemble os-muscle d'un animal (poulet) sur laquelle les élèves ont la possibilité de positionner eux-mêmes les points d'attache des muscles (biceps et triceps) et de tester si cela fonctionne. Notre hypothèse est que cette modélisation sur écran permet de remplacer, en une seule activité, à la fois l'activité sur le modèle matériel et l'observation directe d'une aile de poulet.

Afin que notre recherche permette une comparaison plus rigoureuse entre l'utilisation d'un objet matériel (carton-ficelle) et celle de sa représentation sur écran, nous avons fait développer une autre version simulant sur écran un modèle carton-ficelle (document 3).

Pour résumer et faciliter la lecture des graphiques, le tableau 2 synthétise les informations apportées par les trois versions des logiciels proposés aux élèves, associés avec le type d'images à manipuler.

**Tableau 2. Tableau comparatif des différents logiciels**

Version du logiciel	Type d'images à manipuler sur écran
Logiciel 1	<i>images des morceaux de cartons</i> (comme le modèle matériel mécanique)
Logiciel 2	<i>schéma scientifique</i> (figure schématique du bras avec les os, les muscles et les tendons)
Logiciel 3	<i>images transformées</i> (photos animées d'un membre postérieur de poulet)

### Document 3. Écran du logiciel avec images des morceaux de cartons



### 3. Une simulation informatique permet-elle de comprendre ?

#### 3.1. Méthode utilisée

Le cadre général de la méthode est le suivant :

- l'élaboration du logiciel ;
- manipulation du logiciel par les élèves en 3 phases :
  - 1 – Entretien semi-directif d'ordre général sur la relation qu'ont les élèves avec l'outil informatique.
  - 2 – Manipulation du logiciel par l'élève avec observation.
  - 3 – Évaluation de la compréhension immédiate par entretien semi-directif.
- entretiens à moyen terme de mémorisation semi-directifs.

Au total, nous avons mené des entretiens semi-directifs auprès de 225 élèves de cycle 3.

L'élaboration du logiciel s'est déroulée en trois étapes. La première consistait à concevoir des simulations avec différents types d'images. Ensuite nous avons procédé aux tests de ces versions auprès des élèves afin d'évaluer le logiciel du point de vue de la compréhension des consignes et de l'ergonomie. La dernière étape était la conception finale du dispositif multimédia en trois versions, suivie d'un dernier test auprès des élèves. Une fois les différentes versions du logiciel

achevées, nous avons commencé à utiliser les simulations informatiques dans les situations d'enseignement.

Nous avons mené notre étude dans trois écoles parisiennes<sup>1</sup> dont 2 classes de CE2 (34 élèves), 4 classes de CMI (90 élèves) et 5 classes de CM2 (101 élèves).

Avant notre expérimentation, les élèves n'avaient pas encore étudié ce sujet en classe. L'utilisation du logiciel était censée remplacer une séquence d'enseignement. Afin de pouvoir faire une analyse rigoureuse de l'impact sur les élèves, la manipulation du logiciel a été effectuée en dehors de la classe, les élèves sortant individuellement des cours pour venir en salle informatique.

Pendant toute la durée des expérimentations en situation d'enseignement, le logiciel enregistre le temps d'utilisation et les erreurs commises. Les gestes et les modes d'utilisation de l'interface ont été observés à l'aide d'une grille adaptée. Lors de la réalisation de la tâche proposée, les élèves sont totalement autonomes devant l'ordinateur. La consigne initiale affichée est : « *Que se passe-t-il dans le bras lorsqu'on le plie ?* » (Voir annexe 2 pour la totalité des consignes utilisées).

### **3.2. Simulations informatiques : impact sur la compréhension du phénomène**

En ce qui concerne les simulations informatiques, nous avons effectué des évaluations de compréhension immédiatement après l'utilisation du logiciel par les élèves. Cette évaluation consistait à demander oralement aux élèves de choisir entre 6 schémas (sous forme d'images imprimées, annexe 1), d'expliquer la place et les points d'attache des muscles et de nous expliquer le phénomène comme ils l'avaient compris. Nous indiquons ici les résultats concernant 3 critères : les points d'attache sur les os, la position du biceps (position B) et celle du triceps (position T). Les pourcentages correspondent aux réponses exactes données dans l'ensemble des groupes d'élèves étudiés. La compréhension immédiate correspond aux résultats des tests de connaissance réalisés juste après l'activité.

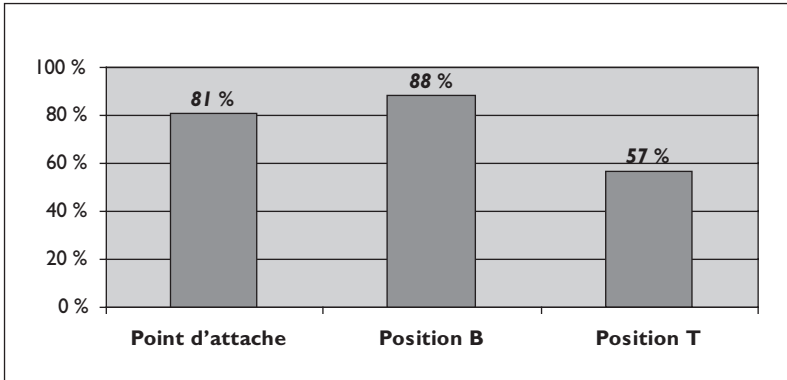
#### **• Simulation informatique du modèle matériel (Logiciel 1)**

La version représentant le modèle matérialisé (carton-ficelle) sur écran, présentée sur le document 3, est appelée V1. Les deux muscles sont représentés par des poulies. Une fois le muscle en bonne position, il suffit de cliquer pour vérifier si cette position permet de plier le bras. La graphique 1 indique les résultats obtenus par les élèves avec le logiciel 1 (42 élèves).

---

<sup>1</sup> Nous remercions les élèves, les enseignants et les directeurs des écoles Michel-Ange, Paris XVI<sup>e</sup> arr ; Bolivar, Paris XIX<sup>e</sup> arr et Alouettes, Paris XIX<sup>e</sup> arr.

**Graphique 1. Simulation informatique du modèle matériel (V1)  
(compréhension immédiate)**

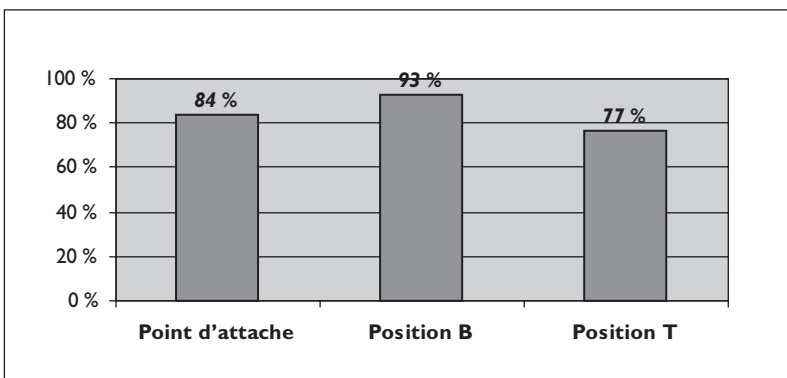


La notion d'attache, c'est-à-dire le fait que les muscles sont attachés aux os pour pouvoir permettre le mouvement, a été comprise correctement par 81 % des élèves interrogés après l'utilisation du logiciel V1. Par contre, nous avons trouvé une différence notable entre le positionnement du muscle fléchisseur (biceps) et celui du muscle extenseur (triceps). Seulement 57 % des réponses sont exactes pour le triceps, contre 88 % pour le biceps. La position du muscle extenseur pose davantage de problème pour les apprenants, probablement à cause de la dissymétrie de l'articulation du coude.

• **Simulation informatique avec un schéma scientifique animé (Logiciel 2)**

Par rapport à la première version du logiciel, la deuxième simulation (V2), utilisant un schéma scientifique animé de l'articulation du coude (document 1), améliore les résultats des élèves. La graphique 2 indique les résultats obtenus par les élèves avec le logiciel 2 (45 élèves).

**Graphique 2. Simulation informatique avec un schéma scientifique animé (V2) (compréhension immédiate)**

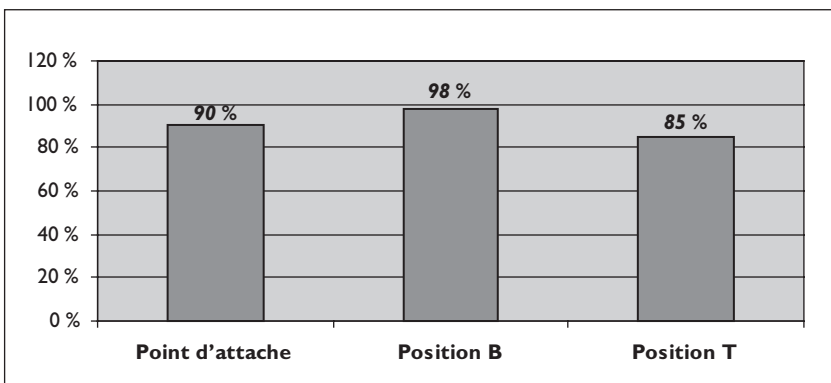


Les points d'attache sont bien positionnés dans 84 % des réponses. La position des deux muscles antagonistes semble être mieux perçue. La preuve est donnée par les réponses fournies pour les positions des muscles : 93 % sont exactes pour le biceps et 77 % pour le triceps. Le positionnement du triceps a été considérablement amélioré par rapport à la simulation mettant en scène le modèle matériel du coude (V1). La simulation s'appuyant sur un schéma scientifique animé manipulable (V2) est plus performante pour l'apprentissage, par les élèves, du positionnement des points d'attache.

• **Simulation informatique à partir de photos animées du réel (Logiciel 3)**

La version utilisant les photos animées du réel (V3), représentée sur le document 2, utilise des images les plus proches de la réalité biologique. La graphique 3 indique les résultats obtenus par les élèves avec le logiciel 3 (52 élèves).

**Graphique 3. Simulation informatique à partir de photos animées du réel (V3) (compréhension immédiate)**



Les réponses exactes concernant les 3 critères étudiés sont toutes plus élevées que pour les deux versions précédentes. La notion d'attache est présente dans 90 % des réponses. La position du biceps est correcte pour presque tous les élèves (98 %). Pour la position du triceps, près de 85 % des élèves répondent correctement. La confrontation avec des images plus proches de la réalité (V3) permet une meilleure compréhension, vérifiée lors de l'entretien avec les élèves.

**3.3. Complémentarité des modèles matériel et virtuel**

On peut se demander si la complémentarité de l'expérience avec un support matériel et de la simulation informatique peut renforcer les apprentissages. Dans l'affirmative, est-ce que la chronologie d'utilisation des supports d'enseignement (virtuel puis matériel, ou l'inverse) peut être à l'origine de différences d'apprentissage ?

Afin de mieux cerner l'intérêt de l'utilisation du virtuel par rapport aux techniques pédagogiques traditionnelles utilisant la maquette matérielle, nous avons

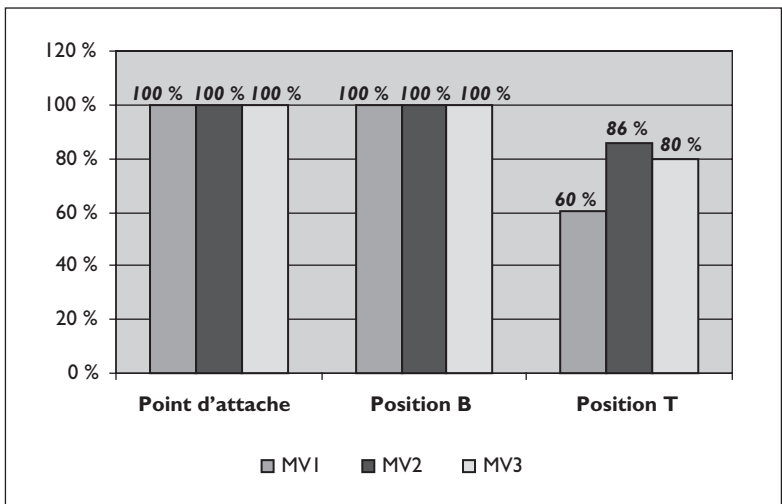
effectué avec deux autres échantillons d'élèves une double expérimentation : matérielle puis virtuelle pour un groupe (44 élèves), virtuelle puis matérielle pour l'autre groupe (42 élèves).

• **Matériel puis virtuel**

La séquence commence par la réalisation et la manipulation du modèle matériel décrit précédemment. Dès que l'apprenant trouve les bonnes positions pour les 2 muscles avec le modèle matériel, nous lui proposons de faire la même chose sur l'ordinateur. Nous avons ainsi testé les 3 versions du logiciel juste après l'usage du modèle matériel.

Les résultats de cette étude sont présentés dans la graphique 4. Les critères étudiés restent les mêmes. La lettre M indique que l'on commence par l'utilisation du modèle matériel (maquette carton), elle est suivie de V pour indiquer les simulations, V1, V2 et V3 correspondant aux descriptions du chapitre précédent.

**Graphique 4. Modèle matériel puis virtuel (compréhension immédiate)**



L'activité qui commence par la construction et l'utilisation du modèle matériel, suivie de la manipulation virtuelle via un ordinateur, montre une réussite totale pour les critères des points d'attache et de position du biceps. Le fait d'utiliser différents types d'images ne change rien aux résultats pour les 2 critères (histogramme MV1, MV2, MV3).

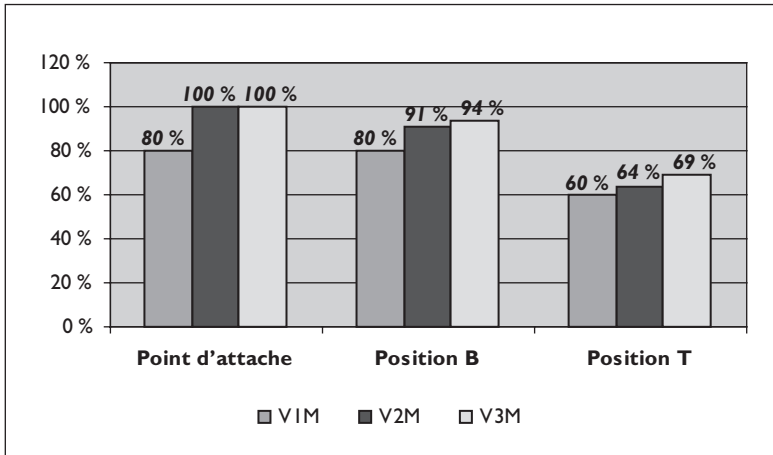
La séquence MV2 (modèle matériel, puis schéma animé) donne le meilleur résultat pour la position du triceps (exacte pour 86 % des élèves interrogés), suivie de la séquence MV3 (modèle matériel puis image animée) pour 80 % des élèves. Le schéma scientifique semble être le meilleur support pour faciliter la compréhension et la transposition de la position du muscle sur leur propre bras.



• **Virtuel puis matériel**

La même activité a été proposée à un autre groupe, mais en ordre inverse, en commençant par le virtuel. Le taux de réussite diminue considérablement, dans ce cas, pour la version 1 (V1) (graphique 5).

**Graphique 5. Virtuel puis modèle matériel (compréhension immédiate)**



L'image de la maquette carton-ficelle seule ne permet pas aux élèves de comprendre le problème biologique. L'utilisation du modèle matériel, suivie de celle des 2 autres versions du produit informatique (V2 et V3) permet une compréhension, pour tous, de la notion d'attache. En ce qui concerne la position des muscles, le triceps pose toujours davantage de problèmes que le biceps, les résultats étant moins bons que dans la séquence *matériel puis virtuel* : le résultat est similaire pour le biceps, le taux de réussite passe de 100 % pour la version 3, à 60 % pour la version 1.

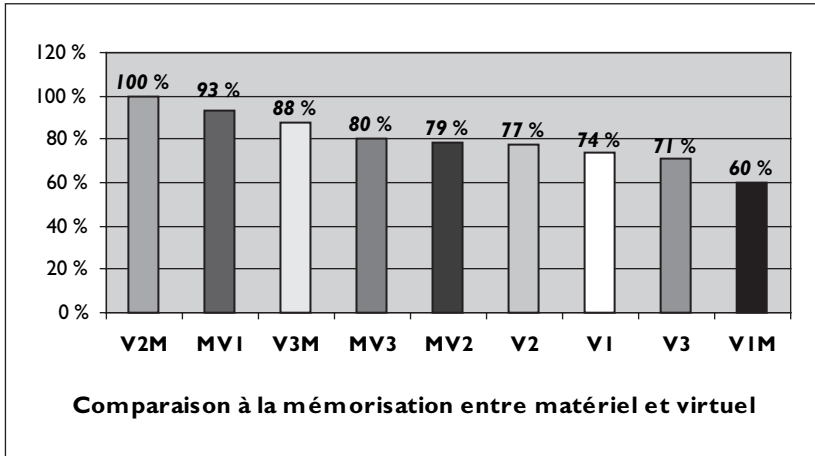
**4. Une simulation informatique permet-elle une mémorisation à plus long terme ?**

Lors d'une étude antérieure à nos propres travaux, des tests ont été effectués sur les conceptions des élèves qui avaient abordé ce sujet dans le cadre d'un cours l'année précédente. Ils ont montré une absence de mémorisation à long terme du fonctionnement de l'articulation après des séquences d'enseignement frontal de cette notion. Ces résultats ont confirmé ceux déjà obtenus par Guichard et Guichard (1997) pour la mémorisation à long terme étudiée sur les adultes.

Pour cette raison, nous avons souhaité vérifier la mémorisation à moyen terme. Un posttest réalisé sous forme d'entretiens semi-directifs a donc été effectué quatre mois après chacune de nos séquences d'apprentissage. Cette durée a été déterminée par la possibilité de retrouver facilement les élèves suivis. Dans la

graphique 6, M correspond à l'utilisation du modèle matériel, V1 à celle du logiciel 1, V2 au logiciel 2 et V3 au logiciel 3. L'ordre des lettres (M) et (V) correspond à l'ordre des séquences d'apprentissage suivies.

**Graphique 6. Comparaison de la mémorisation à 4 mois selon les différentes séquences d'apprentissage**



Les élèves comprennent et mémorisent bien (100 %) la position des points d'attache des muscles à l'aide du logiciel utilisant le schéma scientifique animé V2 suivi de la modélisation mécanique (M). Dans ce cas, on note une bonne complémentarité du matériel par rapport au virtuel seul (77 %).

Le logiciel V1, représentant les images des morceaux de carton identiques à la modélisation mécanique, utilisé suite à la réalisation de cette dernière, aide les élèves pour la mémorisation de la position des points d'attache (93 %). La ressemblance entre les images de cette simulation et celles du modèle matériel renforce l'apprentissage. Par contre, l'inverse fonctionne mal, car la visualisation sur écran d'un modèle en carton est trop décalée par rapport au système réel os-muscle-articulation comme l'indiquent les entretiens avec les élèves.

L'utilisation de la version utilisant les images numériques des vrais membres antérieurs d'un animal (V3) suivie du test matériel est une peu moins performante (88 %). L'utilisation du modèle matériel (M) suivie des simulations utilisant le schéma (V2) ou l'image du muscle (V3) ne permet pas le même taux de mémorisation. Le taux de réussite ne dépasse pas 80 %. La simulation informatique est décalée par rapport à l'expérience effectuée par les élèves sur le support matériel. Certains d'entre eux n'ont pas fait le lien entre les deux, le test ayant été fait sans que l'adulte n'indique la complémentarité des deux tests successifs.

Dans presque tous les cas, la combinaison de la simulation et d'une expérience sur un support matériel donne de meilleurs résultats que l'utilisation de la simulation

seule, résultat auquel on pouvait s'attendre, car, en règle générale, la combinaison de plusieurs approches favorise l'apprentissage.

En résumé, si nous regardons les résultats relatifs à la mémorisation, nous voyons clairement que le taux de réussite des élèves est supérieur quand on utilise le modèle matériel puis la simulation virtuelle en complément. Par contre les élèves ont davantage apprécié les séquences commençant par une simulation sur ordinateur permettant directement de comprendre le lien avec la réalité biologique étudiée (V2 et V3) : les élèves les qualifient de « *plus précises* », « *plus faciles* », « *plus d'explications* », « *rigolotes* », « *différentes* », « *déjà construites* », « *plus visibles* » ou encore « *plus pratiques* ». Ces versions du logiciel ont aussi favorisé leur mémorisation.

## 5. Conclusion

Nous avons tenté à travers cette recherche de trouver une réponse à notre question initiale : est-ce que le recours à la simulation des phénomènes biologiques du corps humain peut contribuer à la bonne compréhension et la mémorisation de ces derniers ?

Pour le phénomène étudié, le modèle matériel a montré qu'il avait des limites. Dans les faits, l'utilisation de la maquette seule n'est pas très efficace, car l'objet reste décalé et décontextualisé par rapport à l'objet biologique. Les apprenants ont du mal à faire le lien entre leur propre membre et les morceaux de cartons, sauf si un travail pédagogique complémentaire est effectué, incluant une comparaison immédiate avec l'observation d'une vraie patte de poulet ou de lapin.

Notre recherche montre que la simulation informatique seule est moins efficace pour la compréhension immédiate, ainsi que pour la mémorisation. Supprimer toute activité de manipulation des modèles mécaniques ne semble pas aider les apprenants.

En outre, nous pouvons confirmer que la complémentarité matériel-virtuel apporte, dans ce cas, une meilleure compréhension, ainsi qu'une meilleure mémorisation. Les résultats nous montrent que la simulation seule n'est pas suffisante, mais elle apporte un soutien pédagogique intéressant. Par exemple, les élèves sont très motivés par l'attrait du support multimédia comme ils le sont souvent par toute nouveauté proposée dans le cadre de l'enseignement.

En commençant par la simulation, leur curiosité apparaît plus grande et les résultats sont nettement meilleurs. La simulation aide aussi à visualiser le mouvement du bras. Il permet de pouvoir manipuler des objets sur lesquels il est difficile de conduire de réelles expérimentations en raison de questions éthiques ou pratiques, ce qui est le cas pour toute étude du corps humain au primaire et au collège. Des recherches sur d'autres sujets biologiques permettraient de mieux cerner la potentialité de cette démarche.

Au regard de notre recherche, le graphisme le plus efficace pour favoriser la compréhension des élèves est la représentation schématique des organes biologiques en jeu. Le logiciel que nous avons conçu permet d'ajouter un aspect dynamique à cette représentation et de tester les hypothèses qui correspondent aux conceptions des élèves.

Cette situation d'apprentissage utilisant une simulation associée à une modélisation par maquette matérielle montre sa pertinence pour la question étudiée. Notre recherche signale l'intérêt de la complémentarité de l'utilisation du logiciel de simulation, et d'une situation d'apprentissage qui s'appuie sur les questions des élèves à partir de la confrontation à un modèle matériel. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- ACADÉMIE DES SCIENCES, INRP & MEN (2000). *La main à la pâte et le plan de rénovation de l'enseignement des sciences et de la technologie à l'école, Guide de découverte.*
- ASTOLFI J.-P., DAROT E., GINSBURGER-VOGEL Y. & TOUSSAINT J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences : Repères, définitions, bibliographies.* Bruxelles : De Boeck.
- ASTOLFI J.-P. & PETERFALVI B. (1993). Obstacles et construction de situations didactiques en sciences expérimentales. *Aster*, n° 16, p.103-142.
- BARON G.-L. & BRUILLARD É. (1996). *L'informatique et ses usagers dans l'éducation.* Paris : PUF.
- COQUIDÉ M., BOURGEOIS-VICTOR P. & DESBEAUX-SALVIAT B. (1999). « Résistance du réel » dans les pratiques expérimentales. *Aster*, n° 28, p. 57-78.
- COQUIDÉ M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant.* Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Paris-Sud 11, Orsay. Disponible sur Internet : <http://www.stef.ens-cachan.fr/docs/coquide.pdf> (consulté le 18 septembre 2006).
- DE VECCHI G. & GIORDANA A. (1989). *L'enseignement scientifique : comment faire pour que « ça marche » ?* Nice : Z'Éditions.
- DUPONT J.-Y. (1992). Simulation, modélisation et pédagogie en biologie-géologie. In G.-L. Baron & J. Baudé (Éd.). *L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*, actes du colloque les 28-29-30 janvier 1992 au CREPS de Châtenay-Malabry. Paris : INRP-EPI, 286 pages. Disponible sur Internet : <http://www.epi.asso.fr/revue/dossiers/d12p109.htm> (consulté le 18 septembre 2006).

- FABRE M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : PUF.
- FRANCE : MINISTÈRE DE LA JEUNESSE, DE L'ÉDUCATION NATIONALE ET DE LA RECHERCHE (2002). *Document d'application des programmes, Fiches Connaissances cycle 2 et 3*. Paris : CNDP, p.19-23.
- GIORDAN A. & DEVECCHI G. (1987). *Les origines du savoir : des conceptions des apprenants aux concepts scientifiques*. Paris : Delachaux et Niestlé.
- GIORDAN A., GIRAULTY. & CLÉMENT P. (Éd.) (1994). *Conceptions et connaissances*. Berne : Peter Lang.
- GUICHARD J. (1998). *Observer pour comprendre*. Paris : Hachette.
- GUICHARD J. & GUICHARD F. (1997). Des objets muséologiques pour aider à traiter des obstacles en sciences et techniques. *Aster*, n° 24, p.113-141.
- GUICHARD J. & MARTINAND J.-L. (2000). *Médiatique des sciences*. Paris : PUF.
- HÉBRARD J. (Dir.) (1999). *Sciences et Technologie : Les savoirs de l'école, fichier pédagogique, cycle 3*. Paris : Hachette Éducation.
- HEBUTERNE-POINSSAC B. (2000). *L'image éducatrice*. Paris : PUF.
- LEGROS D. & CRINON J. (2002). *Psychologie des apprentissages et multimédia*. Paris : Armand Collin.
- MARTINAND J.-L. (dir.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation*. Paris : INRP.
- MOLES A. (1981). *L'image : communication fonctionnelle*. Paris : Casterman.
- MOTTET G. (dir.) (1995). *Volcans et tremblements de terre : Des images pour apprendre des sciences*. Paris : INRP.
- MOTTET G. (1996). Images et activités scientifiques : Réintégrer l'image. *Aster*, n° 22, p. 3-13.
- LINARD M. (1996). *Des machines et des hommes : Apprendre avec les nouvelles technologies*. Paris : L'Harmattan.
- ORANGE C. (1992). Les logiciels de simulation : Substituts du réel ou véritables aides didactiques pour l'enseignement de la biologie-géologie ? In G.-L. Baron & J. Baudé (Éd.). *L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*. Paris : INRP, p. 116-118.
- RUMELHARD G. (1988). Statut et rôle des modèles dans le travail scientifique et l'enseignement de la biologie. *Aster*, n° 7, p. 21-48.

**ANNEXE I. Les 6 conceptions principales du membre sup6rieur**

Conception 1



Conception 2



Conception 3



Conception 4



Conception 5



Conception 6



## ANNEXE 2. Consignes des trois versions du logiciel par écran

N° d'écran	Consignes
1	Merci d'entrer votre nom dans le cadre blanc ci-dessus avant de commencer Pour avancer dans le logiciel clique sur le bouton animé
2	Que se passe-t-il dans le bras lorsqu'on le plie ?
3	Tu peux retrouver la réponse à cette question en manipulant toi-même devant l'écran !
4	N'oublie pas que :
5	Nos mouvements s'effectuent grâce à l'articulation des os,
6	Les muscles sont attachés aux os et en se contractant tirent sur les os, Le point d'attache des muscles sur les os détermine les mouvements possibles,
7	Un mouvement est possible par l'action de plusieurs muscles.
8	(L'image utilisée apparaît sur écran sous forme d'un bouton) Clique sur le bouton rose à gauche de l'écran.
9	<u>Version 1</u> : Les os du bras sont représentés par des morceaux de carton. Assemble les éléments ci-contre pour reconstituer l'articulation du coude. Clique et maintien enfoncé le bouton de la souris pour déplacer les éléments. <u>Version 2</u> : Les os du bras sont représentés schématiquement. Assemble les éléments ci-contre pour reconstituer l'articulation du coude. Clique et maintien enfoncé le bouton de la souris pour déplacer les éléments. <u>Version 3</u> : Assemble les éléments ci-contre pour reconstituer l'articulation du coude. Clique et maintien enfoncé le bouton de la souris pour déplacer les éléments
10	<u>Version 1</u> : Les muscles sont représentés par des poulies et les tendons par des ficelles. On enroule la ficelle pour contracter le muscle. Mets en place le muscle fléchisseur (biceps). <u>Version 2</u> : Les muscles et les tendons sont aussi représentés schématiquement. Mets en place le muscle fléchisseur (biceps). <u>Version 3</u> : Mets en place le muscle fléchisseur (biceps).

- 11**     Version 1 : Positionne le crochet du bas du muscle fléchisseur sur l'avant-bras.  
Version 2 : Positionne le tendon du bas du muscle fléchisseur sur l'avant-bras.  
Version 3 : Clique l'endroit où tu penses que le tendon du bas du muscle fléchisseur doit s'attacher.
- 12**     Version 1, 2, 3 : Clique sur le muscle fléchisseur pour l'actionner.  
Si le membre touche le ballon de foot, c'est gagné, sinon il faudra tenter une autre position pour le crochet (« il faudra faire un autre essai » pour les versions 2 et 3).
- 13**     Version 1 : Bravo ! Mets maintenant en place le muscle extenseur (triceps).  
Mets en suite en place le crochet du bas de ce muscle.  
Version 2 : Bravo ! Mets maintenant en place le muscle extenseur (triceps).  
Mets en suite en place le tendon du bas de ce muscle.  
Version 3 : Traîne le muscle extenseur pour le mettre en place.  
Clique en suite sur l'avant-bras à l'endroit où tu penses que s'attache le tendon du bas de ce muscle.
- 14**     Clique d'abord sur le muscle fléchisseur pour l'actionner.
- 15**     Clique maintenant sur le muscle extenseur pour le contracter. Si le ballon bleu change de couleur, c'est gagné.
- 16**     1) Retiens que :  
Quand on plie le bras (flexion) :  
Le muscle fléchisseur se contracte et il se raccourcit, l'articulation se plie, le muscle extenseur se relâche.
- 17**     2) Retiens que :  
Quand on tend le bras (extension) :  
Le muscle extenseur se contracte et il se raccourcit, l'articulation se déplie, le muscle fléchisseur se relâche.
- 18**     3) Retiens que :  
Les 2 muscles de l'articulation du coude sont des muscles antagonistes. Ils travaillent en opposition lors d'un même mouvement.



# Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur

**Martin Riopel**, université du Québec à Montréal; riopel.martin@uqam.ca

**Gilles Raïche**, université du Québec à Montréal; raiche.gilles@uqam.ca

**Patrice Potvin**, université du Québec à Montréal; potvin.patrice@uqam.ca

**Frédéric Fournier**, université du Québec à Montréal;  
fournier.frederic@uqam.ca

**Pierre Nonnon**, université de Montréal; pierre.nonnon@umontreal.ca

---

*Cet article présente les considérations théoriques, didactiques et technologiques qui nous ont amené à entreprendre une recherche relative au développement d'un environnement informatisé d'apprentissage de la modélisation scientifique combinant un système d'expérimentation assistée par ordinateur et un système de simulation assistée par ordinateur. La fonctionnalité la plus originale de cet environnement permet de comparer une simulation animée et une séquence vidéo au moyen de la superposition directe des images. Les principaux résultats de cette recherche concernent l'utilisation de l'environnement développé dans le contexte de la formation à la mécanique classique au niveau de l'enseignement supérieur, et la possibilité de modélisation automatique des cheminements d'apprentissage des étudiants. Les propriétés de ce nouveau genre de logiciel, mises en évidence par notre recherche, mériteraient d'être étudiées plus en profondeur, surtout en ce qui concerne la rapidité d'apprentissage de la modélisation, l'enrichissement du raisonnement de l'étudiant et les sollicitations entre induction et déduction.*

Une réflexion didactique sur les enjeux de la formation à la modélisation scientifique dans le contexte scolaire doit comporter, à notre avis, une réflexion épistémologique. Nous croyons, en effet, que le point de vue que l'on a de la science est susceptible d'influencer significativement celui que l'on a de la modélisation en général, et de la modélisation scientifique en particulier. C'est pourquoi cet article

commence par présenter les considérations théoriques qui ont inspiré notre recherche concernant la formation à la modélisation. Ces considérations éclairent ensuite le rôle que peuvent jouer les *technologies de l'information et de la communication* (TIC) dans cette formation. Puis un exemple d'environnement développé dans cet esprit combine certaines caractéristiques des systèmes d'expérimentations assistées par ordinateur et de simulation assistée par ordinateur. Une situation d'apprentissage chez des étudiants (entre 17 et 19 ans), en début de formation dans un établissement d'enseignement collégial québécois, insiste ensuite sur les aspects novateurs de l'environnement qui leur permettent d'enrichir les modélisations qu'ils produisent. Enfin, nous expliquons comment l'environnement développé a aussi permis de modéliser automatiquement les cheminements d'apprentissage des étudiants, et comment il pourrait être utilisé dans le contexte de la recherche.

## I. Considérations théoriques

Parmi les courants épistémologiques relatifs à l'activité scientifique énumérés par Legendre (2005), deux ont retenu notre attention : le réalisme et le constructivisme. Ces courants insistent respectivement sur « *l'élaboration de modèles permettant de prédire certains aspects de la réalité* », et sur « *la construction de connaissances qui servent à l'organisation du monde de l'expérience* » (Riopel, 2005a). Bien qu'ils se positionnent différemment, il nous a semblé intéressant de les percevoir comme complémentaires, au moins partiellement, dans certains contextes.

Le réalisme est très présent chez les scientifiques contemporains et représente aussi le point de vue dominant parmi les philosophes des sciences (Alters, 1997). Ainsi, le réalisme critique incarne un regroupement des positions modérées de ces courants épistémologiques et apparaît comme la vision la plus authentique (Bégin, 1997) de la science contemporaine. À l'exception des versions plus radicales du constructivisme (Von Glaserfeld, 2004), l'importance du rôle que les épistémologues et les scientifiques accordent à la réalité dans la construction de la compréhension nous a inspiré. Nous avons en effet été frappés par cette croyance dominante de l'existence, dans la nature, de régularités fondamentales qui méritent qu'on déploie de grands efforts pour les mettre en évidence (Osborne, 1996). Il faut cependant rappeler que ceux-ci ne suffisent pas pour garantir le caractère objectif des modèles construits (Kuhn, 1983). D'un point de vue didactique, nous avons émis l'hypothèse que ce lien avec la réalité motive les scientifiques et qu'il pourrait aussi motiver les étudiants engagés dans un processus à la fois réaliste et constructif de modélisation.

Nous nous sommes aussi intéressés à la compréhension du concept de mesure par les étudiants en sciences expérimentales (Fournier, 2001). Nous en avons retenu que la confiance accordée par les étudiants à une valeur mesurée dépend

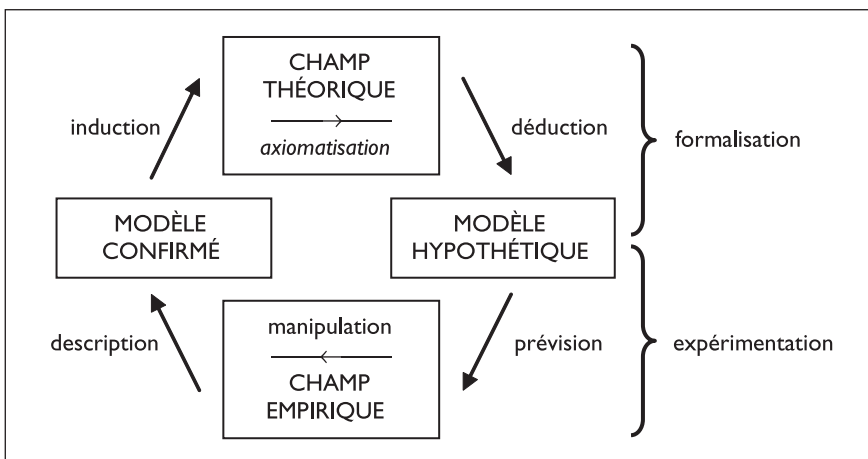
de celle qu'ils accordent au processus de transposition (ou de conversion) qui a permis la mesure. Ainsi, pour que cette confiance soit la plus grande possible, il nous est apparu souhaitable de conserver un lien perceptible avec ce qui est considéré comme réel par les étudiants. En d'autres mots, durant la modélisation, nous avons voulu que le phénomène demeure directement sensible, qu'il conserve sa « saveur », selon l'expression d'Astolfi (2005), le plus longtemps possible.

Selon Tiberghien *et al.* (2003), les travaux de Bunge (1975) et de Bachelard (1975) sur les modèles en physique conduisent tout d'abord à distinguer « le monde des objets et événements » et « le monde des théories et modèles ». Le premier monde est associé à la réalité, dans les limites que permettent les descriptions du champ expérimental ; le second est associé à la virtualité, dans les limites que permettent les descriptions du champ théorique.

Pour définir la notion de modèle, nous avons ensuite considéré le travail de Walliser (1977) qui propose qu'un système « se définit tout d'abord comme une entité relativement individualisable, qui se détache de son contexte ou de son milieu tout en procédant à des échanges avec son environnement » et qu'un modèle constitue « un système homomorphe à un système donné mettant en évidence certaines de ses caractéristiques ». C'est la correspondance entre certaines des caractéristiques des deux systèmes qui établit leur homomorphisme. Dans cet esprit, Walliser représente la dynamique de la modélisation scientifique comme un cycle qui comporte quatre phases et dont le point de départ est arbitraire. La figure 1 illustre cette dynamique.

**Figure 1. Dynamique de la modélisation scientifique (adaptée de Walliser, 1977)**

Permet d'identifier au moins deux mouvements : du concret vers l'abstrait (description et induction) et de l'abstrait vers le concret (déduction et prévision).



Plusieurs autres travaux ont cherché à enrichir la définition et la dynamique de la modélisation, parmi lesquels ceux d'Astolfi (1992), d'Orange (1997) et de Martinand (2002). Malgré la grande diversité des points de vue, des nuances et des ajouts, on remarque l'importance pour ces auteurs de l'adéquation d'une réalité – quel que soit son statut – avec le modèle, ainsi que l'importance d'une dialectique entre les deux, d'un mouvement du concret à l'abstrait (et *vice-versa*), du réel à sa représentation (et *vice-versa*). On peut reconnaître, par exemple, cette idée de mouvement à travers les extraits suivants :

« Le réel est alors appréhendé à travers une représentation, qui [...] rend compte de certains de ses aspects » et plus tard, parlant de la fonction prédictive d'un modèle : « cette fonction n'a d'intérêt que si une confrontation des prédictions avec le processus réel est au moins potentiellement possible » (Astolfi & Drouin, 1992) ;

« Modélisation : méthode et processus de représentation d'une situation réelle, éventuelle ou imaginaire dans le but de mieux comprendre sa nature et son évolution [...] » (Legendre, 2005) ;

« Construire un modèle pour résoudre un problème revient alors à développer une représentation [...] dans un monde qui donne sens au modèle (fonction explicative) et qui permet de le manipuler intellectuellement [...] » (Orange, 1997).

Dans la plupart des travaux sur la modélisation et dans les schémas qui en découlent, on peut alors identifier au moins deux mouvements principaux. Dans le premier (description et induction) la pensée va du concret vers l'abstrait (ou du particulier vers l'universel). Dans le second (déduction et prévision) la pensée va dans le sens contraire, c'est-à-dire de l'abstrait vers le concret (ou de l'universel vers le particulier). C'est le couplage de ces deux mouvements de la pensée qui favorise le processus de modélisation scientifique. Ce dernier suppose donc que l'on rapproche théorie et réalité. Cependant, celles-ci peuvent être représentées de plusieurs façons. Ainsi, la comparaison peut se faire à différents niveaux qui ne sont pas nécessairement équivalents pour les étudiants. On peut, par exemple, comparer directement les valeurs numériques mesurées et prédites. On peut aussi comparer les points sur les graphiques produits à partir de ces valeurs. On peut comparer les courbes synthétisant des ensembles de valeurs ou encore les fonctions analytiques correspondantes. Enfin, et c'est une possibilité essentielle pour notre développement, on peut choisir de comparer les images réelles d'une séquence vidéo avec celles synthétisées à partir d'un modèle théorique. Ces multiples comparaisons possibles amènent à nous demander, d'un point de vue didactique, quelles représentations de la réalité et quelles représentations de la théorie faut-il utiliser pour favoriser l'apprentissage de la modélisation ? Nous proposons que la réponse à cette question ne soit pas nécessairement identique pour tous les étudiants et qu'il faille peut-être leur laisser le soin d'aborder le processus de modélisation par l'accès qui leur convient le mieux.

Nous avons choisi d'adopter une telle position, et de ne pas retenir une séquence unique pour le déroulement en étapes du processus de modélisation scientifique. Nous avons regroupé plusieurs éléments de ces étapes en épisodes (tableau 1), déduits des travaux de Nonnon (1986), Lawson (1994) ainsi que ceux de Joshua et Dupin (1999).

**Tableau 1. Épisodes du processus de modélisation scientifique (Nonnon, 1986; Lawson, 1994; Joshua & Dupin, 1999).**

Épisodes apparentés à l'induction	Épisodes apparentés à la déduction
Choix d'un phénomène réel à étudier	Choix d'un phénomène réel à expliquer
Définition du système	Formulation de propositions permettant d'expliquer le phénomène
Observation des interactions entre les concepts	Déduction de conséquences associées aux propositions
Formulation d'hypothèses sur les interactions	Consultation de données provenant de la réalité
Construction d'un schème de contrôle des variables	Analyse permettant de confirmer ou d'infirmer les propositions
Expérimentation permettant d'obtenir des mesures	
Analyse des mesures afin d'en dégager des lois	
Synthèse des lois permettant de proposer un modèle	

Nous avons retenu deux catégories d'épisodes apparentés soit à l'induction soit à la déduction qui, même si ils n'arrivent pas à rendre compte de tous les aspects de la modélisation scientifique, semblent couvrir un spectre assez large d'opérations observables qui ont lieu lors du processus de modélisation. Nous avons ainsi retenu un certain nombre d'épisodes possibles à l'intérieur de ces séquences – dont aucun n'est par ailleurs nécessaire – que nous considérons pouvoir être effectués une ou plusieurs fois dans un ordre indifférent. Ils ont été utilisés dans l'identification automatique des cheminements d'apprentissage par l'environnement informatisé.

## 2. Rôle des TIC dans la formation à la modélisation

Dans le contexte des sciences expérimentales, Berger *et al.* (1994) séparent les environnements informatisés d'apprentissage humain en quatre catégories (tableau 2) : *expérimentation assistée par ordinateur* (ExAO), *simulation assistée par ordinateur* (SAO), *évaluation assistée par ordinateur* (EAO) et *production multimédia et hypermédia* (PMH). Nous y avons ajouté une cinquième catégorie (les *communautés virtuelles éducatives* [CVE]), présentée dans Moreau *et al.* (2004) qui concerne les développements récents de la technologie en ligne.

**Tableau 2. Catégories d'environnements informatisés d'apprentissage humain d'après Berger et al. (1994) et Moreau et al. (2004).**

Catégorie	Description
Expérimentation assistée par ordinateur (ExAO)	Environnement qui interagit avec une expérimentation réelle, par le biais d'une interface munie de capteurs, et reliée à un ordinateur permettant de recueillir les données, de les représenter et de les analyser.
Simulation assistée par ordinateur (SAO)	Environnement qui utilise les possibilités de calcul et d'affichage de l'ordinateur pour simuler un phénomène et le représenter à l'écran avec différents niveaux de complexité, d'interactivité et de réalisme.
Évaluation assistée par ordinateur (EAO)	Environnement qui correspond à des tests administrés et compilés par un ordinateur, localement ou à distance, et susceptibles de mettre en évidence certains besoins des étudiants dans le but de les diriger vers les ressources correspondantes à ces besoins.
Production multimédia et hypermédia (PMH)	Environnement qui correspond à des exercices, à des documents multimédias pouvant contenir des hyperliens et à des présentations sur support informatique avec lesquels les étudiants peuvent interagir.
Communauté virtuelle éducative (CVE)	Environnement qui permet à des groupes d'étudiants, sous la supervision de modérateurs, de collaborer au moyen de la technologie, comme le font les chercheurs.

Ces dernières années, les recherches effectuées au *laboratoire de robotique pédagogique* de l'université de Montréal se sont surtout intéressées aux deux premières catégories qui conviennent particulièrement au travail expérimental des étudiants scientifiques : l'ExAO et la SAO. On peut considérer, par exemple, les travaux de Fournier (2001) en ExAO et ceux de Cervera (1998) en SAO. Les premiers concernent un environnement d'apprentissage permettant à l'étudiant de construire un système de mesures. Cette construction conduit l'étudiant à entreprendre un processus de modélisation essentiellement inductif qui lui permet de mieux comprendre des phénomènes mesurables. Les seconds concernent un environnement d'apprentissage basé sur des simulations de phénomènes, particulièrement abstraits, faisant intervenir des fluides dans des dispositifs fermés. Cet environnement permet à l'étudiant d'expérimenter et d'observer, en temps réel, le comportement de systèmes complexes qui ne sont pas directement observables. La complémentarité de ces travaux, en ExAO et SAO, peut aussi être étendue aux avancées récentes en EAO, principalement celles qui relèvent des tests adaptatifs (Raïche, 2004). Ceux-ci correspondent à une évaluation sur mesure s'adaptant aux réponses d'étudiants qui réalisent une suite de tâches et qui doivent tenir compte des modélisations modernes issues de la théorie de la réponse aux items (Blais & Raïche, 2003).

Des fonctions d'utilisations pédagogiques possibles des simulations numériques en physique ont été présentées par Richoux et al. (2002). Ces auteurs présentent les simulations comme appartenant à un plan intermédiaire entre le

modèle théorique et la réalité. Dans un contexte didactique, ils insistent tout d'abord sur le lien constitutif entre les simulations et le modèle théorique, mais aussi sur l'écart possible, voire l'absence de lien, entre les simulations et la réalité. Ils constatent que, pour les simulations physiques, « *très peu de logiciels utilisent des données prises dans la réalité* », à l'exception des constantes du mouvement. C'est ce dernier lien, plus faible, avec la réalité que nous avons voulu resserrer. Nous croyons que le risque, constaté par ces auteurs, de confusion possible entre théorie et réalité dans les simulations pourrait être diminué en offrant, au moyen de l'ExAO, plus de place à des données expérimentales dans les environnements d'apprentissage comportant des simulations.

En nous appuyant sur la conception réaliste de la science, nous avons donc entrepris d'explorer la complémentarité de l'ExAO et de la SAO, en développant une nouvelle génération d'environnements informatisés qui intègrent de façon cohérente ces approches dans une même application basée sur des informations issues de l'expérience. Nous avons choisi, pour cela, le contexte de la mécanique classique dans l'enseignement supérieur pour lequel les phénomènes modélisables peuvent être aisément filmés, et nous avons tenté de resserrer le lien entre la réalité filmée et les modèles simulés, en les superposant. Cette idée de combiner les avantages des deux approches semble intéressante parce qu'elle permet de faire parcourir à l'étudiant, en une seule séance de laboratoire, un cycle complet du processus de modélisation scientifique. Nous avons observé que cette nouvelle juxtaposition des potentialités de l'ExAO et de la SAO, pour assister les étudiants dans les phases d'induction et de déduction, est susceptible d'accélérer leur cheminement expérimental et d'enrichir leur raisonnement.

Au moment d'entreprendre cette juxtaposition, il est important de se demander, d'un point de vue didactique, s'il faut limiter l'assistance que les technologies fournissent aux étudiants durant le processus de modélisation. Un élément de réponse peut venir d'une question correspondante concernant les scientifiques en s'interrogeant sur les épisodes du processus de modélisation durant lesquels ils ont recours aux technologies. De nos jours, les technologies facilitent, ou accélèrent vraisemblablement, tous les épisodes de leurs recherches. Nous croyons qu'il faut adopter la même réponse pour les étudiants et leur fournir des outils technologiques qui facilitent et accélèrent leur travail, même si cela induit un déplacement de leur champ d'expertise.

À titre d'exemple, l'utilisation régulière de la calculatrice influence l'incapacité des étudiants à effectuer manuellement certaines opérations. Bien que l'on puisse déplorer cette influence négative, on peut aussi reconnaître certains avantages liés à l'utilisation de la calculatrice. Celle-ci permet aux étudiants d'un niveau donné d'accomplir des tâches plus complexes qu'auparavant. Cette évolution entraînant une dépendance accrue aux technologies n'est cependant pas un phénomène propre à l'éducation et nous avançons que les technologies, en enfermant dans des boîtes noires certaines difficultés, facilitent et accélèrent certaines tâches.

Dans le contexte de la formation à la modélisation, cet emboîtement technologique peut être perçu comme un progrès qui permet aux étudiants de considérer des modélisations plus élaborées, plus tôt dans leur cheminement, en réduisant les contingences intellectuelles préalables. De ce point de vue, les applications technologiques constituent une solution réaliste au problème de la complexification de l'édifice de la science moderne que les étudiants doivent apprendre à maîtriser durant leur formation. En effet, on ne doit plus former seulement des étudiants, mais des étudiants assistés par les technologies. Ce qui importe, du point de vue de leur formation, est moins la réussite d'une tâche que son accomplissement en utilisant les moyens technologiques disponibles dans la société. Dans cet esprit, il faut bien sûr que les étudiants s'adaptent aux technologies mais aussi, et peut-être surtout, que les applications technologiques soient développées de façon à s'adapter autant que possible aux étudiants, d'un point de vue didactique, en tentant de les assister.

Pour notre développement, nous nous sommes inspirés des travaux de Potvin (2002) qui s'appuie sur la perspective de Di Sessa (1993). Celle-ci propose que l'étudiant, pour produire des jugements concernant des phénomènes, utilise un espace cognitif qui réagit à des paramètres d'entrée qu'il traite à l'aide de primitives phénoménologiques (ou *p-prims*). Ces dernières correspondent à des unités plus fondamentales de la compréhension que les conceptions ou les représentations. En adoptant une position semblable à celle de Potvin, il nous est apparu intéressant de concevoir un environnement basé sur des paramètres dont l'utilisation conduise à en observer directement des effets, plutôt que sur des grandeurs que l'on doit préalablement définir à l'aide de relations analytiques. Nous avons aussi tenté de faire en sorte que l'étudiant puisse aller directement vers ce qui l'intéresse (l'observation directe des effets sur le mouvement de la modification du coefficient de frottement par exemple), sans nécessairement passer par toutes les étapes intermédiaires d'un raisonnement rigoureux. Nous avons donc conçu un environnement souple, susceptible d'assister l'étudiant autant que possible et en le dirigeant le moins possible, dans le contexte considéré, afin de le laisser explorer par lui-même et construire ses connaissances. Nous avons donc intégré à notre système des fonctionnalités qui facilitent et accélèrent le travail des étudiants engagés dans un processus de modélisation, sans imposer un ordre prédéterminé pour les épisodes de leurs chemine-ments. Nous espérons que l'étudiant parvienne, par un chemin cognitif plus facile et plus rapide, à développer une représentation pertinente d'un phénomène avant de pouvoir en expliciter une mise en équation rigoureuse.

### 3. Intégration du système d'ExAO et du système de SAO

Intégrer l'ExAO et la SAO dans un environnement d'apprentissage cohérent a posé le problème fondamental des représentations du phénomène étudié qui, en général, ne sont pas les mêmes dans les deux cas. En effet, lors d'une ExAO, le phénomène (réel) étudié est présent et il suffit de représenter à l'écran des données numériques, des représentations d'instruments de mesure et des graphiques. En SAO,



par opposition, le phénomène réel absent est souvent représenté à l'écran de façon assez réaliste, accompagné d'autres types de représentations. C'est donc à ce problème de partage des représentations que nous avons tenté de trouver une solution raisonnable. Celle-ci repose sur trois types de fenêtres : la fenêtre d'animation, la fenêtre des graphiques et la fenêtre des paramètres. Elles sont décrites ci-dessous.

### 3.1. Fenêtre d'animation

Afin d'intégrer les systèmes d'ExAO et de SAO en respectant une continuité d'utilisation de l'environnement par l'étudiant, nous avons fait en sorte que les deux applications partagent une représentation commune de la situation à l'écran. La représentation la plus réaliste (ou la moins abstraite) pour l'étudiant correspond à une séquence d'images (réelles ou virtuelles) du phénomène étudié. Cette séquence doit évidemment être animée pour illustrer son évolution. La figure 2 présente un exemple de fenêtre d'animation. Une des fonctionnalités les plus originales de cet environnement consiste à permettre la superposition des deux types d'images : par exemple, sur la figure 2, la balle de gauche est un objet simulé alors que celle de droite est réelle.

#### Figure 2. Exemple d'une fenêtre d'animation d'une séquence vidéo.

Le point au centre de la balle, la série de points figurant sa trajectoire, et la balle simulée (à gauche) sont superposés à l'image vidéo.



Nous avons donc choisi, en mode SAO, de contrôler la fenêtre d'animation par le modèle et, en mode ExAO, de la synchroniser avec le phénomène réel. La séquence vidéo est alors affichée comme image de fond de la fenêtre d'animation en parfaite synchronisation avec la simulation. De plus, le caractère réel de la séquence vidéo évite à l'étudiant de confondre modèle et réalité, et nous pensons qu'il est susceptible de favoriser l'activation de ses connaissances. Finalement, le partage, par les systèmes ExAO et SAO, d'une représentation réaliste du phénomène à l'écran permet aux étu-

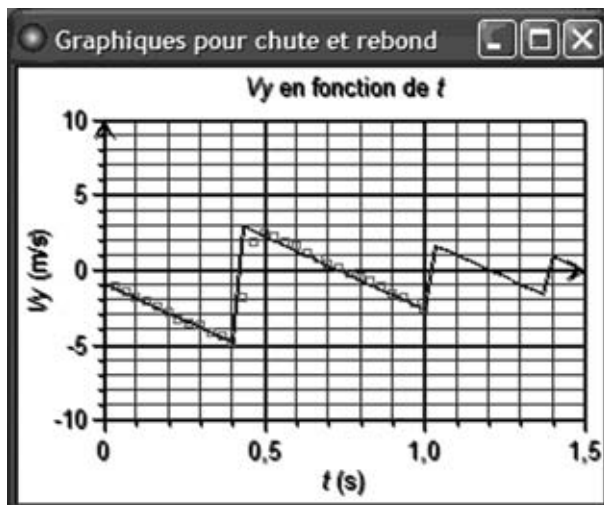
dians de comparer directement la réalité (séquence vidéo) au modèle (dessiné en superposition sur les images). Cette comparaison a l'avantage d'être moins abstraite que celle qui nécessite l'intermédiaire de graphiques, par exemple, et par conséquent risque d'être plus convaincante pour les étudiants qui ne maîtrisent pas toujours de telles représentations. Ce partage peut constituer une solution raisonnable et intéressante au problème fondamental d'appropriation des modèles scientifiques par les étudiants. En rendant la comparaison entre la théorie et la réalité moins abstraite (en comparant des images plutôt que des graphiques ou des relations analytiques), on peut espérer que l'environnement d'apprentissage permette aux étudiants de considérer des phénomènes et des modèles plus complexes que ceux habituellement considérés. Cette nouvelle représentation est aussi susceptible d'interpeller plus efficacement les conceptions des étudiants qui ont le plus souvent été construites en interaction directe avec la réalité et non avec sa représentation abstraite.

### 3.2. Fenêtre des graphiques

L'apprentissage de la modélisation implique aussi la familiarisation avec des représentations abstraites. La fenêtre des graphiques est dédiée à ce type de représentation et accompagne presque toujours ExAO et SAO. Elle peut aussi être partagée par les deux systèmes. La figure 3 présente un exemple de fenêtre comportant le graphe des valeurs (petits carrés) de la vitesse verticale d'une balle déterminée lors d'une chute et des rebonds subséquents, ainsi que la courbe simulée (trait plein) correspondante.

**Figure 3. Exemple de fenêtre des graphiques illustrant la vitesse verticale d'une balle lors de sa chute et de ses rebonds**

Valeurs issues du film (petits carrés) et simulées (trait plein).



### 3.3. Fenêtre des paramètres

La fenêtre des paramètres (figure 4) permet d'afficher et de modifier les valeurs numériques des propriétés des objets de l'environnement informatisé comme les paramètres physiques des objets simulés (masse, position, vitesse...) ou les paramètres d'affichage (abscisse minimale des graphiques, couleur...) avec une présentation qui facilite la comparaison entre les paramètres simulés et mesurés.

**Figure 4. Exemple de fenêtre des paramètres pour la balle.**

Les deux colonnes de gauche affichent les valeurs des paramètres simulés.

Celles de droite affichent les valeurs des paramètres mesurés.

Ces paramètres sont respectivement : le temps, la masse, le rayon, les composantes X et Y de la position et de la vitesse.

Balle1		Mesure1	
Paramètre sim	Valeur	Paramètre mes	Valeur
t	0	T	0
M	1	M	1
R	0,057	R	1
X	0,864	X	0,999
Y	1,558	Y	1,565
Vx	0	Vx	0
Vy	-0,900	Vy	-1,063
Le temps (en s.)		Le temps (en s.)	

Il nous est apparu naturel que l'environnement développé soit basé sur des paramètres que l'étudiant est amené à modifier pour en observer concrètement les effets dans la fenêtre d'animation et abstraitement dans la fenêtre des graphiques. C'est en modifiant les paramètres du système de SAO que l'étudiant peut ajuster la simulation dans le but d'obtenir soit un modèle approprié dans un processus de raisonnement inductif, soit de générer des prédictions dans un processus de raisonnement déductif. De façon apparentée, c'est en modifiant les paramètres du système d'ExAO que l'étudiant peut tenter de vérifier une loi.

### **3.4. Utilisation de la vidéo**

Nous avons observé que la vidéo, en plus de permettre de visionner à plusieurs reprises le déroulement d'un phénomène en s'attardant successivement sur ses aspects différents, a une valeur de réalité importante pour les étudiants. Cette valeur est attribuée, à notre avis, par le fait que les étudiants peuvent s'identifier à la caméra. Celle-ci joue un rôle que les étudiants connaissent bien : celui de regarder. En revanche, une règle ou un chronomètre jouent un rôle plus abstrait : celui de transformer certains aspects de la réalité en nombres dont l'interprétation est moins aisée.

La vidéo est bien adaptée au contexte de la mécanique classique où ne sont mesurées habituellement que trois grandeurs : la position, la masse et le temps. Toutes les autres grandeurs de la mécanique s'en déduisent. C'est ainsi qu'on obtiendra la vitesse en divisant la variation de la position par la variation du temps, etc. De plus, la masse d'un objet étant presque toujours une constante, seules les mesures de la position et du temps sont répétées, ce qui convient bien à une séquence vidéo. Chaque image de la séquence est associée à des moments précis, et la position et la dimension des objets peuvent être obtenues par un processus rapide et amusant pour les étudiants.

Bien entendu, il faut, par exemple, s'assurer que les objets filmés soient suffisamment visibles sur l'image, que l'ampleur du mouvement permette d'occuper une part importante de l'image, que l'éclairage soit adéquat, etc. La contrainte la plus importante est certainement le caractère bidimensionnel des images obtenues qui limite l'expérimentation à des situations pouvant se ramener à un plan, ce qui est heureusement suffisant au niveau de l'enseignement supérieur collégial au Québec.

Nous croyons enfin que l'utilisation de la vidéo augmente la diversité des expérimentations possibles, en donnant accès à des phénomènes rapides (une motocyclette qui passe), spatialement étendus (un ballon qui tombe d'un édifice), ou dangereux (une collision de voitures).

### **3.5. Paramètres des objets**

C'est à partir de la liste des épisodes du processus de modélisation scientifique du tableau 1, de la perspective de Di Sessa et de la description des concepts de la mécanique (Benson, 2004), que nous avons élaboré une liste de paramètres que les étudiants peuvent modifier, mettre en relation et comparer (tableau 3). Cette liste constitue la base conceptuelle de l'application. Comme mentionné précédemment, nous avons considéré des paramètres physiques associés aux objets simulés ou mesurés (masse, composantes de la position, de la vitesse...) et des paramètres d'affichage associés principalement aux graphiques produits (valeurs extrêmes des échelles, couleurs...).

Il est important de comprendre que les étudiants ne peuvent pas modifier directement la valeur de tous les paramètres. En effet, seules les valeurs des

paramètres indépendants (en italique dans le tableau 3) peuvent être modifiées. Les valeurs des paramètres dépendants sont calculées à partir des valeurs des paramètres indépendants en utilisant les relations de la mécanique classique. Ainsi, d'un point de vue didactique, c'est en modifiant les valeurs des paramètres indépendants et en observant les effets de ces modifications sur l'évolution temporelle de l'ensemble des paramètres que les étudiants vont se former à la modélisation.

On peut considérer, à titre d'exemple, la position et la vitesse d'un corps en chute libre. Dans le contexte de la mesure sur une séquence vidéo, la vitesse est un paramètre dont la valeur se calcule à partir des valeurs successives de la position obtenues par les étudiants sur chacune des images de la séquence. Ainsi, pour la mesure, la position est un paramètre indépendant (ou ajustable) et la vitesse est un paramètre dépendant (ou non-ajustable). Dans le contexte d'une balle simulée, par contre, la position et la vitesse sont des paramètres dont les valeurs sont fixées initialement et arbitrairement. C'est à partir de la position initiale et de la vitesse initiale que l'équation du mouvement permet de simuler la trajectoire de la balle. Ainsi, pour la balle simulée, la position et la vitesse sont des paramètres indépendants (ou ajustables). La liste détaillée des paramètres indépendants (en italique) et dépendants (police normale) est présentée dans le tableau 3. Il est à noter que les paramètres d'affichage sont – par définition – tous ajustables.

**Tableau 3. Paramètres des objets**

Type	Objet	Paramètres
<b>Paramètres physiques</b>	Mesure	<i>masse, rayon, position</i> , vitesse, accélération, force, quantité de mouvement, énergie cinétique, énergie potentielle, énergie mécanique, <i>moment d'inertie, position angulaire</i> , vitesse angulaire, accélération angulaire, énergie cinétique de rotation, énergie cinétique de translation, moment de force, moment cinétique.
	Simulation	<i>largeur, hauteur, gravité, vitesse du vent, coefficients de frottement, début, fin.</i>
	Balle simulée	<i>masse, rayon, position, vitesse</i> , accélération, force, quantité de mouvement, énergie cinétique, énergie potentielle, énergie mécanique, <i>moment d'inertie, position angulaire, vitesse angulaire</i> , accélération angulaire, énergie cinétique de rotation, énergie cinétique de translation, moment de force, moment cinétique.
	Paroi simulée	<i>positions des extrémités, moment d'apparition, moment de disparition.</i>
	Ressort simulé	<i>balle initiale, balle finale, constante de rappel, longueur au repos, moment d'apparition, moment de disparition.</i>
<b>Paramètres d'affichage</b>	Graphique	<i>paramètres physiques en abscisse et en ordonnée, échelles min et max, fonction à tracer.</i>
	Tous	<i>couleur d'affichage.</i>

L'environnement informatisé a été développé à partir de cette liste en *Visual Basic*® pour le système d'exploitation *Windows*®. Une présentation plus détaillée des fonctionnalités de l'environnement peut être trouvée dans Riopel (2005b).

#### 4. Présentation d'une situation d'apprentissage

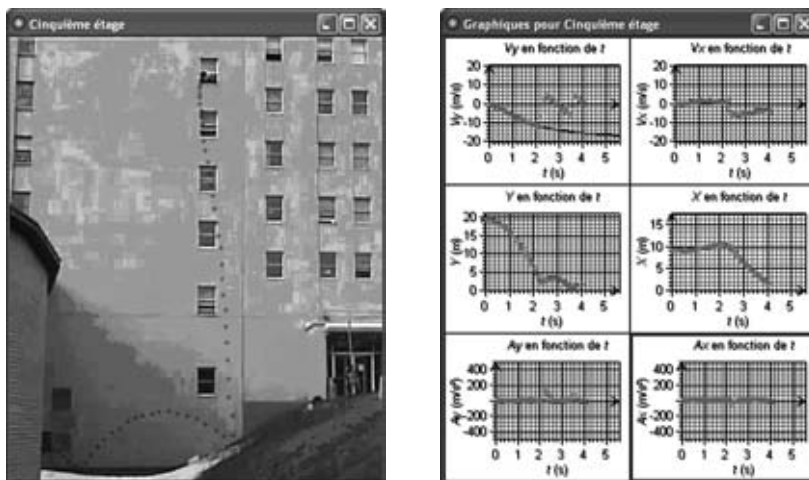
Cette section présente les résultats de l'utilisation de notre environnement en relation avec une situation d'apprentissage de la modélisation de la chute d'un corps. Cette situation a été créée pour les besoins de la recherche et elle est maintenant utilisée à grande échelle au collège Jean-de-Brébeuf de Montréal. Elle ressemble à un jeu où la théorie, pilotée par les étudiants, est confrontée à la réalité, mesurée aussi par les étudiants. Avec la classification de Richoux *et al.* (2002), il s'agit d'une « *simulation pour explorer un modèle* » superposée à la séquence vidéo d'une chute réelle. Cet exemple permet de comprendre comment la combinaison de l'ExAO et de la SAO enrichit la formation à la modélisation en accélérant, sans les dénaturer, chacun des épisodes du cheminement. Cette situation permet aussi de faire valoir comment la combinaison de l'ExAO et de la SAO permet aux étudiants de s'attaquer à des modélisations significativement plus complexes que celles généralement soumises à leur sagacité. Ainsi, les étudiants peuvent modéliser un frottement fluide sans maîtriser le calcul différentiel habituellement requis. Pour cela, ils construisent et observent une séquence d'images comportant des objets réels et des objets simulés au lieu de mettre en oeuvre des représentations graphiques ou analytiques sophistiquées.

Le phénomène étudié est la chute d'un ballon depuis la fenêtre du cinquième étage d'un immeuble. Nous allons supposer, pour faciliter l'exposé, que la démarche commence lorsque la chute est filmée à l'aide d'une caméra numérique qui permet d'obtenir de courtes séquences vidéo. Nous avons observé que les étudiants commencent habituellement par visionner la séquence à plusieurs reprises. Ensuite, ils choisissent d'obtenir les mesures des positions successives du ballon en cliquant, à l'endroit approprié, sur chacune des images de la séquence vidéo. Certains graphiques de l'évolution des variables peuvent alors être affichés (figure 5). Sur la fenêtre d'animation de gauche, chaque point correspond à une position mesurée. Sur la fenêtre des graphiques de droite, les composantes horizontales et verticales de la position, de la vitesse et de l'accélération sont représentées. L'ensemble de la procédure de mesure dure moins d'une minute, et permet de considérer deux rebonds du ballon.

En observant les graphiques, les étudiants sont en mesure de réfléchir, voire d'émettre des hypothèses, sur un ensemble de questions concernant le mouvement du ballon. Par exemple : Les composantes verticales et horizontales de l'accélération du ballon sont-elles constantes ? Le frottement fluide influence-t-il significativement le mouvement ? Le vent influence-t-il le mouvement ? La vitesse se conserve-t-elle lors du rebond ?

**Figure 5. Mesures obtenues et graphiques produits pour la chute filmée d'un ballon.**

Les points sont mesurés en cliquant sur le ballon pour chaque image de la séquence. Les graphiques sont générés automatiquement.

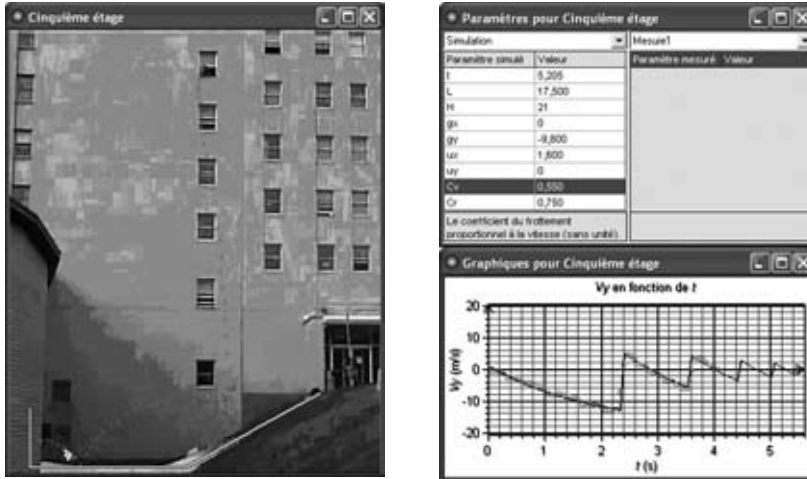


Pour vérifier leurs hypothèses, les étudiants peuvent afficher des relations théoriques sur les graphiques et les ajuster aux ensembles de points : c'est une méthode habituelle en ExAO. Cependant, la présence d'un système de SAO ouvre de nouvelles possibilités. Les étudiants peuvent, en effet, créer un ballon virtuel dont les paramètres seront ajustés afin de reproduire le mouvement du ballon réel. La figure 6 présente les fenêtres obtenues. Sur la fenêtre de gauche, on peut voir le ballon virtuel qui rebondit, à la fin de son mouvement, sur des parois virtuelles qui reproduisent le sol. Sur les fenêtres de droite, les valeurs des paramètres obtenues pour l'accélération gravitationnelle ( $-9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ), la vitesse horizontale du vent ( $1,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), le coefficient de frottement (0,55) et le coefficient de restitution (0,75) sont affichés, de même que le graphe de la vitesse déterminée expérimentalement (petits carrés) et les points simulés (trait continu). Il est à noter que les points simulés permettent d'extrapoler le mouvement au-delà du second rebond.

Lors de cette situation de modélisation, les étudiants réussissent à obtenir, souvent en moins d'une heure, des réponses à des questions plus complexes qu'habituellement. Nous avons aussi observé que les étudiants n'utilisent pas nécessairement les graphiques lors du processus de modélisation. Certains préfèrent observer les effets de la modification de la valeur d'un paramètre du ballon virtuel dans la fenêtre d'animation.

**Figure 6. Comparaison du ballon réel et du ballon virtuel.**

Un ballon virtuel a été superposé à la séquence vidéo et les paramètres de simulation ont été ajustés afin de reproduire le mouvement filmé.



À titre d'exemple, un cheminement typique d'étudiant pourrait comporter les épisodes suivants (plusieurs autres cheminement sont aussi possibles) :

- l'étudiant produit une séquence vidéo de la chute du ballon ;
- en cliquant sur chacune des images de la séquence vidéo, il obtient la position  $(u_x, u_y)$  du ballon à chaque instant ;
- il affiche certains graphiques associés au mouvement ;
- il fait tracer certaines fonctions théoriques sur les graphiques (comme  $v_y = -9,8 t$ ) ;
- il ajoute un ballon virtuel qui se superpose au ballon réel ;
- il ajuste les paramètres de simulation afin de reproduire le mouvement réel ;
- en animant simultanément la séquence vidéo et la simulation, il compare le mouvement du ballon réel et du ballon simulé ;
- au choix de l'étudiant, cette comparaison s'effectue sur les images, sur les graphiques ou sur les valeurs numériques des paramètres ;
- suite à ces comparaisons, il entreprend une seconde modélisation en modifiant les paramètres de départ de la simulation et recommence l'analyse du mouvement mais cette fois, la simulation précède la mesure.

L'exemple précédent a montré que l'ordinateur assiste les étudiants durant chacun des épisodes de leur cheminement. Le logiciel joue alors un rôle privilégié de témoin de ce cheminement, il peut en consigner les épisodes et les modéliser automatiquement, ce qui est l'objet de la prochaine section.



## 5. Modélisation didactique des cheminements d'apprentissage

Comme le préconise Nonnon (1993), nous avons successivement effectué une mise à l'essai fonctionnelle de notre environnement, puis une mise à l'essai empirique, et enfin une mise à l'essai systématique.

Lors des mises à l'essai fonctionnelles, nos deux objectifs principaux étaient l'évaluation de la fonctionnalité du prototype de l'environnement d'apprentissage développé et l'évaluation de sa capacité à être utilisé dans une situation didactique réelle. Nous avons choisi deux professeurs de physique pour ces évaluations. Les professeurs consultés se sont montrés satisfaits ou très satisfaits de l'environnement, pour au moins 78 % des questions comportant une évaluation quantitative. Ils ont émis l'avis que l'environnement, compte tenu des fonctionnalités associées à la vidéo, pouvait remplacer avantageusement certaines expériences effectuées par les étudiants, et plus particulièrement celles concernant la chute d'un corps.

L'objectif des mises à l'essai empiriques est de mettre en évidence, par un processus empirique et essentiellement inductif, des variables associées à l'utilisation du prototype et susceptibles d'être étudiées systématiquement (Nonnon, 1993). Ainsi leur rôle est plus exploratoire que confirmatoire. Nous nous sommes donc fixés comme objectif principal, de rendre compte des fonctionnalités complètes du prototype avec un nombre limité d'étudiants. Ces fonctionnalités étaient, d'une part, d'offrir la possibilité aux étudiants de s'engager dans un processus de modélisation et, d'autre part, d'enregistrer et d'identifier les épisodes du raisonnement effectué par les étudiants. Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé à deux mises à l'essai impliquant des étudiants suite à leur cours de mécanique classique. Pour tenter de mettre en évidence, autant que possible, des variables associées à une utilisation réelle de l'environnement d'apprentissage, nous avons élaboré en équipe au laboratoire et avec l'aide des professeurs impliqués dans ces mises à l'essai, un scénario d'utilisation par des étudiants. Bien entendu, il nous fallait considérer que les étudiants n'avaient aucune expérience de cet environnement, c'est pourquoi nous avons séparé le scénario en trois parties : une première partie de présentation des fonctionnalités par le professeur, une deuxième partie de familiarisation sous la forme d'exercices et une troisième partie d'expérimentation des étudiants avec l'environnement. Nous avons aussi prévu, pour les besoins de cette recherche, d'enregistrer à l'aide d'un magnétophone les observations et les commentaires des étudiants durant toute la durée de l'expérimentation, afin de conserver autant d'observations que possible et de pouvoir comparer *a posteriori* ces observations et ces commentaires aux enregistrements effectués par l'environnement lui-même. Lors de ces mises à l'essai empiriques, nous avons observé que les étudiants se sont engagés avec enthousiasme dans un processus de modélisation faisant intervenir des épisodes de raisonnement inductifs et déductifs. Pour cela nous avons utilisé la liste des épisodes inductifs et déductifs du tableau I. Les étudiants ont consacré en moyenne 47 minutes

à l'expérimentation (28 minutes en induction, 19 minutes en déduction), ce qui correspond à la moitié d'une séance habituelle de laboratoire, pendant laquelle les étudiants ont modélisé le mouvement de trois objets (plutôt qu'un). Nous avons aussi observé, en comparant la transcription des interventions des étudiants avec les enregistrements effectués par l'environnement (voir le tableau 4 pour un exemple), que les épisodes identifiés automatiquement rendent compte, avec une relative fidélité, du cheminement des étudiants.

**Tableau 4. Exemple de synthèse des transcriptions et des identifications**

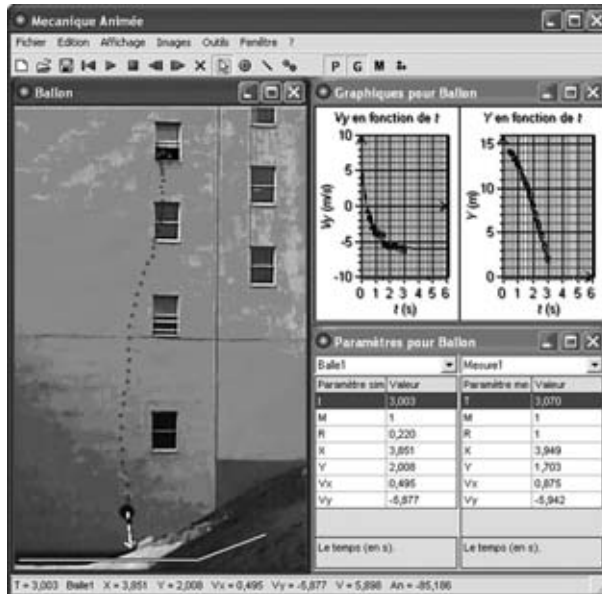
Interventions d'étudiant	Description synthétique	Identifications automatisées
<p>« Ça m'a l'air correct. Oui là c'est pas mal synchronisé. On était peut-être un cheveu en retard. Le temps n'était pas bon » (D97),</p> <p>« Si on change le temps à 1,09 d'après moi, ça va être encore plus concluant » (D98).</p>	<p>D93-D98. Ajustement de la situation et seconde mise à l'épreuve.</p>	<p>Temps : 14 :43 :20 I-3, Observation</p> <p>Temps : 14 :43 :50 I-8, Synthèse modèle</p> <p>Temps : 14 :45 :01 D-5, Confirmation/Réfutation</p>

L'identification automatisée des épisodes a été effectuée au moyen d'une procédure exhaustive complexe qui considère toutes les actions possibles dans l'environnement. Étant donné son ampleur, sa transversalité et son importance concernant la modélisation des cheminements d'apprentissage, cette procédure sera présentée et discutée dans une publication à venir.

Nous avons ensuite entrepris des mises à l'essai systématiques faisant intervenir un plus grand nombre d'étudiants. Notre principal objectif était alors de valider notre modèle d'action, en illustrant comment l'environnement pouvait être utilisé dans le contexte d'une classe réelle. Nous avons donc effectué les mises à l'essai systématiques dans deux classes de 33 et 34 étudiants. Nous avons convenu avec le professeur d'un scénario d'intervention en trois temps, relativement semblable à celui utilisé pour les mises à l'essai empiriques. Dans la troisième partie, les étudiants étaient invités à analyser une séquence vidéo de la chute d'un objet effectuée à partir d'une fenêtre située au quatrième étage. Le choix d'analyser le mouvement d'un objet plutôt que de trois a permis, à la demande du professeur, de constituer une séance qui ressemble autant que possible à celle habituellement effectuée en classe sur la chute libre. Nous avons cependant fait en sorte que la seconde moitié de la chute de l'objet soit influencée par le frottement de l'air, afin de rendre possible un approfondissement par les étudiants. La figure 7 illustre une copie d'écran typique obtenue lors des mises à l'essai systématiques : on peut y voir les points mesurés sur les images de la séquence vidéo (à gauche) et les graphiques produits (à droite); à cause du frottement de la balle sur l'air, la vitesse atteint un plateau.

**Figure 7. Copie d'écran typique obtenue lors des mises à l'essai systématiques.**

L'accélération du ballon n'est pas constante, une vitesse limite est obtenue à partir du graphique de  $V_y$  en fonction de  $t$ .



Lors des mises à l'essai systématiques faisant intervenir 67 étudiants, nous avons observé que 68 % des étudiants ont réussi à utiliser l'environnement pour obtenir des réponses satisfaisantes à des questions dont certaines concernaient des éléments de théorie vus en classe et d'autres concernaient des éléments nouveaux. En moyenne, les étudiants ont effectué 74 épisodes (29 en induction et 42 en déduction) pour compléter l'expérimentation en 41 minutes (22 minutes en induction et 17 minutes en déduction). De plus, nous avons observé que l'environnement a réussi à enregistrer de façon satisfaisante les actions des étudiants. L'historique de la figure 8 rend compte de la distribution des épisodes de cheminement des étudiants et du temps consacré à chaque épisode. Les épisodes précédés par la lettre *I* sont associés à un raisonnement inductif, ceux précédés par la lettre *D* sont associés à un raisonnement déductif et celui précédé par la lettre *N* n'est ni inductif ni déductif.

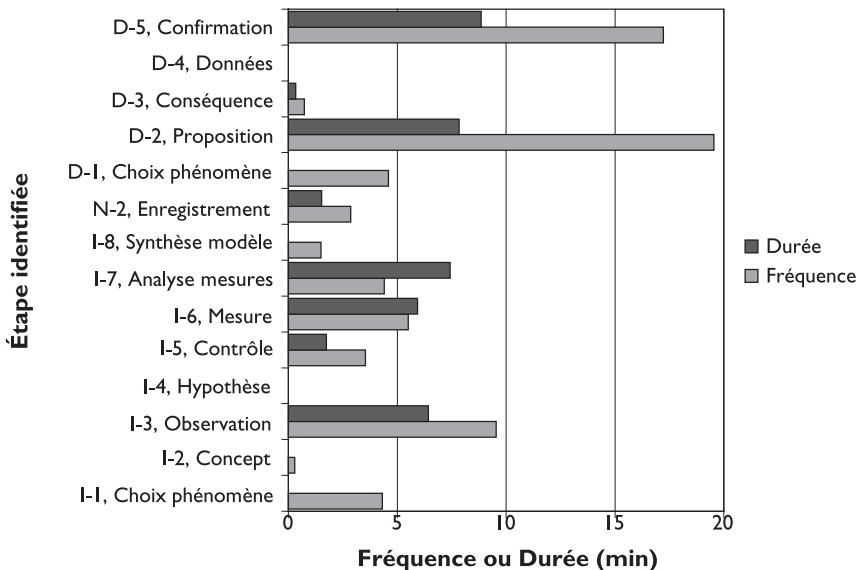
Lors des mises à l'essai systématiques, les réponses des étudiants à un questionnaire (quantitatif et qualitatif) ont permis d'observer que 93 % d'entre eux se sont montrés plus intéressés par cette expérience que par celles du même semestre. De plus, presque tous les étudiants ont déclaré que l'environnement permet de mieux comprendre le phénomène physique que les expériences précédentes du même semestre. Ils ont aussi traduit, à leur manière, les mérites de cette forme

de travail : « Le mélange du vidéo, du graphique et de la création de la simulation nous permet de comprendre l'expérience par tous les aspects » ; « Ça représente une corrélation directe avec la réalité, donc on peut interpréter les résultats de la vraie vie avec la théorie ». Cette évocation de la « vraie vie » semble intéressante, parce qu'elle indique indirectement que les expérimentations habituelles ne font pas nécessairement partie de la vraie vie pour certains étudiants, et elle nous ramène à leur conception du réalisme, ce qui mériterait, à notre avis, d'être approfondi.

**Figure 8. Durée moyenne (en minutes) et fréquence moyenne (en nombre d'épisodes répétés) des épisodes de cheminement**

L'écart type sur les valeurs est de 30 %.

L'ordre des épisodes sur l'axe vertical est arbitraire



## 6. Conclusion

Dans le cadre de cette recherche qui visait le développement structuré d'un outil didactique, nous avons conçu et développé un environnement informatisé d'apprentissage. Celui-ci a permis à des étudiants de niveau supérieur de parcourir un cycle complet du processus de modélisation en mécanique classique, en les amenant à utiliser certaines des potentialités que peut offrir le couplage d'un système d'ExAO et d'un système de SAO. Ce dispositif avait pour but d'assister les étudiants lors de leur implication dans un processus de modélisation d'un phénomène, et dans la réalisation des épisodes de raisonnement inductifs ou déductifs caractérisant la pensée scientifique. En mécanique, ce couplage est nouveau : il

permet à l'étudiant de construire un modèle animé qui évolue temporellement et qu'il peut corriger en le comparant au mouvement réel filmé.

Suite aux mises à l'essai, nous concluons que cette nouvelle façon de concevoir l'utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement et l'apprentissage des sciences enrichit l'éventail des possibilités offertes aux étudiants et aux professeurs.

Par ailleurs, les didacticiens peuvent utiliser l'environnement pour suivre les cheminements d'étudiants engagés dans un processus de modélisation. Il serait aussi intéressant d'explorer, par des expérimentations contrôlées avec de grands échantillons, certains mérites propres associés à cette nouvelle façon de concevoir l'utilisation de l'ordinateur, comme la possibilité pour les étudiants de modéliser un même phénomène plus rapidement, de modéliser un phénomène plus en profondeur dans une durée comparable, où l'équilibre entre la fréquence et la durée des épisodes de cheminements inductifs et déductifs. Enfin, la possibilité de suivre et d'évaluer automatiquement les épisodes de cheminements des étudiants nous permet d'envisager l'intégration à l'environnement développé, d'un système d'évaluation assistée par ordinateur permettant de produire des tâches d'évaluation différentes pour chaque étudiant – mais tout de même standardisées – en tenant compte des modélisations modernes issues de la théorie de la réponse aux items. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- ALTERS B.J. (1997). Whose Nature of Science? *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 34, n° 1, p. 39-55.
- ASTOLFI J.-P. (2005). La saveur des savoirs. *Cahiers pédagogiques*, n° 433, p. 2-3.
- ASTOLFI J.-P. & DROUIN A.-M. (1992). La modélisation à l'école élémentaire. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- BÉGIN R. (1997). Conception de la science et intervention pédagogique. *Spectre*, vol. 26, n° 2, p. 10-16.
- BACHELARD G. (1975). *La formation à l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BENSON H. (2004). *Physique I. Mécanique*. Saint-Laurent, Québec : ERPI.
- BERGER C.F., LU C.R., BELZER S.J. & VOSS B.E. (1994). Research on the Uses of Technology in Science Education. In D.L. Gabel (Éd.). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. Toronto, Ontario : Maxwell Macmillan Canada, p. 466-490.

- BLAIS J.-G. & RAÏCHE G. (2003). *Regards sur la modélisation de la mesure en éducation et en sciences sociales*. Sainte-Foy, Québec : Presses de l'université Laval.
- BUNGE M.A. (1975). *Philosophie de la physique*. Paris : Éd. du Seuil.
- CERVERA D. (1998). *Élaboration d'un environnement d'expérimentation en simulation incluant un cadre théorique pour l'apprentissage des fluides*. Thèse de doctorat inédite, université de Montréal, Montréal, Québec. Disponible sur Internet : [http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/1998\\_Cervera\\_These.pdf](http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/1998_Cervera_These.pdf) (consulté le 3 septembre 2006).
- DI SESSA A.A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and instruction*, vol. 10, n° 2, p. 105-225.
- FOURNIER F. (2001). *Un environnement d'apprentissage technologique pour la compréhension du concept de mesure en sciences expérimentales*. Thèse de doctorat inédite, université de Montréal, Montréal, Québec. Disponible sur Internet : [http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2001\\_Fournier\\_These.pdf](http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2001_Fournier_These.pdf) (consulté le 3 septembre 2006).
- JOSHUA S. & DUPIN J.-J. (1999). *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*. Paris : PUF.
- KUHN T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion.
- LAWSON A.E. (1994). Research on the Acquisition on Science Knowledge: Epistemological Foundations of Cognition. In D.L. Gabel (Eds). *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*. Toronto, Ontario : Maxwell Macmillan Canada, p. 131-176.
- LEGENDE R. (2005). *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal, Québec : Guérin.
- MARTINAND J.-L. (2002). Apprendre à modéliser. In R. Toussaint. *Changement conceptuel et apprentissage des sciences*. Montréal, Québec : Éditions Logiques, p. 47-68.
- MOREAU D., LESTERLIN B. & BEAUCHESNE S. (2004). Les communautés virtuelles éducatives. *Aster*, n° 39, p. 173-198.
- NONNON P. (1986). *Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur*. Thèse de doctorat publiée, université de Montréal, Montréal, Québec.
- NONNON P. (1993). Proposition d'un modèle de recherche développement technologique en éducation. In B. Denis & G.L. Baron (Éd.). *Regard sur la robotique pédagogique*. Liège, Belgique : université de Liège : INRP, p. 147-154.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- OSBORNE J. (1996). Beyond constructivism. *Science Éducation*, vol. 80, n° 1, p. 53-82.

- POTVIN P. (2002). *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*. Thèse de doctorat inédite, université de Montréal, Montréal, Québec. Disponible sur Internet : [http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2002\\_Potvin\\_These.pdf](http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2002_Potvin_These.pdf) (consulté le 3 septembre 2006).
- RAÏCHE G. (2004). Le testing adaptatif. In R. Bertrand & J.-G. Blais (Éd.). *Modèles de mesure – L'apport de la théorie de la réponse aux items*. Sainte-Foy, Québec : Presses de l'Université du Québec.
- RICHOUX B., SALVETA C. & BEAUFILS D. (2002). Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 842, p. 497-522.
- RIOPEL M. (2005). *Épistémologie et enseignement des sciences*. Chicoutimi : Les classiques des sciences sociales. Disponible sur Internet : [http://classiques.uqac.ca/contemporains/riopel\\_martin/epistemologie\\_ens\\_sciences/Epistemologie\\_enseign\\_sc.pdf](http://classiques.uqac.ca/contemporains/riopel_martin/epistemologie_ens_sciences/Epistemologie_enseign_sc.pdf) (consulté le 3 septembre 2006).
- RIOPEL M. (2005). *Conception et mises à l'essai d'un environnement d'apprentissage intégrant l'expérimentation assistée par ordinateur et la simulation assistée par ordinateur*. Thèse de doctorat publiée, Repentigny : EMR. Disponible sur Internet : [http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2005\\_Riopel\\_These.pdf](http://er.uqam.ca/nobel/r20507/publications/2005_Riopel_These.pdf) (consulté le 3 septembre 2006).
- TIBERGHIEU A., BUTY C. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). *La modélisation, axe prioritaire d'une approche théorique sur les relations entre enseignement et apprentissage*. Actes des troisièmes rencontres scientifiques de l'ARDIST. Disponible sur Internet : [http://ardist.aix-mrs.uifm.fr/actes/2003/203\\_16.pdf](http://ardist.aix-mrs.uifm.fr/actes/2003/203_16.pdf), p. 309-314 (consulté le 3 septembre 2006).
- VON GLASERFELD E. (2004). Introduction a un constructivisme radical. In P. Jonnaert & D. Masciotra (Éd.). *Constructivisme, choix contemporains*. Sainte-Foy, Québec : Presses de l'université du Québec, p. 11-36.
- WALLISER B. (1977). *Systèmes et modèles*. Paris : Éd. du Seuil.





# La simulation en chimie au sein du projet Microméga®

**Jean-François Le Maréchal**, UMR ICAR, groupe COAST (CNRS, université Lumière-Lyon 2, ENS Lyon, INRP, ENS-LSH); [lemarech@ens-lyon.fr](mailto:lemarech@ens-lyon.fr)

**Karine Bécu-Robinault**, UMR ICAR, groupe COAST (CNRS, université Lumière-Lyon 2, ENS Lyon, INRP, ENS-LSH); [karine.robinault@inrp.fr](mailto:karine.robinault@inrp.fr)

---

*Cet article analyse, du point de vue de la modélisation, un projet de recherche et de développement ayant mis au point, réalisé, et évalué un grand nombre de simulateurs en chimie. La relation avec les modèles enseignés et non enseignés est discutée, et une classification en termes de catégories d'objets de savoir perceptibles, reconstruits et théoriques est proposée. Des simulateurs de chaque type sont décrits, analysés et discutés du point de vue de la modélisation et de la représentation des connaissances. Cet article s'adresse à des chercheurs intéressés par la simulation à des fins pédagogiques, spécialement au niveau du lycée, et à des formateurs d'enseignants pour qu'ils y trouvent une façon de s'approprier et d'utiliser des simulateurs dans l'enseignement de la chimie.*

L'importance de la modélisation dans l'enseignement scientifique a été décrite à de nombreuses reprises (Martinand, 1992; Gilbert, 1993; Tiberghien 1994). Elle est souvent traduite par le fait que les modèles sont des produits de l'activité scientifique, permettant aux scientifiques de dépasser la simple description des faits, de mettre en relation la perception des phénomènes et le recours aux formalismes théoriques. Les modèles constituent un outil privilégié pour véhiculer les idées scientifiques entre chercheurs, ou entre l'enseignant et ses élèves, pour rendre compte, interpréter, ou prévoir les phénomènes. Leur apprentissage reste un enjeu majeur de l'enseignement, même si les élèves les laissent coexister avec leurs intuitions initiales (Scott, 1992). Les élèves sont rarement disposés à remplacer leurs propres modèles par ceux, plus théoriques (par exemple celui du gaz parfait), proposés par la science (Chi et al., 1994), car certains changements de modèles demandent des transformations ontologiques se traduisant par de profondes et coûteuses reconceptualisations. L'étude des modèles, incluant celle de leurs limites, doit être prise en charge pendant l'enseignement puisque les élèves sont rarement familiers avec les modèles scientifiques et leurs représentations métaphoriques (Duit, 1991).

Des outils tels que les logiciels de simulations permettent aux élèves de faire fonctionner ce type de connaissances et constituent à ce titre des atouts précieux.

Les novices utilisent fréquemment les traits de surface (notamment la couleur, la forme et les aspects dynamiques) des différentes représentations qui leur sont données à voir lors de l'enseignement pour essayer de construire une compréhension des phénomènes chimiques. Ils éprouvent des difficultés à franchir les frontières de ces différentes représentations et, plus encore, à les mettre en relation pour donner du sens aux traits de surface sur lesquels sont fondés leurs raisonnements (Harrison & Treagust, 2000; Kozma, 2003). Les représentations produites en laboratoire par les instruments (pH-mètre, conductimètre) n'échappent pas à cette constatation (Kelly & Crawford, 1996). Les logiciels de simulation, par la représentation synchrone d'évènements pertinents en relation et par la multiplicité des types de représentations possibles, constituent un outil de choix pour aider à vaincre ces difficultés liées à l'utilisation exclusive des traits de surface.

En chimie, différents types de modèles sont utilisés dans l'enseignement. Ils sont dits analogiques quand ils se réfèrent à des représentations concrètes, abstraites ou mixtes d'objets scientifiques et de théories en usage dans les manuels scolaires (Harrison & Treagust, 2000). Pendant plus d'un siècle, l'enseignement de la chimie et des modèles analogiques a utilisé papiers et crayons, craies et tableaux et, plus récemment, l'écran (Habraken, 2004).

Un groupe d'enseignants coordonné par un chercheur en didactique s'est posé la question de savoir s'il était possible de créer des situations d'enseignement de la chimie à partir de simulations sur les ordinateurs accessibles dans les établissements scolaires. L'objet de cet article est de décrire les aspects didactiques liés à la réalisation et à l'analyse des outils de modélisation et de simulation de ce projet<sup>1</sup>. Un point de vue sur la simulation va être fourni ainsi qu'un cadre théorique pour cette présentation. Les différentes catégories de simulateurs produits seront décrites; certains simulateurs ont donné lieu à des travaux de recherche dont les résultats seront rappelés brièvement. D'autres ont fait l'objet d'évaluations pédagogiques lors de leur utilisation en classe. Cet article se propose également de décrire la conception d'un ensemble intégré de simulateurs. La pertinence de certains simulateurs, pour l'apprentissage des modèles en chimie, a été montrée par des recherches qui sont évoquées. Pour cela, le contexte du travail va présenter les contraintes initiales et les choix qui ont prévalu à ce projet. Les principaux simulateurs développés au cours du projet sont ensuite décrits et analysés par type de connaissances mises en jeu.

---

<sup>1</sup> Ce projet, qui propose depuis septembre 2000 une collection de manuels scolaires associés à des cédéroms contenant une panoplie de simulateurs couvrant tous les domaines de la physique et de la chimie enseignée au lycée, est aujourd'hui connu dans la totalité des lycées français. Le taux d'utilisation des cédéroms est hétérogène, 75 % des enseignants interrogés déclarant ne jamais l'utiliser, d'autres n'utilisent que les simulateurs les plus classiques (simulateurs de titrage). La plupart des utilisateurs occasionnels ou réguliers étant satisfaits, il y a lieu de penser que les enseignants manquent de formation et d'information pour adopter une telle pratique.

## I. Contexte

En 1999, à l'origine de ce projet, il n'existait pas d'ensemble cohérent de simulateurs dédiés à l'enseignement de la chimie au niveau du lycée. Des outils de simulation avaient fait leur apparition sur le marché et sur la toile mais les seuls qui couvraient un large domaine de connaissances étaient conçus pour l'enseignement supérieur (simultit®, pour les titrages acide-base, d'oxydoréduction, ou par conductimétrie, fut certainement un des plus utilisés dès les années quatre-vingt-dix). Concernant l'enseignement secondaire, les outils se présentaient sous forme isolée et ne traitaient que d'un petit nombre de domaines. L'appropriation de ces outils, tant du point de vue de leur fonctionnement que de leurs objectifs, posait un problème important d'investissement personnel, tant pour l'enseignant que pour les élèves. Par ailleurs, la mise en cohérence avec le reste de l'enseignement (cours, travaux pratiques [TP], exercices) restait souvent un obstacle. Le projet Microméga® s'est attaqué à ces difficultés en cherchant à élaborer, à l'occasion de la réforme des programmes scolaires entamée en septembre 2000 en classe de seconde, un ensemble « livre élève + livre du professeur + cédérom » avec des simulateurs, des vidéos et un cours doté d'un moteur de recherche. Ce projet s'inscrivait dans la demande du texte du bulletin officiel de l'Éducation nationale (BO) stipulant que des activités associées à des *technologies de l'information et de la communication appliquées à l'enseignement* (TICE) devaient être proposées ponctuellement aux élèves. Le présent article limite son analyse aux simulations de chimie de ce large projet financé par les éditions Hatier.

Le choix du support cédérom et non d'un site Internet a été guidé par la difficulté technique des utilisateurs (dans les lycées et au domicile) à disposer, au début du projet, de possibilités de téléchargements suffisamment performantes. C'est également la garantie, pour l'enseignant prescripteur d'un travail utilisant ces TICE, d'avoir la maîtrise du contenu didactique dont l'élève dispose. En effet, un site *web*, évolutif par nature, n'offre pas cet avantage. Sept ans après, ce choix devrait être à nouveau débattu, ne serait-ce que parce que les pratiques enseignantes, tout comme l'accessibilité de la toile, ont évolué.

Le choix des simulations à créer a été guidé par la possibilité de manipuler des modèles, objets de l'apprentissage, pour interpréter des événements devenant dès lors simulables. Pour certains événements chimiques, des vidéos de quelques dizaines de secondes ont parfois été préférées, pour permettre à l'élève de visualiser la scène réelle dans les meilleures conditions possibles. Pour d'autres événements, des modèles permettant de réaliser des simulations ont été utilisés. Leur description et leur analyse font partie de l'objet de cet article.

Le choix de l'accompagnement des logiciels de simulations a été guidé par les possibilités d'utilisation visées par ce projet : en classe sous la conduite de l'enseignant au sein d'un cours, ou en classe sous la conduite de l'élève au sein d'une séance d'exercices ou de TP, ou enfin à la maison suite à la prescription ou non du

professeur, pour réviser, approfondir ou rattraper un enseignement. Chaque logiciel de simulation a donc été accompagné :

- d'un exercice tutorial appelé « *Prise en main* » guidant concrètement l'utilisateur de l'interface ;
- d'exercices corrigés mettant en jeu le simulateur ;
- d'une analyse dans le livre du professeur ;
- de renvois pertinents depuis le manuel de l'élève ou le cours implanté dans le cédérom.

Un site avec un forum de questions/réponses a également servi d'appui pour les élèves et les enseignants. *De facto*, il a surtout été utilisé par les élèves et essentiellement pour demander de l'aide dans les formes les plus classiques de l'utilisation des éléments du projet Micromega®, à savoir les exercices du manuel donnés à faire à la maison par le professeur.

De dimension variable au cours du projet, l'équipe qui a réalisé les livres et les cédéroms était constituée, par exemple en terminale, de 38 personnes (informaticiens, chercheurs, auteurs – pour la plupart des enseignants du niveau concerné – éditeurs, photographes, cinéastes, iconographes, dessinateurs...). Les contraintes du rythme d'installation des nouveaux programmes ont imposé que chaque année soient produits les livres pour l'élève, le professeur, et les cédéroms. Dans le cas de la terminale, cela correspond à 6 ouvrages couvrant la chimie, la physique, l'enseignement de spécialité ainsi qu'un cédérom élève et un cédérom professeur contenant l'ensemble de ces éléments. Ce rythme soutenu de production a conduit à réaliser les simulateurs suite à l'analyse du savoir à enseigner en relation avec les conceptions des élèves, et à en évaluer certains *a posteriori* après leur commercialisation définitive.

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Contraintes que doit respecter une simulation

Longtemps cantonnée au domaine de la recherche en physique, la simulation est apparue dans l'enseignement universitaire avant de trouver sa place dans les lycées, au domicile, sur Internet, etc. La simulation a depuis longtemps été reconnue comme permettant de montrer des expériences dangereuses, difficiles à réaliser, coûteuses, ou pour palier un manque d'équipement (Milner & Wildberger, 1974). C'est le cas dans cet article avec notamment l'étude de la conductimétrie ou de la spectrophotométrie, mais nous allons principalement utiliser la simulation pour illustrer le fonctionnement d'un modèle et ainsi en modifier l'introduction pédagogique. Des disciplines éloignées de la physique mais disposant de modèles, comme l'économie, y ont également recours.

La simulation (en physique) renvoie principalement à deux catégories de logiciels (Beaufils, Durey, Journeaux, 1997a, 1997b; de Jong & Van Jooligen, 1998) : les logiciels de simulation d'un phénomène ou d'un appareillage. Un tel classement devient bancal pour décrire les outils de simulation en chimie qui, fréquemment, impliquent des relations entre les mondes microscopique et macroscopique. À la fin de notre présentation théorique, nous proposerons un autre type de classement qui sera utilisé dans la suite de l'article.

La simulation nécessite la mise en œuvre de deux couches fondamentalement différentes de gestion de la connaissance.

- La plus profonde correspond au traitement des calculs réalisés par l'unité centrale de l'ordinateur. Elle nécessite, pour celui qui l'élabore, un traitement calculatoire des connaissances relatives au domaine simulé. Cette couche est transparente pour l'utilisateur et la question de savoir jusqu'à quel point celui-ci doit être informé de son contenu est source de débat. Cette question ne sera pas abordée dans cet article.

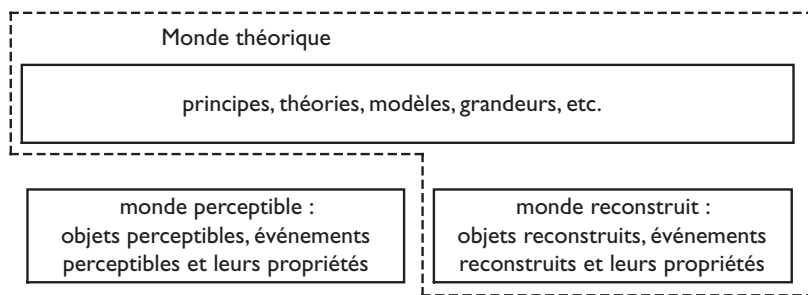
- La seconde gère l'affichage à l'écran des différentes représentations des connaissances mises en jeu. Elle rend ostensible le traitement de la couche profonde dans laquelle les résultats des calculs sont présents au sein de variables informatiques parfois très codées. Nous l'avons considérée d'un point de vue sémiotique proche de Duval (1995). Les registres sémiotiques utilisés dans cette couche sont notamment : le langage naturel, même si les termes utilisés sont peu courants (molécules, spectrophotomètre, etc.), le registre symbolique avec les formules et les équations chimiques, les représentations iconiques comme les schémas de molécules ou d'appareils, et les graphes. L'hypothèse d'apprentissage de Duval, initialement introduite pour les mathématiques, s'est montrée également pertinente pour l'apprentissage des sciences expérimentales (Bécu-Robinault, 1997). L'utilisation de chaque registre nécessite la mise en œuvre de connaissances spécifiques, de même que la coordination de ces différents registres. Ainsi, nous partageons avec Duval l'hypothèse que l'apprentissage d'un concept est lié à l'utilisation et à la coordination des registres sémiotiques qu'il met en jeu.

## **2.2. Gestion des connaissances par l'utilisateur**

Cette étude adopte un point de vue constructiviste (Tobin, 1993; Staver, 1998) et nous allons donc nous intéresser à décrire les connaissances en tant que rapport à des objets de savoirs institutionnels que les individus doivent développer pour eux-mêmes. L'utilisation du point de vue dit de la modélisation (Tiberghien, 1994; Bécu-Robinault, 1997), pour décrire à la fois la science et le fonctionnement des élèves sur la base des liens entre différents niveaux de connaissances (par exemple théoriques ou expérimentales), s'est révélé pertinente. Cette approche permet de rendre compte de l'écart entre le fonctionnement de l'élève et celui de la physique, et fournit ainsi un bon indicateur de l'apprentissage.

En chimie, il est essentiel de prendre en compte la description des objets et des événements au niveau microscopique si l'on souhaite aider les élèves à se construire un modèle explicatif. Les deux points de vue généralement utilisés en didactique considèrent soit l'apprentissage de la chimie comme la mise en relation d'un monde macroscopique, d'un monde microscopique et d'un mode symbolique (Jonhstone, 1993), soit, en l'adaptant, le point de vue de la modélisation (Le Maréchal, 1999). Ce dernier reprend une approche voisine de celle décrite précédemment pour le fonctionnement de la physique. Il considère que, dans le niveau théorique, certaines connaissances ont un statut d'objet, comme les atomes, les molécules ou les ions notamment. Nous considérons ces objets comme appartenant à un monde dit reconstruit (figure 1).

**Figure 1. Représentation des différents mondes perceptible, reconstruit et théorique permettant de catégoriser les connaissances mises en jeu en chimie par le savoir savant ou par les apprenants**



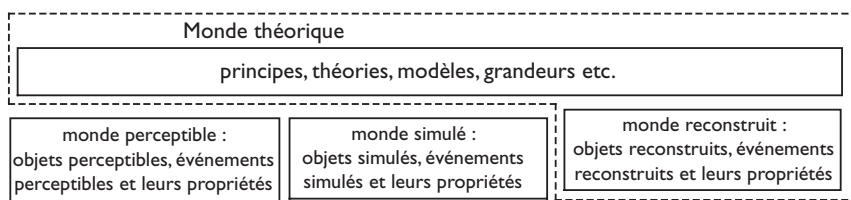
Constater qu'un mélange de liquide change progressivement de couleur est d'ordre perceptif. Décrire cet événement en termes d'ions, de molécules, de chocs entre particules, consiste à se placer dans le monde reconstruit. Des liens entre mondes perceptible et reconstruit doivent pour cela être établis. L'utilisation de théories, modèles ou grandeurs permet de prévoir comment évoluent les objets reconstruits, et donc ceux du monde réel.

Sur la base de cette catégorisation des connaissances, des interprétations de difficultés d'élèves ont pu être proposées (Gandillet *et al.*, 2003), des séquences d'enseignement ont ainsi été validées (Roux & Le Maréchal, 2003b). Cette catégorisation a également permis une meilleure compréhension de la relation entre le texte et l'image dans l'apprentissage à l'aide de films scientifiques (Pekdag & Le Maréchal, 2006). Dans ces travaux, comme dans la plupart de ceux qui adoptent le point de vue de la modélisation, l'apprentissage est décrit par la mise en relation de connaissances qui sont soit du même monde, soit de mondes distincts, que ces relations soient correctes ou non du point de vue du savoir savant.

Les chimistes sont friands de représentations matérielles comme les modèles moléculaires, qu'ils soient constitués d'objets (boules et bâtons, pâte à modeler et

allumettes), ou représentés en deux dimensions dans les livres. Ces modèles, qui rendent ostensibles les objets reconstruits, ont petit à petit été représentés sur les écrans d'ordinateur où ils ont pu s'animer et représenter ainsi des événements reconstruits. Les connaissances afférentes à ces représentations possèdent certains attributs du monde perceptible, alors que d'autres relèvent du monde reconstruit, au sens où ces représentations sont soumises aux mêmes lois que celles des objets reconstruits (rupture de liaisons chimiques en relation avec l'énergie du système, vitesse de déplacement en relation avec un paramètre de température). Il s'est révélé pertinent, pour décrire l'apprentissage, d'enrichir la figure 1 en considérant un monde simulé, isomorphe des mondes perceptible et reconstruit; un tel monde est constitué d'objets simulés, d'événements simulés et de leurs propriétés (figure 2). Une telle représentation des connaissances a permis notamment de mettre en évidence le type de connaissances utilisées par les élèves et le rôle du simulateur (Roux & Le Maréchal, 2003b).

**Figure 2. Les différents mondes perceptible, simulé, reconstruit et théorique permettant de décrire l'activité de l'élève dans une situation mettant en jeu une simulation d'évènements chimiques**



### 2.3. Hypothèse d'apprentissage

Nous formulons les hypothèses, maintenant largement partagées, que l'apprentissage d'une science consiste pour un apprenant à établir des relations entre différents mondes, et à coordonner les différents registres sémiotiques permettant de représenter les connaissances en jeu. Notre cadre théorique permet de préciser si ces relations sont établies au sein d'un même monde, ou entre mondes différents. Ces hypothèses sont à la base de la construction de logiciels de simulation qui vont permettre de créer les conditions favorables à l'articulation des nombreuses connaissances devant être simultanément introduites lors de l'enseignement de nouveaux modèles en chimie.

### 3. Analyse des simulations

De nombreux logiciels de simulations ont été développés dans le cadre du projet Microméga®, et un des objets du présent article est de les décrire en adoptant le point de vue de la modélisation exposé ci-dessus. Certains mettent en relation le monde simulé avec les seuls mondes perceptible ou reconstruit, d'autres mettent également

en jeu le monde théorique, voire les différents mondes. Cette approche est en adéquation avec nos hypothèses d'apprentissage, et permet à l'enseignant qui se les approprie de prendre conscience des difficultés des élèves et donc de les prévoir.

### 3.1. Simulation et monde perceptible

Les logiciels qui permettent d'afficher à l'écran des éléments simulés du seul monde perceptible concernent l'introduction de la chimie de laboratoire. La manipulation virtuelle d'objets perceptibles rencontrés en TP, essentiellement la verrerie, est possible grâce au simulateur *montage chimie*.

Montrer l'environnement dans lequel le chimiste travaille fut un souci des concepteurs des programmes du début de l'année de seconde. Un simulateur de montages expérimentaux de filtration, de distillation, d'extraction à la vapeur... permet de mettre en œuvre les connaissances relatives à ce type d'activités. Une liste de 14 pièces de verrerie (colonne à distiller, condenseur, ballon, entonnoir de filtration...) constituant des objets perceptibles est virtuellement à disposition à gauche de l'écran; leur activation, un par un, les font apparaître (figure 3). L'utilisateur peut les assembler jusqu'à constituer un montage expérimental de chimie. Seule la couche de représentation est utilisée par ce logiciel et aucune modélisation n'intervient. L'objectif d'un tel simulateur est la familiarisation avec le matériel, tant du point de vue de son utilisation que du vocabulaire associé. De telles connaissances semblent élémentaires mais ne sont pas toujours acquises par les étudiants même avancés dans leurs études universitaires. Le langage naturel et les représentations iconiques, seuls registres utilisés, sont activés soit lorsque l'utilisateur clique sur un bouton à gauche de l'écran, soit lorsque le montage est correct et que son nom s'affiche sous la mention « *nom du montage actuel* » en haut à droite. L'élève peut explorer librement le simulateur, ou se laisser guider par l'énoncé d'un exercice dont le texte s'affiche en bas à droite de l'écran.

Figure 3. Simulateur *montage Chimie*. Niveau seconde.





L'exercice dont le texte apparaît à droite demande que soit réalisé un entraînement à la vapeur, construit à gauche par l'utilisateur (Garcia, 2000).

### 3.2. Simulation et monde reconstruit

Montrer aux élèves des objets reconstruits tels que des atomes ou des molécules est une nécessité reconnue. Leurs représentations ne sont pas uniques et dépendent du modèle dans lequel on se place (modèle de Lewis ou modèle quantique). Les simulateurs peuvent fournir des représentations dans les différents modèles.

#### • Modèle quantique de l'atome

Dès la classe de seconde, les élèves doivent construire la notion d'atome en relation avec des connaissances aussi délicates que la structure électronique, en particulier à partir des représentations qui leur sont fournies par le professeur ou par les livres scolaires. Selon Justi et Gilbert (2001), les enseignants utilisent fréquemment des modèles hybrides peu pertinents pour l'apprentissage. Parmi les représentations de l'atome utilisées dans l'enseignement, Budde *et al.* (2002) en relèvent trois (modèle en couche, modèle planétaire et modèle probabiliste, figure 4) auxquels ils ajoutent celui de l'*electronium*. Ce dernier, qui constitue la contribution de ces auteurs, représente l'atome comme un liquide continu en dénonçant les deux premières représentations et en discutant la difficulté du modèle probabiliste. Au lieu de chercher à améliorer la compréhension du modèle quantique de l'atome en remplaçant les difficultés du modèle probabiliste par celui de l'*electronium*, nous avons cherché à lever certains obstacles liés à la représentation probabiliste.

**Figure 4. Différents modèles d'enseignement de l'atome (d'après Budde *et al.*, 2002)**



Dans le cadre de l'enseignement français, le modèle introduit en seconde présente l'atome comme un noyau entouré d'électrons. Le noyau est constitué de protons et de neutrons, notions incontournables pour introduire l'élément chimique et l'isotopie. Les électrons sont présentés comme constituant le cortège électronique, répartis en couches K, L et M. Les ordres de grandeurs du noyau et de l'atome doivent être donnés.

Nous avons estimé indispensable que la représentation choisie permette de confronter l'élève à la notion la plus difficile, qui n'est pas la structure du noyau pour laquelle les représentations des manuels sont satisfaisantes à ce niveau

d'enseignement, mais celle du nuage électronique. Ainsi, au regard des difficultés répertoriées des élèves, nous avons retenu les idées de structuration en couche, de probabilité de présence (et non de trajectoire), et de dimension par rapport au noyau (Harrison & Treagust, 2000 ; Budde *et al.*, 2002).

Le simulateur *e-couche* a été conçu pour permettre, à partir d'une représentation à deux dimensions, d'évoquer des notions qui sont généralement présentées séparément et que l'élève a du mal à articuler. Nous avons choisi de représenter la partie radiale  $R(r)$  des orbitales  $s$  occupées à l'état fondamental en fonction de la distance  $r$  au noyau, telle qu'elle est fournie par la relation de Slater<sup>2</sup> (Jean & Volatron, 2003) :

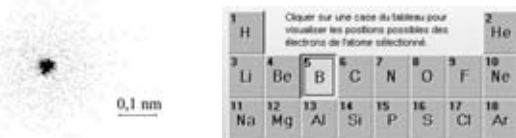
$$R(r) = N \frac{r}{a_0} \exp\left(\frac{-Z^* \cdot r}{n \cdot a_0}\right)$$

Cette relation est travaillée dans la couche profonde du simulateur pour l'atome que l'utilisateur souhaite avoir à l'écran. Les représentations qui en découlent (figure 5) sont représentées à différentes échelles, en visualisant éventuellement de façon séparée les différentes couches électroniques. Ce travail est réalisé par la deuxième couche du logiciel et permet d'obtenir une image en relativement bon accord avec le savoir que les chimistes théoriciens manipulent. L'élève peut se promener dans la classification périodique au sein de laquelle la comparaison des attributs des atomes est possible.

La simulation de l'atome est donc possible grâce à un modèle (celui de Slater). Il s'agit d'un exemple qui n'aurait pu être classé comme phénomène ou comme appareillage, selon la classification des simulations discutée précédemment (Beaufils, Durey & Journeaux, 1997a, 1997b ; de Jong & Van Jooligen, 1998).

Dans la figure 5, les points ici en gris (mais en couleur sur l'écran) correspondent aux positions probables d'un des électrons de la couche L ( $2s^2 2p^1$ ) et les points noirs à celles des électrons de la couche K ( $1s^2$ ). Le noyau de l'atome de dimension  $10^{-6}$  nm n'a même pas la taille d'un pixel de l'écran et n'est donc pas représenté (Garcia, 2000).

**Figure 5. Représentation de l'atome de bore par le simulateur *e-couche*. Niveau seconde**



2 Dans cette expression,  $a_0$  est le rayon de Bohr,  $Z^*$  la charge effective à laquelle est soumise un électron donné,  $n$  le numéro de la couche (nombre quantique principal) et  $N$  le coefficient de normalisation.

De telles exploitations du modèle quantique de l'atome doivent contribuer à éviter que ce dernier « *semble exempt de suivre certaines lois de la physique (comme celle de l'électrostatique)* » dans les représentations des élèves (Taber, 2001). Il est prévisible qu'une représentation correcte de l'atome sera susceptible de diminuer l'impact d'une telle pratique. Par ailleurs, Harrison et Treagust (2000) ont noté que les représentations des élèves présentent souvent de nombreuses incohérences : gros noyau (pour y loger tous ses protons et ses neutrons) entouré d'électrons (ou d'un nuage d'électrons) sans trace de ce qui pourrait représenter une quelconque structure (énergétique ou spatiale). Le danger tient à ce que ce type de représentation perdure dans les études : il a en effet été montré que la définition des orbitales atomiques et la nature de leur description mathématique par les étudiants est toujours source d'erreurs à l'université (Tsaparis, 1997).

La représentation choisie pour le simulateur *e-couche*, utilisable dès la classe de seconde, peut continuer à être utilisée à l'université pour introduire la classification périodique en relation avec les propriétés des atomes. Elle n'est pas porteuse d'ambiguïté sur les ordres de grandeur respectifs du noyau et de l'atome et doit permettre aux utilisateurs d'articuler les notions délicates de nuage et de couches électroniques dans le respect d'un modèle probabiliste.

#### • **Modèle de Lewis des molécules**

Parmi les deux seules descriptions de la liaison chimique, modèle des orbitales moléculaires et modèle de Lewis, seul ce dernier est introduit dans l'enseignement secondaire. Dès la classe de seconde quelques molécules (dont  $\text{CH}_4$ ) doivent être représentées. Au sein du projet Microméga®, le logiciel *Lewis* permet à l'élève de construire des molécules simples (jusqu'à 8 atomes), de les voir correctement représentées en haut à gauche de l'écran (avec ou sans les doublets non partagés en haut à droite, figure 6), et de les voir dans l'espace grâce à une animation qui permet la rotation aléatoire de la molécule en jeu (en bas à gauche).

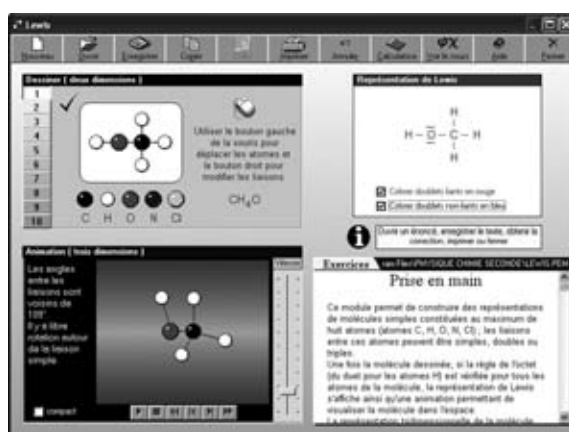
Des représentations statique et dynamique d'objets reconstruits comme les molécules nécessitent de disposer de différents modèles et de conventions pour les construire. Un modèle de la liaison chimique (ici Lewis) permet de contrôler que la molécule construite par l'utilisateur est acceptable. La règle de l'octet est utilisée pour déterminer le nombre d'électrons non partagés, et un modèle de dynamique moléculaire permet de déterminer autour de quelle(s) liaison(s) les différents fragments de la molécule peuvent tourner. Ces modèles fonctionnent au niveau profond de calcul du logiciel. Au niveau des représentations, d'autres informations issues des modèles de la chimie sont nécessaires, comme la façon de représenter les atomes et les doublets d'électrons.

Le passage de la représentation de Lewis (avec ou sans les doublets non partagés) à la représentation spatiale, dite de Cram, n'est pas trivial. Il est du même type que celui que Duval (1995) caractérise comme étant la coordination d'un registre

sémiotique à un autre. La présentation simultanée de ces représentations sur un même écran est donc susceptible d'aider à la construction des connaissances.

Les possibilités offertes à l'élève de se créer des images mentales en trois dimensions, grâce à l'utilisation de logiciels de représentation, et de voir la façon dont les atomes sont liés entre eux, ont été reconnues par Casanova (cité par Ealy, 1999) comme favorisant l'apprentissage. C'est le développement de l'intelligence spatiale des élèves qui est en jeu avec de telles représentations spatiales, incluant la mémoire visuelle, l'imagination visuelle, et les capacités à traiter l'information visio-spatiale (Habraken, 2004). Tous les attributs des boules des boîtes de modèles moléculaires (couleur des boules, liaisons compactes/éclatées, valence des atomes transposées au boules – voir la fenêtre en bas à gauche, figure 6) sont implémentés dans le logiciel avec, en outre, un contrôle de l'adéquation des molécules construites avec le savoir enseigné.

**Figure 6. Fenêtre du simulateur Lewis dans le cas où une molécule de méthanol  $\text{CH}_3\text{OH}$  est représentée. Niveau seconde (Garcia, 2000)**



### 3.3. Simulation et monde théorique

Le simulateur *Lavoisier* est conçu pour faire travailler les élèves de façon interactive sur les notions de stœchiométrie et d'avancement d'une réaction. Une équation chimique doit être écrite par l'utilisateur. Les quantités de matière des réactifs (et éventuellement des produits) doivent être également fournies à l'interface. L'animation montre sous forme d'histogramme dynamique l'évolution des quantités de matière en fonction de l'avancement de la réaction (figure 7). Les mondes perceptible et reconstruit ne sont pas représentés. Il s'agit d'un travail sur la stœchiométrie et sur l'avancement d'une réaction chimique, donc mettant en œuvre le seul niveau théorique, par l'intermédiaire d'un tableau d'avancement, outil dont les avantages et les limites ont été discutés (Le Maréchal *et al.*, 2004c).

La couche de calcul d'un tel simulateur utilise certains éléments du modèle de la réaction chimique, tels que les concepts de stœchiométrie et de conservation

de la quantité de matière. Elle renseigne la couche de représentation qui apparaît comme convertissant une représentation symbolique ( $\text{N}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ ) en une représentation iconique dynamique (le tableau).

**Figure 7. Équation chimique et tableau d'avancement pendant l'animation. Niveau seconde (Garcia, 2000).**

Equation chimique	$\text{N}_2$	+	$3\text{H}_2$	$\rightarrow$	$2\text{NH}_3$
Etat init.	1,0		2,0		0
Av. cours de la simulation	0,37533		0,12		1,26333
Etat fin.	0,33333		0		1,33333

La notion d'évolution d'une réaction chimique, symbolisée par la seule flèche , prend vie avec l'animation du tableau. Ce dernier est donc susceptible d'aider les élèves à s'approprier le traitement quantitatif des bilans de réactions chimiques. En effet, ils comprennent difficilement que la quantité de matière totale change au cours d'une réaction (Kousathana & Tsaparlis, 2002). Par exemple sur la figure 7, la quantité totale (3 mol) présente à l'état initial n'est plus que 1,75 mol à l'instant figé sur la figure, et vaut 1,67 mol à l'état final. Il apparaît également que la réaction a lieu même si les quantités de matière initiales (ici 1,0 et 2,0) diffèrent des nombres stœchiométriques (1 et 3). Le tableau montre également que le réactif initialement le plus abondant (ici  $\text{N}_2$ ) est en fait limitant. La dynamique de la simulation en fait apparaître la raison : il disparaît plus vite que l'autre réactif.

### 3.4. Simulation articulant mondes perceptible et théorique

L'utilisation du niveau théorique est nécessaire dès qu'il faut articuler des grandeurs. Le caractère relationnel de celles-ci impose que leur apprentissage fasse intervenir un ensemble de connaissances théoriques ainsi que les situations de référence sans lesquelles elles ne peuvent prendre sens (Vergnaud, 1990; Lemeignan & Weil-Barais, 1993). Il est peu fréquent, en chimie, de mettre en relation les mondes perceptible et théorique sans faire appel au monde reconstruit. Dans le cas d'une simulation, ce dernier peut être remplacé par le monde simulé. Il en résulte une diminution de la surcharge cognitive (Chandler & Sweller, 1991) qui peut être mise à profit pour étudier les titrages, ou découvrir différents instruments (pH-mètre, conductimètre...).

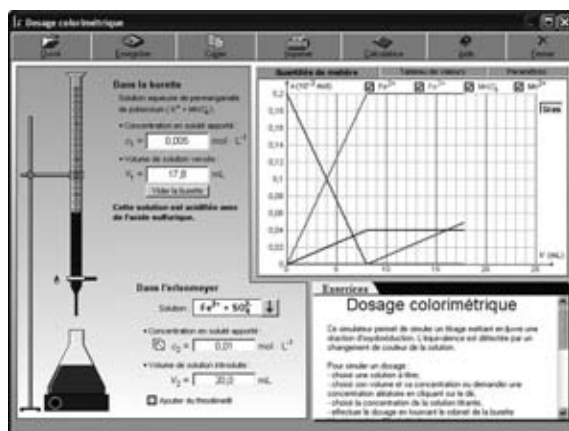
#### • Titrages

Des logiciels permettant de simuler des titrages ont été développés dès les années 1980, par exemple avec Simultit®. Dans le projet Microméga®, il a été nécessaire de réaliser un développement comparable, limité aux connaissances listées dans le programme et respectant les conditions d'intelligibilité et de plausibilité de Hewson (1981, 1982). Les connaissances mises en jeu dans les simulations de titrages se limitent à quelques réactions chimiques que l'élève choisit par l'intermédiaire du réactif à titrer (ion fer (II), acide oxalique, peroxyde d'hydrogène,

diode, ion nitrite ou ion thiosulfate) dans le cas de la simulation de titrages par oxydoréduction en première S.

Des connaissances identiques à celles utilisées pour le simulateur Lavoisier®, liées à la réaction chimique, sont activées dans la couche de calcul, mais la couche de représentation est au service de représentations fort différentes (figure 8). Le suivi en temps réel de la composition du système étudié apparaît, au choix, sous forme graphique (en haut à droite de l'écran) ou dans un tableau de valeurs (à la place du graphe, à la demande de l'utilisateur). La réflexion sur l'objet central de l'étude (la réaction chimique) devient possible avant que l'élève ne soit capable de réaliser de fastidieux calculs d'avancement. L'évènement chimique simulé, constitué de la coloration de la solution à l'équivalence, intervient au même moment que la rupture des pentes du graphe et informe l'utilisateur sur le monde reconstruit, ce qui ne peut être possible avec un titrage réel.

Figure 8. Simulateur dosage colorimétrique. Niveau première (Garcia, 2001)



Comme cela a été précédemment expliqué, différentes représentations reliées au titrage sont présentées simultanément :

- les objets et les évènements simulés, à gauche de l'écran, évoquant les objets et évènements perceptibles qui constituent la base du travail de l'élève en TP ;
- les grandeurs qui permettent aux élèves de mettre en relation les mondes perceptible et reconstruit avec le monde théorique, et leurs valeurs numériques choisies pour la simulation ;
- la représentation graphique des quantités de matière, c'est-à-dire une représentation des quantités d'objets présents dans le système chimique ;
- et, pour les simulateurs utilisés en terminale S, les représentations du pH et des autres grandeurs.

Ce qui est donné à voir ou à paramétrer permet donc d'activer l'essentiel des connaissances à mettre en oeuvre sur le sujet et, de ce fait, est susceptible d'en favoriser l'apprentissage.

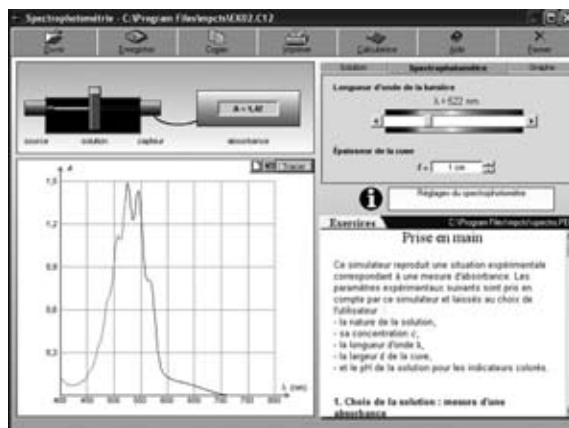
• **Découverte d'un instrument**

Au niveau de la classe de terminale, l'enseignement de l'usage d'un instrument de mesure, tel qu'un spectrophotomètre, nécessite la découverte de manipulations d'objets perceptibles (cellules de mesure, instrument lui-même) en relation avec tout un système de connaissances théoriques (absorption de la lumière, relation entre les grandeurs absorbance et concentration en chromophore). Le point de vue retenu pour le développement d'un tel logiciel de simulation fut lié aux recommandations des programmes qui orientent l'enseignement vers la compréhension de la réaction chimique (Le Maréchal, 2004) et non vers un quelconque développement technologique.

La simulation d'un spectrophotomètre s'est limitée, par l'intermédiaire de représentations appropriées, à rendre ostensibles les seules grandeurs avec lesquelles l'élève doit construire des connaissances sur la vitesse d'une réaction chimique : absorbance, largeur de cellule, concentration, longueur d'onde et pH. D'autres grandeurs familières en spectrophotométrie : nombre d'onde, énergie notamment n'apparaissent pas avec ce simulateur puisqu'il n'est pas nécessaire de les faire intervenir au regard du programme de la classe de terminale S. L'élève peut choisir la solution à étudier (parmi 14 solutions colorées), sa concentration dans la gamme  $10^{-6} - 10^{-1}$  mol. L<sup>-1</sup>, la dimension de la cuve d'analyse et le pH dans le cas d'un indicateur coloré. Une fois choisie l'expérience à réaliser – mesure de l'absorbance en fonction de la longueur d'onde (il s'agit de spectre  $A = f(\lambda)$ ), ou en fonction de la concentration (par exemple pour effectuer un étalonnage ou utiliser la loi de Beer-Lambert respectivement) – l'élève peut voir le spectrophotomètre simulé en action (figure 9).

Une fois que l'élève a paramétré la simulation en choisissant le système coloré à étudier et sa concentration, quatre événements se déroulent simultanément sur l'interface : le déplacement d'un curseur sur un axe de longueurs d'onde en haut à droite de l'écran (l'axe est matérialisé par une double bande aux couleurs de l'arc-en-ciel), la valeur de l'absorbance  $A$  en haut à gauche, le tracé du spectre correspondant en bas à gauche, et la traversée par la lumière incidente et transmise de la cellule contenant la solution colorée en haut à gauche. Cet ensemble synchrone d'événements, représentés à l'aide de différents registres sémiotiques, est censé permettre à l'élève d'articuler des connaissances relatives aux concepts en jeu dans les situations utilisant la spectroscopie électronique. La couche de représentation du logiciel simule simultanément des objets perceptibles en relation avec le monde théorique, pour mettre l'élève dans les conditions de créer des relations qui, selon nos hypothèses, sont sources d'apprentissage.

**Figure 9. Simulation d'un spectrophotomètre enregistrant le spectre d'une solution de permanganate de potassium. Niveau terminale S (Garcia, 2002)**



Pour réaliser un tel simulateur, il a fallu déterminer, dans la plage de longueur d'onde considérée (400 – 800 nm), la valeur des coefficients d'absorption molaire des différentes espèces que l'on souhaitait rendre disponibles avec l'interface. La loi de Beer-Lambert supposée vérifiée dans le domaine de concentration autorisé permet de reconstituer tous les spectres possibles.

#### • Expériences de laboratoire

La réalisation d'expériences de laboratoire, telles que la préparation de solutions ou le suivi de la cinétique d'estérifications ou d'hydrolyses, met en jeu des objets perceptibles (le matériel de laboratoire et les produits chimiques en jeu) et des grandeurs. Leur simulation a été réalisée grâce aux logiciels *Minilabo*<sup>®</sup> et *Estérification*<sup>®</sup> respectivement. À chaque fois, une représentation du matériel de laboratoire et des menus déroulants permettant de déterminer les produits chimiques et leur concentration, les volumes... sont proposés.

Dans le cas de *Minilabo*, il s'agit de simuler la préparation de solutions de concentration et de volume à partir de produits chimiques solides ou en solution, et du matériel usuel de laboratoire. Les grandeurs en jeu sont donc la concentration, le volume et la quantité de matière, pour lesquelles les difficultés d'apprentissages ont été rapportées (Furio *et al.*, 2000; Gandillet *et al.*, 2003; Gandillet & Le Maréchal, 2003). En permettant de multiplier les situations de préparation de solutions, le simulateur doit participer à réduire ces difficultés. Il entraîne en outre l'élève à se familiariser avec les techniques de dissolution et de dilution (utilisation du matériel et des calculs de concentration).

Dans le cas d'*Estérification*, il s'agit de simuler : les réactions d'un alcool avec un acide ou un anhydride d'acide carboxylique, d'hydrolyse acide ou basique d'un ester, avec ou sans catalyseur, à différentes températures, et avec ou sans distillation



du produit le plus volatile. Les quantités de matière dans les conditions initiales et la classe de l'alcool sont également laissées au choix de l'utilisateur. Le logiciel de simulation donne accès, sous forme d'un graphe ou d'un tableau, à la quantité de matière d'un ou de plusieurs constituants du système chimique en fonction du temps. Les connaissances de base sur la cinétique chimique, en particulier les facteurs cinétiques, sont mises en jeu dans cette simulation, ainsi que celles relevant de l'avancement d'une réaction chimique et du bilan de matière. Les limitations d'une telle simulation sont liées à l'absence de loi générale permettant de prévoir la vitesse de réaction d'une réaction chimique quelconque. Cette difficulté a été contournée en considérant quelques données expérimentales généralisées, au moyen de lois approximatives, à l'ensemble des situations autorisées par le simulateur.

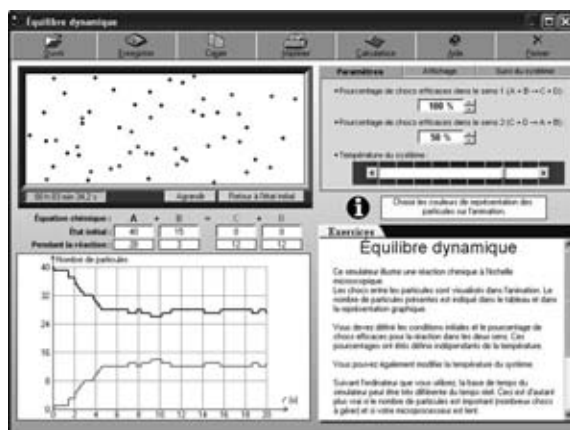
### 3.5. Simulation articulant mondes reconstruit et théorique

Les simulations qui représentent simultanément des objets ou des événements reconstruits avec des grandeurs et des lois, sont particulièrement adaptées pour des études quantitatives de représentations de molécules et/ou de représentation chimique. Le programme de terminale S suggère un tel travail en relation avec un développement, du point de vue microscopique, de la cinétique chimique. Les notions de chocs efficaces ou inefficaces, de facteurs cinétiques (concentration ou température), en relation avec l'évolution temporelle de l'avancement chimique sont considérées au sein du simulateur *Équilibre dynamique*.

#### • Équilibre dynamique

La simulation est basée sur l'animation d'un nombre limité à 1 000 entités A, B, C et D en haut à gauche de l'écran, reliées par l'équation chimique  $A + B = C + D$ . Chaque entité est représentée par un petit disque coloré dont les déplacements sont gérés par les lois de la cinétique des gaz. Les chocs sont considérés élastiques et la réaction athermique. La transformation  $A + B \rightarrow C + D$ , supposée être un acte élémentaire, est contrôlée par le pourcentage d'efficacité des chocs A/B fixés entre 0 et 100 % par l'utilisateur, en haut à droite de l'écran (figure 10). La transformation inverse  $C + D \rightarrow A + B$  est traitée simultanément, indépendamment, et de la même manière. En plus de l'animation, l'interface actualise en permanence les nombres de A, de B, de C et de D restant à l'instant t et, aux choix de l'utilisateur, le graphe ou le tableau de valeurs correspondant (en bas à gauche). De plus, en option, le rapport des quantités  $\frac{n(C) \cdot n(D)}{n(A) \cdot n(B)}$  est affiché.

Il est égal à ce qui est défini comme quotient  $Q_r$  de la réaction simulée et il correspond au  $Q_r$  thermodynamique d'une réaction chimique (Le Maréchal, 2004).

Figure 10. Simulateur *Équilibre dynamique*. Niveau terminale (Garcia, 2002)

La couche de calcul d'un tel logiciel est soumise à rude épreuve. Les coordonnées d'un grand nombre de particules doivent être gérées en temps réel afin de détecter celles qui entrent en collision. Il s'agit de relier deux modèles distincts de la réaction chimique, l'un au niveau macroscopique (avancement, stœchiométrie) peu différent de ce que Lavoisier a proposé à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, et l'autre au niveau statistique (théorie des collisions élaborée au XX<sup>e</sup> siècle). Grâce à cette richesse, la couche de représentation peut proposer une variété de représentations des données : l'animation, le tableau donnant le bilan de matière à la date courante, le graphe et le tableau des quantités de matière en fonction du temps.

Les experts sont capables de connecter les multiples représentations d'un système complexe et de coordonner leurs caractéristiques pour supporter leurs discours (Kozma, 2003). Les étudiants doivent peu à peu acquérir cette faculté. Les aider à réaliser ce type de connections est un défi important à relever pour une utilisation effective des multiples représentations et une amélioration de la compréhension scientifique (Kozma & Russell, 1997).

Des travaux de recherche spécifiques à l'utilisation de ce simulateur ont permis de mettre en œuvre des situations d'apprentissage<sup>3</sup> au cours desquelles ces connections avaient lieu (Roux & Le Maréchal, 2003a). Quatre binômes d'élèves ont été filmés pendant toute la durée d'une séquence d'enseignement (en classe de terminale) et les comptes rendus de l'ensemble de la classe ont confirmé les analyses effectuées sur les 8 élèves. Les données recueillies ont montré que les élèves avaient une certaine aisance à évoquer une réaction chimique en utilisant les couleurs et l'animation, et qu'ils mettaient en œuvre la correspondance entre les chocs efficaces et l'avancement de la réaction. Les paramètres influençant le sens d'évolution du système chimique (constante d'équilibre et conditions initiales

3 Les textes des activités proposées aux apprenants sont disponibles sur Internet : [http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/sesames/outils\\_terminale.html](http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/sesames/outils_terminale.html) (consulté le 4 septembre 2006).

du système) ont été introduits dans une activité. L'utilisation de la simulation s'est révélée être un puissant outil de création d'un modèle mental pertinent chez les élèves qui ont ainsi pu donner du sens à des notions délicates comme le temps de demi-réaction ou les facteurs cinétiques. À la suite d'une telle recherche, l'efficacité de l'apprentissage de la modélisation (estimée par la quantité de relations entre connaissances établies par les élèves) d'une telle séquence d'enseignement a également été confirmée par quelques enseignants utilisateurs sur plusieurs années. L'utilisation de ce type de simulateur est une aide pour lutter contre une conception telle que « *la vitesse de la réaction dans le sens direct augmente une fois que la réaction a commencé* » (Hackling & Garnett, 1985).

### **3.6. Simulation articulant mondes perceptible, reconstruit et théorique**

Le lien entre les niveaux reconstruit et théorique peut aussi déboucher sur une compréhension du monde perceptible. Les logiciels de simulations se doivent de prendre en compte ce lien, par exemple en présentant simultanément différentes caractéristiques d'un même événement, aux niveaux perceptible et reconstruit. Le choix de changer de modèle est une liberté que se donnent les scientifiques et on fait l'hypothèse qu'elle est favorable pour l'apprentissage.

Cet entraînement à l'articulation de différents niveaux d'interprétation a été implémenté dans le projet avec des simulations du gaz parfait (logiciel *Avogadro*®), du comportement de systèmes électrochimiques (logiciel *Pile et électrolyseur*®) ou d'étude des aspects thermiques des réactions chimiques (logiciel *Calorimétrie*®).

#### **• Le gaz parfait**

La simulation au niveau microscopique d'un gaz parfait relève du même principe que celui du simulateur *Équilibre dynamique*® décrit ci-dessus, mais les particules simulées ne se transforment pas lors de chocs. Le modèle du gaz parfait l'interdit. De plus, au lieu de quatre entités chimiques, seules deux sont représentées, correspondant à  $N_2$  et  $O_2$  dans les proportions de l'air. Les grandeurs d'état  $p, V, n$  et  $T$  sont accessibles, paramétrables et en relation avec des représentations d'objets perceptibles (piston, réserve d'air ou de vide, thermomètre). De nombreuses activités utilisant ce simulateur ont été réalisées en classe<sup>4</sup> ou décrites (Le Maréchal *et al.*, 2004a, 2004b).

#### **• Piles et électrolyseurs**

Les piles et les électrolyseurs au programme de terminale S permettent d'étudier certains aspects des réactions chimiques d'oxydoréduction, en particulier la notion de transformation spontanée ou forcée prise en charge par le simulateur. Les difficultés sur le déplacement des porteurs de charges (Garnett & Treagust, 1992) sont gérées par des représentations au niveau microscopique.

---

<sup>4</sup> Disponible sur Internet : <http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/sesames/> (consulté le 4 septembre 2006).

Le modèle manipulé dans la couche de calcul se limite à mettre en œuvre la relation entre la charge, l'intensité et le temps, en relation avec l'avancement de la réaction électrochimique considérée (loi de Faraday). La couche de représentation est en revanche plus complexe à mettre en œuvre puisque la représentation doit faire apparaître le bon nombre d'électrons pour chaque molécule ou ion impliqué dans les réactions, aux électrodes notamment. L'interface permet d'afficher, au choix, une situation de pile ou d'électrolyse mettant en jeu deux électrodes, d'aluminium, de cuivre, de fer, de graphite ou de zinc, plongeant dans une solution contenant les ions correspondants. Les utilisateurs décident de la nature des électrodes et de la concentration des ions. Dans le cas d'une pile débitant à courant constant jusqu'à l'épuisement du réactif limitant : (i) le comportement d'un objet perceptible (pile ou électrolyseur) est représenté par la diminution/augmentation de volume d'une électrode consommée/produite, la coloration/décoloration progressive d'une solution est représentée, (ii) le comportement reconstruit en terme d'ions, de molécules et d'électrons est également représenté par une animation montrant leur déplacement, (iii) et du point de vue théorique, l'intensité du courant débité et la concentration des ions sont affichés à chaque instant.

Un tel simulateur rend possible une description des porteurs de charge permettant de limiter les raisonnements linéaires (Viennot, 1993), l'animation mettant en évidence la simultanéité des événements. Il permet également le travail quantitatif délicat de l'électrochimiste mettant en œuvre les relations chimie/électrocinétique entre la stœchiométrie de la réaction associée à la transformation électrochimique, le courant mesuré et la charge électrique.

#### • Calorimétrie

Les notions de chaleur, de température et d'énergie sont considérées avec le simulateur *Calorimétrie*<sup>®</sup>, principalement dans le cas des combustions d'hydrocarbures et d'alcools. Elles sont reconnues comme sources de difficultés pour les élèves qui considèrent que ces différentes grandeurs sont équivalentes (Wiser & Carey, 1983). Cela peut les empêcher de résoudre des problèmes simples correspondant à des situations de la vie de tous les jours (Harrison et al., 1999).

Une réaction (exothermique) parmi huit peut être choisie sur l'interface. Elle peut être représentée avec un registre graphique soit par quelques modèles moléculaires, avec autant de molécules que la stœchiométrie le requiert, soit avec un registre symbolique par des quantités de matière en des proportions non nécessairement stœchiométriques. Pour chacun de ces registres, une représentation énergétique du système est proposée.

Dans le cas du modèle moléculaire, l'énergie d'un tel système chimique est présentée sous forme d'un histogramme gradué en  $10^{-18}$  J dont la valeur varie à chaque fois qu'une liaison est rompue ou formée lors d'une animation. Celle-ci reflète la méthode habituelle de détermination d'une chaleur de réaction au moyen

des énergies de liaison. Ces dernières sont également affichées sur l'écran. Cette partie de l'interface constitue une relation entre le monde reconstruit et le monde théorique.

Une autre partie de l'interface nécessite une définition molaire des conditions initiales et représente le système chimique et son milieu extérieur équipés chacun d'un thermomètre et d'une échelle d'énergie. L'évolution qualitative de l'un et de l'autre, suivant que le système chimique a été défini comme isolé ou non, met en jeu les grandeurs chaleur, température, énergie et quantité de matière. Il s'agit cette fois d'une relation entre les mondes perceptible et théorique.

Trois études de cas d'élèves filmés au long d'une séquence d'enseignement en première S, confirmées par l'analyse des comptes rendus de deux classes, ont montré que les élèves travaillant avec le logiciel *Calorimétrie*® construisent des connaissances reconnues comme difficiles à mettre en œuvre (El Bilani & Le Maréchal, 2005, 2006). Par exemple, à partir des notions d'énergie et de liaison chimique encore floue pour les élèves, la notion d'énergie de liaison peut être définie par les élèves eux-mêmes avec parfois une remarquable précision. Ils constatent également à quelles conditions la température d'un système chimique peut augmenter alors que son énergie reste constante. La couche de calcul de ce logiciel gère un modèle constitué à la fois du calcul de l'avancement  $\xi$  d'une réaction (d'enthalpie de référence  $\Delta_r H^\circ$ ), et le calcul de la chaleur  $Q$  susceptible d'être échangée ( $Q \xi \Delta_r H$ ). Grâce à la couche de représentation utilisant deux registres sémiotiques importants en chimie, les élèves construisent des connaissances en relation avec ces modèles.

#### 4. Discussion

La description des simulateurs développés au cours des cinq années du projet montre que l'organisation des connaissances, leur représentation et leur mise en œuvre ont pu respecter les hypothèses d'apprentissage, malgré la grande variété des situations modélisées. Lorsque l'objet d'apprentissage est un objet perceptible (comme un montage de chimie) ou reconstruit (comme un atome ou une molécule), les principales connaissances *a priori* connexes à cet objet sont représentées sur l'écran et l'utilisateur peut agir sur la représentation de l'une d'elles et voir l'effet produit sur l'objet. Quand un événement perceptible (comme un titrage ou la réalisation d'un spectre) ou reconstruit (comme la modélisation moléculaire d'une réaction chimique) est au cœur de l'apprentissage, le modèle sous-jacent à l'évènement peut être interrogé par l'utilisateur qui a accès à différentes variables (espèces chimiques, concentration, température) et plusieurs représentations de l'évènement (graphe, animation, changement de couleur) sont simultanément mises en œuvre. Les conditions sur la mise en relation de différents niveaux de connaissances (Tiberghien, 1994; Le Maréchal 1999; Bécu-Robinault, 2004) et sur leur

représentation (Duval, 1995) sont réunies pour que l'apprentissage ait lieu. Le pari effectué à l'origine du projet de disposer d'un ensemble cohérent de simulateurs a donc été tenu.

Il ne faut pourtant pas tout attendre des logiciels de simulations. Un frein à l'apprentissage peut émerger si le modèle apparaît trop réel, incitant l'élève naïf à ne pas aller au-delà de ce qui lui est présenté (Harrison & Treagust, 2000). Il faut donc veiller à conserver une multiplicité de modèles et un atome doit être tout à la fois représentable par un symbole, une boule ou un noyau entouré d'un nuage d'électrons par exemple. L'ensemble des simulateurs, avec *e-couche* et *Lewis* par exemple, respecte cette multiplicité de représentations indispensables à l'apprentissage. Un autre inconvénient d'une large utilisation de logiciels de simulation en classe a été décrit par Ealy (1999) : il en résulte une faible prise de notes pendant ce type d'activité, même si le taux de participation des élèves est fort. Cela a conduit, dans son étude, à une faible performance aux évaluations traditionnelles de fin de trimestre. Il est suggéré qu'un enseignement pour lequel les discours sont remplacés par une abondance de graphiques et de représentations soit évalué par des exercices autres que ceux nécessitant l'acquisition de procédures algorithmiques.

L'aptitude à la modélisation ne s'apprend pas comme du contenu. Il faut de la pratique sur une longue période (Harrison & Treagust, 2000). Un cédérom plaçant l'élève en situation d'autonomie est donc un atout supplémentaire pour l'élève qui souhaite progresser à son rythme. De plus, c'est l'opportunité de travailler avec des exercices d'un style différent de ceux des manuels scolaires, en mettant en jeu des simulations. D'après Niaz (2001), les problèmes proposés dans les manuels scolaires ne sont pas suffisants pour exploiter le potentiel des élèves à réaliser des changements conceptuels progressifs.

## 5. Conclusion

L'objectif de cet article était de décrire, sur la base de quelques hypothèses d'apprentissage, l'implémentation de modèles dans des simulations. Ces hypothèses relevaient d'une catégorisation homogène des connaissances selon leur lien avec les mondes perceptible, reconstruit et théorique. Nous avons pu décrire cette élaboration en considérant une couche de calcul qui faisait fonctionner les modèles, et une couche de représentation qui empruntait à différents registres sémiotiques. La force pédagogique de la manipulation des modèles grâce aux simulations est susceptible de conduire à des restructurations profondes de la connaissance allant bien au-delà de leur simple accréation. L'interrogation des modèles par les élèves au cours de situations favorisant la création de modèles mentaux doit permettre à la modélisation de devenir une manière de penser et pas seulement une façon savante de nommer les objets du monde matériel. Même

si les anciennes conceptions sont toujours présentes, les simulations peuvent donner aux modèles enseignés un champ plus large d'utilisation. Bien que les simulations étudiées laissent beaucoup d'autonomie aux élèves, il ne faut pas perdre de vue que les modèles mis en œuvre par les simulateurs ont un côté arbitraire qui doit être débattu. Cet aspect de l'introduction de ce type d'outil majeur pour la construction scientifique reste complètement à la charge de l'enseignant. Il en est de même pour faire comprendre la nécessité d'utiliser de multiples modèles pour interpréter les phénomènes étudiés. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- BEAUFILS D., DUREY A. & JOURNEAUX R. (1987). La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : quelles simulations ? In *Modèles et simulations*. Actes des 9<sup>e</sup> journées sur l'éducation scientifique.
- BEAUFILS D., DUREY A. & JOURNEAUX R. (1987). La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : quelques aspects didactiques. In *Modèles et simulations*. Actes des 9<sup>e</sup> journées sur l'éducation scientifique.
- BEAUFILS D. & RICHOUX B. (2003). Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique. *Didaskalia*, n° 23, p. 9-38.
- BÉCU-ROBINAULT K. (1997). Activité de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction expérimentale du concept de puissance. *Didaskalia*, n° 11, p. 7-38.
- BÉCU-ROBINAULT K. (2004). Raisonnements des élèves en sciences physiques. In E. Gentaz & P. Dessus (Éd.). *Comprendre les apprentissages, sciences cognitives et éducation*. Paris : Dunod, p. 117-132.
- BUDDE M., NIEDDERER H., SCOTT P. & LEACH J. (2002). "Electronium": a quantum atomic teaching model. *Physics Education*, vol. 37, n° 3, p. 197-203.
- CHANDLER P. & SWELLER J. (1991). Cognitive load theory and the format of instruction. *Cognition and Instruction*, vol. 8, n° 4, p. 293-332.
- CHI M.T.H., SLOTTA J.T. & DE LEEUW N. (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, n° 4, p. 27-43.
- JONG (de) T. & VAN JOOLINGEN W.R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, n° 68, p. 168-202.
- DUIT R. (1991). On the role of analogies and metaphors in learning science. *Science Education*, n° 75, p. 649-672.

- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine : registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Bern : Peter Lang.
- EALY J.B. (1999). A student evaluation of molecular modeling in first year college chemistry. *Journal of Science Education and Technology*, vol. 8, n° 4, p. 309-321.
- EL BILANI R. & LE MARÉCHAL J.-F. (2005). L'articulation entre anciennes et nouvelles connaissances : énergie d'un système chimique enseigné au moyen d'un TICE. *Actes des 4<sup>e</sup> rencontre de l'ARDIST*, Lyon, octobre 2005. Disponible sur Internet : <http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/actes/2005/actes.pdf> (page 143) (consulté le 18 octobre 2006).
- EL BILANI R. & LE MARÉCHAL J.-F. (2006). Autonomie et motivation lors de l'apprentissage avec un simulateur. *Didaskalia*, soumis.
- FURIO C., AZCONA R., GUIASOLA J. & RATCLIFFE M. (2000). Difficulties in teaching the concepts of "amount of substance" and "mole". *International Journal of Science Education*, n° 22, p. 1285-1304.
- GANDILLET E., DUPONT C. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). *Students' gestures as an extra observable to scaffold the « Entity-Quantity » alternative conception for ionic solutions chemistry*. ESERA conference, The Netherlands, août 2003.
- GANDILLET E. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). Conceptions et chimie des solutions ioniques. *Actes des 3<sup>e</sup> Rencontre de l'ARDIST*, Toulouse, Octobre 2003. Disponible sur Internet : [http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/actes/2003/203\\_13.pdf](http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/actes/2003/203_13.pdf) (page 19) (consulté le 18 octobre 2006).
- GARCIA G. (2000). *Physique et Chimie en Seconde, cédérom élève*. Micromega®. Paris : Hatier.
- GARCIA G. (2001). *Physique et Chimie en Première S, cédérom élève*. Micromega®. Paris : Hatier.
- GARCIA G. (2002). *Physique et Chimie en Terminale S, cédérom élève*. Micromega®. Paris : Hatier.
- GARNETT P.J. & TREAGUST D.F. (1992). Conceptual difficulties experienced by senior high school students of electrochemistry : Electric circuits and oxidation reduction equations. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 29, p. 121-142.
- GILBERT J.K. (Ed.) (1993). *Models and modelling in science Education*. Hatfield, Herts : Association for Science Education.
- HABRAKEN C.L. (2004). Integrating into chemistry teaching today's student's visuospatial talents and skills, and the teaching of today's chemistry's graphical language. *Journal of Science and Technology*, vol. 13, n° 1, p. 89-94.



- HACKLING M.W. & GARNETT P.J. (1985). Misconceptions of chemical equilibrium. *European Journal of Science Education*, n° 7, p. 205-214.
- HARRISON A.G., GRAYSON D.J. & TREAGUST D.F. (1999). Investigating a grade 11 student's evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of research in Science Teaching*, n° 36, p. 55-87.
- HARRISON A.G. & TREAGUST D.F. (2000). Learning about atoms, molecules, and chemical bonds: a case study of multiple-model use in grade 11 chemistry. *Journal of Science Education and Technology*, n° 84, p. 352-381.
- HEWSON P.W. (1981). A conceptual change approach to learning science. *European Journal of Science Education*, n° 3, p. 383-396.
- HEWSON P.W. (1982). A case study of conceptual change in special relativity : The influence of prior knowledge in learning. *European Journal of Science Education*, n° 4, p. 61-78.
- JEAN Y. & VOLATRON J. (2003). *Structure électronique des molécules*. Paris : Dunod.
- JOHNSTONE A.H. (1993). The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*, n° 70, p. 701.
- JUSTI R. & GILBERT J. (2001). A cause of a historical Science Teaching: Use of Hybrid Models. *Science Education*, n° 83, p. 163-177.
- KELLY G. & CRAWFORD T. (1996). Students' interaction with computer representations : analysis of discourse in laboratory groups. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 33, n° 7, p. 693-707.
- KOZMA R.B. (2003). The material features of multiple representations and their cognitive and social affordances for science understanding. *Learning and Instruction*, n° 13, p. 205-226.
- KOZMA R.B. & RUSSEL J. (1997). Multimedia and understanding: expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 43, n° 9, p. 949-968.
- KOUSATHANA M. & TSAPARLIS G. (2002). Students error in solving numerical equilibrium problems. *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, vol. 3, n° 1, p. 5-17.
- LE MARÉCHAL J.-F. (1999). Modelling student's cognitive activity during the resolution of problems based on experimental facts in chemical Education. In J. Leach & A.C. Paulsen (Éd.). *Practical Work in Science Education*, p. 195-209.
- LE MARÉCHAL J.-F. (2004). Les étudiants après la réforme. *Actualité Chimique*, p. 34-39.

- LE MARÉCHAL J.-F., CLAVEL-MONIN C., DECHELETTE H., GARCIA G., MIGUET A.-M. & VASSEUR K. (2004). *Physique et Chimie en Seconde*. Collection Microméga (livre de l'élève). Paris : Hatier.
- LE MARÉCHAL J.-F., CLAVEL-MONIN C., DECHELETTE H., GARCIA G., MIGUET A.-M. & VASSEUR K. (2004). *Physique et Chimie en Seconde*. Collection Microméga (livre du professeur). Paris : Hatier.
- LE MARÉCHAL J.-F., PERREY S., ROUX M. & JEAN-MARIE O. (2004). Tableau d'avancement : avantages et difficultés au long de la scolarité. *Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie*, vol. 98, n° 860, p. 93-100.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1993). *Construire des concepts en physique*. Paris : Hachette.
- MARTINAND J.-L. (dir.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- MILNER S. & WILDBERGER A.M. (1974). How should computers be used in learning ? *Journal of Computer-Based Instruction*, vol. 1, n° 1, p. 7-12.
- NIAZ M. (2001). Response to contradiction : conflict resolution strategies used by students in solving problems of chemical equilibrium. *Journal of Science Education and Technology*, vol. 10, n° 2, p. 205-211.
- PEKDAG B. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). Hyperfilm – un outil de recherche en didactique de la chimie. *ATIEF, Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain*, Strasbourg, avril 2003, p. 547-550.
- ROUAULT S. (1968). « Erreur » dans les classes du second degré. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 505, p. 999-1006.
- ROUX M. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). *Introducing dynamic equilibrium before static equilibrium by means of computer modelling*. ESERA Conference. The Netherlands, août 2003.
- ROUX M. & LE MARÉCHAL J.-F. (2003). Équilibre chimique : du concept-procédé au concept-objet au moyen d'un simulateur. *Actes des 3<sup>e</sup> Rencontre de l'ARDIST*, Toulouse, octobre 2003. Disponible sur Internet : [http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/actes/2003/203\\_12.pdf](http://ardist.aix-mrs.iufm.fr/actes/2003/203_12.pdf) (page 63) (consulté le 18 octobre 2006).
- SCOTT P.H. (1992). Conceptual pathways in learning science: A case study of one student's ideas relating to the structure of matter. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Eds.). *Research in physics learning : Theoretical issues and empirical studies. Proceedings of an international workshop*. Kiel, Germany : Institute for Science Education, p. 203-224.

- STAVER J.R. (1998). Constructivism: A sound theory of explicating the practice of science and science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, n° 35, p. 501-519.
- TABER K. (2001). Building the structural concepts of chemistry: some considerations from educational research. *Chemistry Education : Research and Practice in Europe*, vol. 2, n° 2, p. 123-158.
- TIBERGHIEA A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching – learning situations. *Learning and Instruction*, vol 4, n° 1, p. 71-87.
- TOBIN K. (1993). *The practice of constructivism in science Education*. Washington DC : American Association for the Advancement of Science Press.
- TSAPARLIS G. (1997). Atomic orbitals, molecular orbitals and related concepts : conceptual difficulties among chemistry students. *Research in Science Education*, n° 27, p. 271-287.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, vol. 10, n° 2-3, p. 133-170.
- VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, n° 1, p. 13-28.
- WISER M. & CAREY S. (1983). When heat and temperature were one. In D. Gentner & A.L. Stevens (Éd.). *Mental models*. Hillsdale, NJ : Erlbaum, p. 99-129.



# Réalité et virtualité dans l'enseignement des sciences de la vie et de la Terre

**Béatrice Desbeaux-Salviat**, chargée de mission, délégation à l'éducation et la formation, Académie des sciences, Paris; [beatrice.salviat@academie-sciences.fr](mailto:beatrice.salviat@academie-sciences.fr)

**Dominique Rojat**, inspecteur général de l'Éducation nationale<sup>1</sup>;  
[dominique.rojat@education.gouv.fr](mailto:dominique.rojat@education.gouv.fr)

---

*La science est une activité intellectuelle qui cherche à comprendre et expliquer des faits en proposant un modèle théorique qui se comporte comme la réalité. Étudiant des faits et produisant des idées, la science se situe donc à l'exacte charnière entre la virtualité et la réalité, ce qui ne peut qu'avoir des conséquences didactiques en particulier en ce qui concerne l'utilisation des ressources virtuelles.*

*Le concept de modèle, sous ses différents aspects, occupe une position centrale et permet d'aborder la place, dans l'enseignement des sciences, des faits, des idées et surtout de leur confrontation. La relation entre le professeur et les élèves, phénomène de communication, repose sur l'utilisation d'outils (de médias) de présentation de faits et d'idées. Ces outils peuvent être regroupés sous le terme de documents. Distinguer si un document représente un fait ou une idée, et de quelle façon, avec quel degré de fidélité, est une question à la fois centrale et difficile à résoudre.*

*Il faut pourtant résoudre cette difficulté, ou pour le moins prendre conscience de son existence, pour pouvoir aborder la didactique des sciences, en particulier lorsque les outils complexes de présentation virtuelle (présentielle ou distante) estompent peu à peu les contours du réel.*

---

<sup>1</sup> L'auteur s'exprime ici à titre personnel.

## I. Entre réalité et virtualité

### I.1. La vérité et l'erreur

Considérons, à titre d'exemple, une question simple, et dont on peut penser qu'elle est aujourd'hui bien résolue, si toutefois cette expression a un sens : « Quelle est la forme de la Terre ? ».

Cette question s'intéresse à un objet matériel, qui a, en effet, une forme, c'est un fait. Elle n'est pas en elle-même scientifique, c'est une simple manifestation de curiosité. Si la curiosité est nécessaire à la réflexion scientifique, il ne suffit pas d'être curieux pour faire de la science. Proposons en première approximation l'idée légèrement iconoclaste suivante : il n'y a pas de question scientifique formulée *a priori*. Si la science intervient, c'est après la question naïve, au moment éventuellement où l'on commence à la formuler comme problème et à chercher une réponse. C'est le point de vue avec lequel on aborde une question qui lui confère son caractère scientifique.

Comment répondre à la question posée ? Il n'y a en fait que deux façons de le faire<sup>2</sup>.

On peut accepter de recevoir la réponse de quelqu'un dont on pense *a priori* qu'il détient la vérité, par exemple, une vérité révélée par une autorité supérieure : « Je vous le dis, la Terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution légèrement cabossé ».

On peut décider de ne faire confiance qu'à ses propres perceptions : on regarde autour de soi, et on constate : « La mer est horizontale et plate, or la mer recouvre à peu près la Terre, donc la Terre est plate ».

Comme on le sait, la première proposition est, dirions nous, vraie : pourtant, si on l'accepte comme telle, c'est parce qu'elle est imposée, et sans esprit critique. On nous l'a donnée et on l'a crue. Elle est du domaine de la croyance : cette réponse, pour vraie qu'elle soit, n'est pas, à ce stade, une réponse scientifique. Elle ne répond pas à la définition de Jacquard (1998) selon laquelle « *l'attitude scientifique ne consiste pas à croire, mais à systématiquement mettre en doute et réviser* ».

La deuxième proposition ne correspond pas du tout à l'idée que nous nous faisons actuellement de la forme de notre planète. Elle est, dirions nous, fautive. Pourtant, elle repose sur des observations, elle découle d'un raisonnement, et surtout, elle est réfutable, au sens de Popper (1991). Il suffirait que nous racontions les mesures faites par Ératosthène sur les ombres pour convaincre le lecteur de cette réfutabilité. À la suite de ce récit, et après une argumentation à la fois rigoureuse et simple, il serait convaincu, comme Ératosthène, que la Terre est sphérique

---

2 La formulation de ces deux réponses ne prétend pas correspondre à l'exacte évolution historique de la connaissance de la forme de la Terre. Il s'agit simplement d'illustrer un mode possible de progression des idées.

et il serait comme lui capable de calculer son rayon. On aurait une nouvelle réponse à la question posée, une réponse argumentée, quantifiée, calculée, mathématique. Une réponse, d'ailleurs, toujours fausse ou plus exactement seulement approchée. La Terre plate, la Terre sphérique, sont deux visions successives de la forme de la Terre. Ces deux visions sont fausses au regard des conceptions modernes. Pourtant elles sont raisonnées et réfutables. Elles sont du domaine de la connaissance et non de la croyance. Ce sont des réponses scientifiques. Et pourtant elles sont fausses.

Nous proposons donc au lecteur d'accepter avec nous, au moins provisoirement, l'idée légèrement iconoclaste suivante : la science n'a rien à voir avec la vérité, du moins une vérité unique, éternelle, universelle.

Notons au passage que si les questions ne sont pas en elles-mêmes scientifiques, les réponses peuvent l'être ou pas. Nous dirons qu'une réponse n'est scientifique que si on peut lui opposer des arguments contradictoires, que si elle est réfutable. Si deux réponses successives à une même question, pourtant très différentes, peuvent être l'une et l'autre scientifique, nous devons admettre que non seulement une réponse scientifique peut n'être que provisoire, mais aussi qu'une réponse n'est scientifique que si elle est provisoire, c'est-à-dire rectifiable. C'est donc une illusion de croire que la science dit la vérité. Une assertion n'est donc scientifique que si elle a une chance d'être un jour reconnue au moins partiellement comme une erreur.

#### • La certitude et le doute

Revenons sur les deux réponses initiales à la question posée. Essayons de comprendre très exactement par quel mécanisme intellectuel ces deux réponses diffèrent.

La première réponse, celle qui est du domaine de la croyance, est caractérisée par l'acceptation aveugle issue de la confiance absolue que l'on a en sa source. L'état d'esprit dans lequel on se trouve est la certitude. Mais, précisément à cause de ce caractère de croyance, elle risque de faire obstacle à la réponse scientifique (Bachelard, 1938; Canguilhem, 1972).

Dans le deuxième cas, aussitôt énoncée, la réponse proposée se confronte aux faits que révèle une observation plus ou moins facile et/ou immédiate. Au fond, ce n'est même pas vraiment la réponse qui est scientifique, c'est la possibilité de sa mise en doute. L'état d'esprit du penseur devient scientifique lorsqu'il se prend à mettre en doute ses idées.

On peut donc proposer une troisième idée, légèrement iconoclaste peut-être elle aussi : la science naît du doute. Comme le dit Charpak (cité par Jacquard, 1998) « la science est l'outil qui permet d'approcher le réel, d'apprendre la fécondité du questionnement, [...] de susciter l'argumentation et l'échange des idées [...] ».

• **La réussite et l'échec**

Si l'on compare les deux réponses scientifiques successives, on voit que l'on passe de l'une à l'autre par un processus intellectuel que l'on peut en simplifiant, présenter ainsi :

- la première idée s'impose et explique assez bien la réalité ;
- un fait nouveau est identifié, qui prend l'idée première partiellement en défaut ;
- l'idée première est au moins partiellement rejetée ;
- une nouvelle idée est élaborée, capable de rendre compte à la fois des observations anciennes et nouvelles, autrement dit de les intégrer.

Nous venons d'assister à un progrès scientifique. C'est en somme le résultat souhaitable d'une recherche réussie. Or, quel est l'élément essentiel de ce progrès scientifique ? C'est le moment où la mise en cause de l'idée ancienne (ce que permet le doute) aboutit à sa rectification partielle, ou plus rarement à son abandon total (c'est-à-dire à son échec)<sup>3</sup>.

Si la science naît du doute, elle progresse par l'échec. Voilà encore une idée sans doute un peu iconoclaste : la réussite de la science s'appuie sur son échec et ses erreurs. Comme le disent Ferry et Vincent (1988) : « *nos certitudes ne peuvent jamais porter sur la vérité, mais en revanche, on peut quand même échapper au scepticisme, car il est certain, et même absolument, que certaines propositions sont fausses* ».

• **Le sujet et l'objet**

Examinons maintenant la nature de ce à quoi s'intéresse la science, et la nature de ce qu'elle produit.

La Terre, la forme de la Terre, sont des éléments concrets, matériels, disons des faits, c'est-à-dire des éléments d'un vaste ensemble que l'on peut appeler la réalité.

« La Terre est plate », « la Terre est sphérique » sont des idées que l'on se fait de la Terre. Ce sont des éléments de savoir scientifique.

Si le sujet de la science (ce à quoi s'intéresse la science) est de l'ordre du fait, l'objet de la science (l'objectif de production de la science) est de l'ordre de l'idée indispensable pour comprendre et aussi pour transformer la réalité.

---

3 En réfléchissant à la nature de la psychanalyse, Freud propose des conceptions similaires : « *En règle générale, [la science] travaille comme l'artiste sur son modèle de glaise, quand, sur l'ébauche brute, inlassablement, il change, applique et enlève jusqu'à ce qu'il ait atteint un degré satisfaisant pour lui de ressemblance avec l'objet vu ou imaginé* ». *Nouvelles conférences d'introduction à la psychanalyse* (1933 pour l'édition originale, 1936 première traduction française chez Gallimard).



La science ne découvre pas la réalité, elle invente, elle construit une nature théorique dont le comportement prévisible (éventuellement calculé) correspond aux faits observés. Cette nature théorique est un ensemble de modèles de la nature, censés décrire, expliquer et éventuellement prévoir les faits.

On peut tirer de tout ceci un certain nombre de conclusions essentielles pour la question qui nous occupe :

- la science, qui cherche à comprendre les faits en construisant des modèles théoriques capables de décrire, d'expliquer et/ou de prévoir, se trouve à l'exacte frontière entre la matérialité (qu'elle veut expliquer) et la théorie (avec quoi elle veut expliquer) ;
- la notion de modèle, présentée ici sous un seul de ses aspects, est centrale dans notre réflexion ; il faudra donc y revenir ;
- la sérénité (on pourrait dire la rigueur) du discours scientifique n'est possible que si l'on ne confond pas le matériel et le théorique, c'est-à-dire si l'on ne confond pas le fait et l'idée.

• **La découverte des faits, l'invention des idées**

Il est habituel de parler de découverte scientifique. Or, découvrir (dé-couvrir) c'est rendre apparent ce qui existait avant mais qui était caché ou que l'on n'avait pas su voir. Il est évident que l'on ne peut découvrir que des faits. La recherche puis la découverte, ou la découverte fortuite de faits nouveaux est une activité scientifique, mais on peut dire qu'elle aboutit, en général, plutôt à poser des questions qu'à les résoudre.

Lorsque la science décrit un mécanisme, propose une classification, elle ne découvre pas, elle invente. Et cette activité est une production d'idées.

Le savoir scientifique ne résulte pas d'une constatation neutre de faits existant dans la réalité et découverts à l'issue d'activités de contemplation. La méthode expérimentale qui permet de retenir ou de réfuter les hypothèses initiales n'est pas la procédure unique conduisant à la connaissance. La découverte scientifique résulte d'un processus plus complexe que celui que véhiculent les visions empiriste et inductiviste de la science. La découverte scientifique n'est pas issue d'une illumination soudaine. Elle ne se produit qu'à l'issue d'un lent processus de maturation, dans un contexte social particulier. Elle est le résultat de la construction et de l'imagination d'un monde fictif dont les règles permettent de reproduire des faits qui appartiennent au monde réel.

Selon de Broglie (1937) « *l'expérimentateur doit, avant d'entreprendre son travail, se livrer à un effort d'imagination où, combinant les prévisions suggérées par la théorie et les ressources fournies par la technique des laboratoires, il fait le plan de son expérience et invente ou perfectionne la méthode qu'il va employer. Et voilà pourquoi la découverte expérimentale, au moins dans la science affinée de nos jours, a pour condition l'activité*

*créatrice de notre pensée et possède par là les mêmes caractères qu'une invention. Faisant nécessairement intervenir dans sa préparation et dans son interprétation l'imagination théorique guidée et contrôlée par la raison, elle est loin d'être une pure constatation et porte la marque de notre activité spirituelle ».*

Une activité scientifique peut être la découverte d'un fait nouveau ou l'invention d'une idée nouvelle. Ce sont deux activités différentes, mais souvent mêlées ou confondues. Lorsqu'un naturaliste du XIX<sup>e</sup> découvrait une nouvelle espèce végétale, son activité était de l'ordre de la découverte (il repérait un objet inconnu, le remarquait, le récoltait), mais aussi de l'ordre de l'invention (il lui donnait un nom, une place dans une classification, c'est-à-dire dans une représentation virtuelle, idéale, du monde végétal). À partir de l'objet unique (l'échantillon) qu'il découvrait, il inventait une catégorie intellectuelle (l'espèce).

Schématiquement, on pourrait dire qu'après une période où la découverte était majoritaire dans les sciences de la vie et de la Terre (l'époque des naturalistes explorateurs, qui collectionnent, nomment, décrivent et dressent un tableau de la nature) est venue une période où l'invention domine (l'époque des biologistes et des géologues qui expliquent). Sans doute pourrait-on aussi remarquer que les proportions sont variables suivant les champs scientifiques : la botanique réside plus dans la découverte que dans l'invention, la physique des particules associe de longs développements inventifs et quelques découvertes de faits ponctuels.

Si les faits sont vrais, et les idées provisoires, il est intéressant de remarquer que les idées scientifiques peuvent aussi accéder au statut envié de vérité. Et cela de deux façons.

Parfois, on finit par observer physiquement ce que l'on avait imaginé par le raisonnement (les méthodes de GPS peuvent désormais mesurer le déplacement relatif des continents que l'on avait prévu plusieurs dizaines d'années auparavant) : ainsi les idées deviennent des faits. Le plus souvent, une idée scientifique s'impose peu à peu comme vraie, simplement parce qu'elle résiste longtemps à la réfutation. Les idées deviennent vraies, en somme, à l'usure, ou plutôt en résistant à l'usure.

## **2. Les modèles de modèles**

Revenons sur cette notion de modèle, dont nous avons vu qu'elle est fondamentale dans le raisonnement scientifique moderne.

Il y a, comme on va le voir, plusieurs modèles de modèles (Rumelhard, 1988, 1992; Martinand, 1992; Schwartz, 1996; Orange, 1997; Rojat, 2002).

### 2.1. Un modèle à ne pas imiter

Si l'on emploie sans précaution le terme de modèle devant des élèves, ils lui donnent tout naturellement son sens le plus simple : un modèle, c'est ce que l'on cherche à imiter. Le professeur est un modèle pour l'élève, le raisonnement du professeur est le modèle de raisonnement qu'il faut faire. Le modèle représente l'idéal, la perfection. On n'est pas éloigné de la notion de *top model* qui représente l'idéal corporel inaccessible dont on cherche à s'approcher le plus possible, avec des succès variés.

Cette conception, si naturelle pour les élèves du terme modèle, est-elle si éloignée des attitudes spontanées des professeurs ? Rien n'est moins sûr. Observons une situation de classe banale : le professeur met ses élèves au travail dans une séance pratique expérimentale ; les résultats obtenus ne sont pas conformes à ce qu'il attendait. Inéluctablement, la conclusion sera : « *cela n'a pas marché, les résultats ne sont pas bons, nous allons travailler sur le livre* ». Or, les résultats obtenus sont des faits : ils ne peuvent être ni bons ni mauvais, ils existent. Dans cette attitude courante, le professeur affirme implicitement que lorsque les faits sont en contradiction avec la théorie, c'est que les faits ont tort, et non la théorie. La théorie est donc un modèle que les faits sont priés de respecter (de suivre) sous peine d'être rejetés comme mauvais.

Dans cette situation courante, classique, on voit s'opérer un renversement de valeur : on affirme la suprématie du théorique sur l'observé. Cela ne pourrait se faire qu'en prenant la précaution de faire référence à la solidité de la théorie, établie par ailleurs par la communauté scientifique. On va, sans le vouloir ni même vraiment le savoir, dans le sens de l'erreur naturelle des élèves et on déforme les esprits que l'on avait au préalable tenté de former en conduisant une démarche expérimentale qui se voulait rigoureuse. Il y a ici un réel obstacle pédagogique.

### 2.2. Un modèle qui sert d'exemple

La souris *nude* est un modèle de déficit immunitaire. Les Andes sont un modèle de chaîne de subduction. L'île de la Réunion est un modèle d'île volcanique résultant du fonctionnement d'un point chaud.

On désigne ici par modèle un exemple concret qui sert à étudier, valider, illustrer, réfuter, une théorie ; c'est un cas concret d'étude qui permet de comprendre une généralité. Il va de soi que toute recherche se fonde sur l'utilisation de ce type de modèle, qu'elle soit exprimée ou non.

Cette conception du modèle constitue le fondement de la contextualisation de l'enseignement. Un professeur de *sciences de la vie et de la Terre* sait qu'il doit, pour rendre son enseignement attrayant ou simplement compréhensible, choisir des exemples aussi familiers que possible aux élèves. Si c'est possible, c'est justement parce que de nombreux cas concrets se prêtent à la présentation d'une

même notion générale : pour étudier la nage des poissons, le capitaine du lagon de l'île Maurice fait aussi bien l'affaire que le brochet d'un lac d'Écosse.

On voit que dans ce cas, c'est le modèle qui est réel et sert à présenter une généralité virtuelle. Mais on peut remarquer que le modèle est ici toujours particulier, alors que ce qu'il prétend étudier est général. Il y a entre le modèle concret étudié et l'idée générale une relation de généralisation inductive qui ne peut être passée sous silence, sous peine de ce que l'on appelle communément une généralisation hâtive. L'histoire des sciences est pleine d'épisodes dans lesquels des travaux nouveaux montrent le caractère hâtif et erroné d'une idée que l'on avait d'abord crue générale, alors qu'elle ne s'appliquait qu'à quelques cas particuliers.

### ***2.3. Le modèle conceptuel : représentation virtuelle du réel***

Examinons le raisonnement par lequel l'étude des séismes permet de se faire une idée de la structure concentrique de la Terre. On observe les lieux, temps d'arrivée et caractéristiques physiques des ondes sismiques qui, produites par un grand séisme dont on connaît la localisation, se manifestent tout autour de la Terre. En particulier, l'existence d'une zone d'ombre (c'est-à-dire d'une région du globe qui ne reçoit aucune onde issue de ce séisme) permet d'imaginer l'existence d'un noyau, séparé du manteau par une discontinuité majeure.

D'une façon habituelle, on pourra décrire ces travaux comme la découverte du noyau terrestre. On estimera alors que l'existence du noyau, doit, dès lors, être considérée comme un fait. On considérera alors le noyau comme vrai.

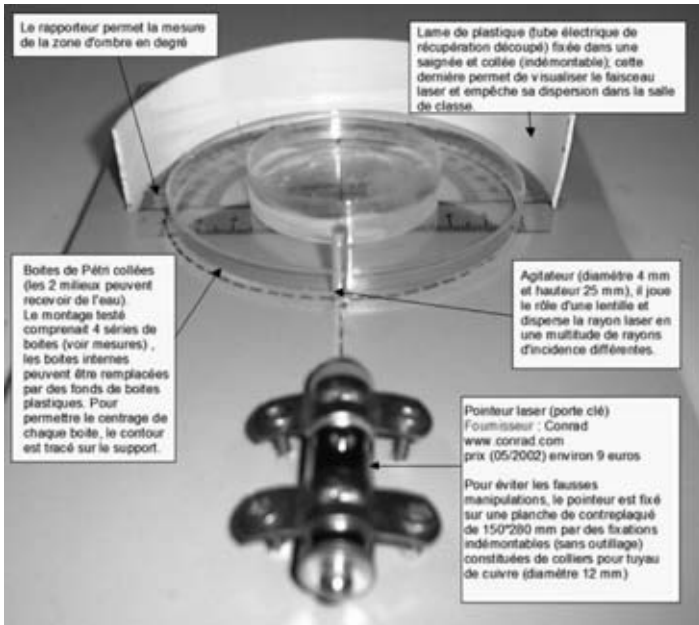
Proposons une autre façon de voir les choses. Nous dirons que nous imaginons une Terre théorique (un modèle de Terre) qui possède un noyau. Nous appliquons à ce modèle théorique les lois physiques de propagation des ondes sismiques et nous prévoyons l'existence dans cette Terre théorique d'une zone d'ombre. Si nous imaginons la surface du noyau à une certaine profondeur, nous constaterons que le modèle de Terre sur lequel nous réfléchissons possède une zone d'ombre identique à la zone d'ombre réelle de la Terre réelle. Nous dirons alors que tout se passe comme si la Terre réelle était exactement conforme à notre modèle théorique. Ce modèle sera considéré non pas comme vrai, mais comme valable. En attendant, naturellement, que des faits nouveaux conduisent à son perfectionnement.

Ce modèle est donc l'expression ou la représentation de l'idée que l'on se fait à un moment donné de la réalité. Il peut se présenter sous la forme d'une description textuelle, d'un schéma, d'un logiciel informatique ; il peut être simplement qualitatif ou quantitatif. Il est en tout cas le mode constant de présentation des idées scientifiques. Ce mode de présentation de l'état de la science, c'est le cadre de travail de ceux qui, pour faire progresser la science, tentent de prendre le modèle en défaut.

### 2.3. Le modèle analogique : réel ou virtuel ?

À l'aide de deux cristallisoirs emboîtés remplis de milieux transparents conve- nables et d'un rayon laser, il est possible de construire un modèle analogique de Terre (figure 1) qui, en utilisant des objets de natures différentes et de dimensions différentes de ce qui constitue la Terre réelle, permet de visualiser le cheminement de rayons lumineux analogues aux ondes sismiques. Ce montage est un modèle analogique de Terre, c'est-à-dire un objet qui se comporte de façon analogue à la Terre, tout en étant naturellement fort différent.

Figure 1. Modèle analogique de Terre<sup>4</sup>



La nature réelle ou virtuelle de ce modèle prête à discussion : s'il s'agit incontestablement d'un objet réel, il s'agit aussi d'une Terre virtuelle. La réalité n'est donc pas synonyme de matérialité.

Ce modèle analogique permet, suivant les besoins, de visualiser une théorie ou d'expérimenter à son sujet. Il faut cependant remarquer que tout ce que l'on peut tirer d'un modèle de ce type doit être considéré avec circonspection en raison des biais que peuvent introduire les changements de nature de matériaux, d'échelles d'espace et de temps. C'est au fond l'illustration de l'adage : « *comparaison n'est pas raison* ».

<sup>4</sup> Disponible sur Internet : <http://www.ac-nantes.fr:8080/peda/disc/svt/zonedombre/realisation.htm> (consulté le 4 septembre 2006).

Une variante de modèle analogique est représentée par un logiciel qui se comporte comme la réalité supposée. C'est alors un logiciel de simulation.

### **2.5. Modèle et didactique**

Les modèles que l'on peut utiliser avec des élèves peuvent donc se présenter sous plusieurs formes :

- un cas concret ;
- un schéma qui représente l'état d'une théorie (sous une forme classique ou numérique) ;
- un montage concret (qui peut être assorti de systèmes de mesures reliés à un ordinateur) ;
- un logiciel informatique (modèle numérique).

Ils ont des usages très variés :

- faire naître une idée générale à partir d'un exemple ;
- exposer une idée et la faire comprendre ;
- permettre la remise en cause des idées ;
- déterminer les conséquences prévisibles d'une idée.

Autrement dit, les modèles permettent aussi bien, et suivant les cas, d'enseigner les résultats de la science (l'état des connaissances scientifiques) que le fonctionnement de la science (la construction des connaissances scientifiques). On voit que la notion de modèle se trouve ainsi à la charnière de la dialectique du fait et de l'idée, ou du réel et du virtuel. C'est cette charnière que nous allons maintenant examiner.

## **3. La dialectique du réel et du virtuel**

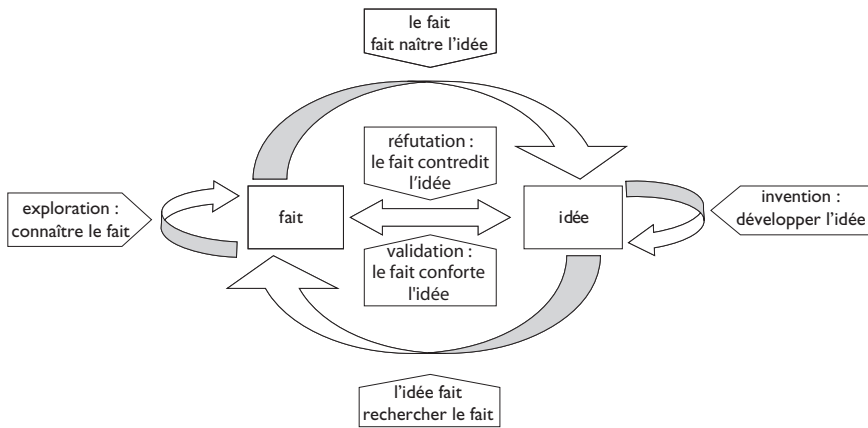
On se souvient que la science produit des idées pour expliquer des faits. La question est maintenant de savoir comment s'articule cette construction, quelles sont les différentes relations entre le fait et l'idée, c'est-à-dire entre l'unité virtuelle et l'unité réelle.

La figure 2 résume les différents types de relations possibles.

### **3.1. Le fait source d'idée**

L'observation, dit-on, de la chute d'une pomme a suggéré à Newton l'idée de l'attraction universelle ; selon l'histoire racontée par Flemming lui-même l'observation d'une contamination de culture l'aurait conduit à la notion d'antibiotique. D'une façon générale, c'est une étape importante de la pensée scientifique : la rencontre d'un fait conduit à la formulation d'une idée, c'est l'inspiration. Il est

Figure 2. Les relations entre unité virtuelle et unité réelle



remarquable de constater que ce sont souvent des faits banals qui conduisent à énoncer des idées particulièrement originales et riches. Les scientifiques mettent en œuvre des qualités d'esprit elles aussi courantes, mais qu'ils utilisent d'une façon particulière : curiosité (qui met l'esprit aux aguets), sens de l'observation (qui introduit l'intelligence dans le regard), imagination (qui permet d'échafauder des idées), culture scientifique maintenue à jour, dans la mesure où parfois aussi, la chance sourit aux esprits préparés.

Parfois, les faits signifiants, ou déclencheurs, ne sont pas immédiatement apparents. Ils ne sont mis en évidence que par une phase exploratoire qui n'est pas forcément suscitée par une recherche dans une direction préétablie. Il y a une place, dans l'activité scientifique, pour le goût de la découverte de faits nouveaux, pour l'exploration, au sens naturaliste et empirique du terme, c'est-à-dire sans idée préconçue.

### 3.2. L'idée source de faits

S'il est vrai que la Terre n'est pas plate, alors, à une heure donnée, des bâtons de même longueur plantés verticalement à une même heure à Alexandrie et en haute Égypte ne doivent pas avoir les mêmes ombres. Si l'insuline extraite d'un pancréas est bien l'hormone hypoglycémiante, alors son injection dans le sang doit avoir un effet hypoglycémiant.

Une idée étant énoncée, elle conduit souvent à supposer l'existence de faits que l'on peut ensuite rechercher (investigation). Ces faits peuvent être naturels (plus ou moins faciles d'observation) ou provoqués (faits expérimentaux).

L'imagination permet de déterminer ces faits, conséquences prévisibles des idées scientifiques. C'est elle aussi qui sert à l'élaboration de projets exploratoires

ou de protocoles expérimentaux. Le sens de l'observation permet de débusquer le fait recherché. Une certaine habileté manipulatrice est souvent aussi requise.

### **3.3. La confrontation du fait et de l'idée**

Une idée a conduit à la recherche d'un fait. Le résultat de cette recherche sert à valider ou non l'idée initiale.

Si le fait cherché est trouvé comme on s'y attendait, l'idée est confortée. C'est une démonstration, au sens expérimental du terme, sens très différent de celui utilisé en mathématiques : cette démonstration ne découle pas d'un raisonnement déductif. Et cette démonstration n'est, comme on l'a dit, que provisoire.

*« La science est continuellement mouvante dans son bienfait. Tout remue en elle, tout change, tout fait peau neuve. Tout nie tout, tout détruit tout, tout crée tout, tout remplace tout. La science cherche le mouvement perpétuel. Elle l'a trouvé; c'est elle-même. Tout remue en elle, tout change, tout fait peau neuve... La science va sans cesse se raturant elle-même... Elle est l'asymptote de la vérité : elle approche sans cesse et ne touche jamais. [...] Hippocrate est dépassé; Archimède, Paracelse, Vésale, Copernic, Lavoisier sont dépassés. Pascal savant est dépassé, Pascal écrivain ne l'est pas » (Hugo, 1882).*

Si le fait recherché se dérobe, reste introuvable, la situation reste indécise. Ne pas rencontrer la preuve recherchée ne prouve pas qu'elle n'existe pas. Si le fait trouvé n'est pas celui que l'on attendait, cette rencontre peut conduire à remettre en cause la théorie précédente qui est alors réfutée et doit être remplacée par une autre.

De nouvelles qualités intellectuelles sont ici à l'œuvre : rigueur du raisonnement, respect des faits (qui ont toujours raison ?), sens du doute, utilisation de l'échec.

### **3.4. Les conséquences didactiques**

Ce sont ces qualités d'esprit, utiles à la science, mais pas seulement à la science, que l'on cherche à développer chez les élèves en leur enseignant non seulement les résultats de la science, mais aussi la construction du savoir scientifique : curiosité (qui n'est pas, en sciences, un vilain défaut), sens de l'observation, imagination, rigueur, respect des faits, doute, vision positive de l'échec. La formation de l'esprit par l'enseignement de la science dépasse largement la formation des futurs scientifiques.

Un enseignement scientifique réellement formateur ne peut qu'être fondé sur cette dialectique permanente du fait et de l'idée. C'est cet aller-retour permanent qui constitue le fondement d'une démarche d'investigation scientifique<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Stefan Zweig, dans *Brûlant secret* (1938, Grasset, 2002) propose un bel éloge de l'éveil des esprits par le tâtonnement curieux : « [...] rien ne déploie mieux toutes les possibilités de l'intellect non encore mûr qu'une piste qui se perd dans l'obscurité ».



La classe n'est pas un laboratoire. Un cours de science n'est pas un travail de recherche. En pratique, avec les élèves, on réalise un travail de confrontation de faits et idées accéléré, dont l'ampleur des domaines abordés est incomparablement plus large que le domaine de recherche d'un homme de science pendant toute sa vie professionnelle. Cette accélération du temps, cet encyclopédisme des domaines de réflexion, peuvent s'accompagner d'une perte de rigueur, d'une confusion des esprits. Éviter ces écueils n'est possible qu'en prenant grand soin de trouver la bonne présentation des faits et des idées que l'on souhaite discuter, c'est-à-dire en choisissant avec soin et à propos les médias utilisés. En première approximation, et d'une façon générale, ce média de présentation est un document. C'est à propos de cet outil médiatique fondamental qu'il faut maintenant s'interroger.

#### **4. Le document : médiatisation du fait et/ou de l'idée**

##### **4.1. La diversité des documents**

Un document est un média qui présente en lui-même une certaine réalité concrète. Les documents utilisés pour l'enseignement des sciences sont de nature très variée :

- des échantillons, c'est-à-dire des objets naturels ou des parties d'objets naturels : coquille de mollusque, feuille d'arbre, roche, fossile, etc. ;
- des préparations plus ou moins élaborées réalisées à partir d'éléments naturels : coupes microscopiques, lames minces de roches ;
- des montages expérimentaux réels ;
- des photographies, représentations d'objets naturels variés : ceux qui peuvent être présentés en tant qu'échantillon, ou ceux qui ne le peuvent pas, pour des questions d'impossibilité spatiale ou temporelle (paysage, criquet au cours du saut) ;
- des enregistrements vidéo et/ou audio : scènes de la vie d'un animal dans la nature, conférence scientifique, etc. ;
- des représentations schématiques ou semi-schématiques : cartes géologiques, représentations schématiques d'une théorie (d'un modèle conceptuel), coupes géologiques... ;
- des textes, anciens ou récents, décrivant des faits ou exposant des idées ;
- des résultats expérimentaux sous des formes variées (tableaux de chiffres, courbes, diagrammes, descriptions de protocoles, représentations de montages) ;
- des logiciels de simulation ou de modélisation ;
- des bases de données informatiques ;
- des sites Internet.

Derrière cette diversité de contenus se cache aussi une grande diversité de supports (objets réels, papiers, enregistrements sur bandes magnétiques, supports numériques variés) et une toute aussi grande diversité dans la relation que l'élève entretient avec le document pendant son étude (toucher, regard, ouïe, interface machine, interface réseau – local ou distant). Autrement dit, le document, qui est *a priori* un objet réel (dans le sens le plus large du mot objet), contient une certaine dimension virtuelle.

La question est de savoir comment on peut maîtriser ces différents degrés de diversité pour conduire un enseignement scientifique efficace. En d'autres termes, comment l'usage des documents permet-il de conduire la relation fait/idée ?

#### 4.2. Le document, entre réalité et virtualité

Empruntons à Magritte quelques images pour conduire notre réflexion. Magritte, peintre surréaliste, place sa peinture (nous dirons, les documents qu'il nous fournit) dans le domaine de la surréalité. Le tableau plus réel que le réel ? On est bien au cœur de nos préoccupations<sup>6</sup>.

Le tableau intitulé *Ceci n'est pas une pipe* représente, à l'évidence,... une pipe. C'est une pipe, mais il est pourtant impossible de la fumer : ce n'est donc pas une pipe, ou pas une pipe réelle. C'est une pipe virtuelle, et pourtant, on ne peut concevoir tableau plus réaliste ! Un tableau figuratif, ne peut jamais être autre chose que l'image de ce qu'il représente. C'est un objet réel, qui représente une chose virtuelle, d'une façon assez fidèle pour qu'on puisse y reconnaître toutes les caractéristiques de la chose réelle.

Dans un autre tableau, *Madame Récamier* est représentée sous un jour un peu particulier : un cercueil sur un lit. Plus que sa personne, c'est l'idée de son caractère mortel qui est évoquée. Le titre du tableau annonce ici une représentation réaliste, alors que c'est une réalité future qui s'impose avec force et ironie : la mort inéluctable. La mort est bien réelle ; la représentation de cette réalité future est toute virtuelle. Au fond, la madame Récamier réelle est-elle plus éloignée de sa représentation qu'une pipe réelle ne l'est de son image ?

*L'empire des lumières* est un tableau figuratif de facture assez classique : la représentation d'apparence fidèle d'un paysage réel. À un détail près cependant : un ciel de jour domine un paysage nocturne. C'est en somme une représentation d'allure très réelle d'une situation impossible et donc purement virtuelle. Il est donc possible de donner une image convaincante d'une situation totalement inventée et impossible.

---

6 On pourra aussi trouver des réflexions intéressantes sur la relation entre l'image et la réalité chez Sartre dans *L'imaginaire* (Gallimard, 1940) : « Une image de chaise n'est pas, ne peut pas être une chaise » ou encore : « [...] l'image est un acte qui vise dans sa corporéité un objet absent ou inexistant, à travers un contenu physique ou psychique qui ne se donne pas en propre, mais à titre de «représentant analogique» de l'objet visé ».

*La condition humaine* est, si l'on veut, une réalité. Pourtant, elle n'a pas au sens propre du terme une existence matérielle. Il n'est pas possible de voir la vraie condition humaine. Comment peut-on donc représenter ce que l'on ne peut pas voir dans la réalité ? Le tableau donne ainsi une réalité à ce qui n'est en réalité que virtuel...

Les tableaux de Magritte nous apprennent un certain nombre de choses :

- aucun tableau ne peut prétendre à la présentation réelle du fait ;
- un tableau peut représenter un fait, une idée, ou un mélange complexe des deux ;
- si le tableau est bien réel, ce qu'il véhicule est présenté de façon très largement virtuelle.

En quoi ces tableaux nous renseignent-ils sur le mode d'utilisation des documents scientifiques ?

### **4.3. L'impossible présentation du fait**

Une carte géologique représente la nature des terrains à l'affleurement, les structures tectoniques observables : quoi de plus fidèle à la réalité du terrain ? Pourtant, une carte géologique a un auteur : les faits, eux, n'ont pas d'auteur. L'auteur de la carte est celui qui a étudié le terrain, qui a déduit des observations possibles ce qui était caché (ne serait-ce qu'en supposant ce que l'on trouve sous le couvert végétal). Ce qu'il a représenté doit tout autant à ses connaissances, ses conceptions, ses idées scientifiques qu'aux données brutes enregistrées sur place. Il est même probable que son regard est plus ou moins attiré par tel ou tel détail en relation avec ce qu'il sait de la géologie. D'ailleurs, au fil du temps, les cartes d'une même région se succèdent, fort différentes souvent, pour représenter une immuable région. La raison en est simple : les techniques se perfectionnent, certes ; l'attention se concentre, sans doute ; mais surtout les connaissances progressent, c'est-à-dire les idées évoluent. La représentation cartographique des faits dépend des idées que l'on s'en fait.

Une photographie d'une ville dévastée par un tremblement de terre présente avec un réalisme implacable le déroulement du drame. Et pourtant, cette photo ne doit-elle pas beaucoup à l'intelligence de l'œil du photographe ? N'a-t-il pas choisi son angle de vue, l'endroit où fixer son regard ? En somme n'a-t-il pas, pour prendre sa photographie, fait les choix qui lui permettent de donner à voir ce qu'il veut montrer ? D'autre part, le lieu photographié existe dans un espace à quatre dimensions (les trois axes de l'espace, plus le temps) alors que la photographie n'en a plus que deux. Il manque encore le bruit, l'odeur peut-être. Les dimensions sont réduites : une rue écroulée tout entière tient sur un rectangle de papier. Du réel à la photographie, on a perdu des dimensions et on a perdu en dimension. Et que dire de ce que l'on a pu faire subir au cliché entre son développement et son

impression ? Les techniques de traitement de l'image pourraient ôter toute crédibilité au moindre document photographique.

Un échantillon de basalte, posé sur la table, devant un élève : voilà un objet concret. Et pourtant cette roche a été récoltée parmi beaucoup d'autres possibles. On a certes, pour des raisons pratiques, choisi une taille raisonnable, mais n'a-t-on pas aussi privilégié celle qui présente les caractéristiques typiques (on pourrait dire idéales) que l'on voulait mettre en évidence ? N'a-t-on pas au contraire éliminé l'échantillon incompris, atypique ou contraire à ce que l'on veut montrer (celui-là même, peut-être, qui, récolté par un plus curieux, ou plus inventif, aurait permis de corriger une idée première en la prenant en défaut) ? Le professeur de *sciences de la vie et de la Terre* a choisi un échantillon utile à son cours de géologie; le professeur d'arts plastiques aurait-il récolté le même pour travailler sur la forme et la couleur ?

Ces trois exemples de documents de type très classique, montrent assez bien comment l'idée s'introduit dans le fait, comment la construction du document par son auteur, comment le choix du document par le pédagogue, s'éloignent de l'objectivité parfaite des faits. Faut-il renoncer pour autant à présenter des faits ? Non bien sûr, puisque c'est au contraire un moyen incontournable d'aborder la science. Mais le pédagogue doit être conscient de la part de subjectivité, de choix, d'intelligence (c'est-à-dire de virtualité) dans le document censé présenter des faits. Il doit même attirer l'attention des élèves sur cette difficulté d'approche, sur l'indispensable éveil de l'esprit critique qui doit toujours souffler ces questions : qu'est-ce que je suis en train d'observer ? Quelle part d'interprétation (d'opinion) se cache dans l'apparente matérialité de ce que j'ai sous les yeux ?<sup>7</sup> Regarder, c'est choisir, c'est décider de fixer notre attention sur certains éléments et donc forcément en exclure d'autres qui pourtant font partie de notre champ de vision.

#### **4.4. Des idées à l'allure de faits**

Si, dans les exemples précédents, la matérialité est bien présente, modulée par l'idée certes, mais de façon vénielle, il arrive souvent qu'un document clairement immatériel soit reçu comme totalement réel. Nous en prendrons deux exemples.

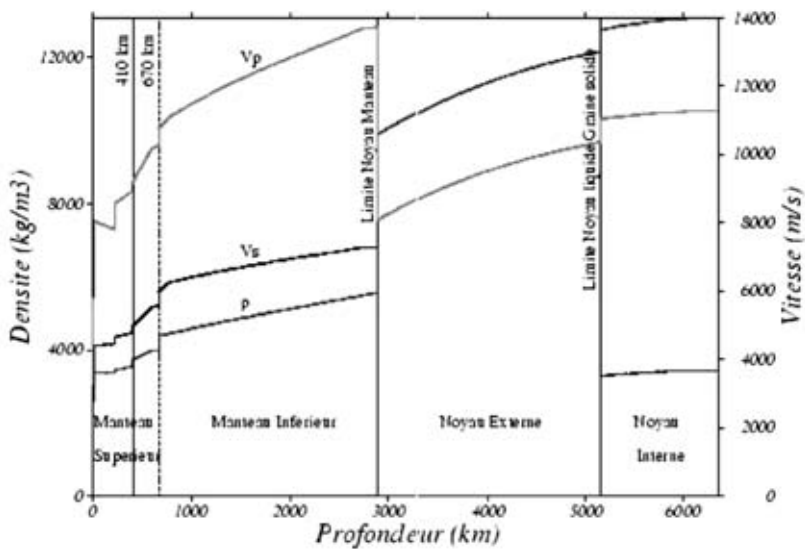
Observons une tomographie sismique de la Terre. Un jeu de couleurs vives traduit les caractéristiques de la propagation des ondes sismiques dans le manteau terrestre. Reçu par l'élève, et même parfois exprimé par le professeur, la légende pourrait en être : « *Représentations des vitesses sismiques mesurées en différents points du manteau* ». Or, ce n'est pas du tout de cela dont il s'agit. Les seuls faits réels à

---

7 Cette interprétation du rôle créatif du regard n'est pas l'apanage des didacticiens des sciences. Ainsi, Amélie Nothomb écrit dans *Métaphysique des tubes* (Albin Michel, 2000) : « *Le regard est un choix. Celui qui regarde décide de se fixer sur telle chose et donc forcément d'exclure de son attention le reste de son champ de vision. C'est en quoi le regard, qui est l'essence de la vie, est d'abord un refus* ».

l'origine de ce document sont des temps d'arrivée d'ondes sismiques enregistrées en différents points de la surface : un tableau de nombres tout à fait impossible à interpréter pour le non spécialiste. À partir de ce tableau, de longs algorithmes permettent d'obtenir des vitesses calculées en différents points. Ces vitesses calculées sont ensuite comparées aux vitesses supposées normales en ces points tel que les prévoit un modèle théorique de Terre. C'est donc un écart entre une réalité calculée et une théorie elle aussi calculée, traduit en un code de couleurs, que l'on a représenté. On est bien loin du titre proposé et le document est bien loin du réel que l'on a cru qu'il représentait. La figure 3 représente un modèle relatif à la propagation des ondes sismiques, souvent présenté à tort comme un fait.

**Figure 3. Modèle PREM, référence pour les vitesses d'ondes de volume et de densité (d'après Dziewonski & Anderson, 1981)<sup>8</sup>**



Mais c'est sans doute avec les logiciels de simulation que la situation devient la plus caricaturale. Prenons l'exemple du logiciel *abeille*<sup>®</sup>, excellent au demeurant et très utile. Il nous propose de déterminer, par exemple, les caractéristiques du langage dansé des abeilles. C'est un véritable jeu vidéo : on choisit le nombre d'abeilles, on les place dans des situations choisies, on les voit réagir et, par la succession d'un certain nombre d'études, on finit par comprendre leur mode de communication. Présenté comme un jeu vidéo, cet outil est clairement virtuel ; pourtant, on y pratique une démarche expérimentale : quoi de plus réel que l'expérimentation ? Il va de soi que le logiciel ne permet de découvrir que les lois que l'on a utilisées

<sup>8</sup> Disponible sur Internet : [http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn\\_int/sismo/prem/prem.htm](http://nte-serveur.univ-lyon1.fr/geosciences/geodyn_int/sismo/prem/prem.htm) (consulté le 15 septembre 2006).

pour le programmer. Il s'agit en effet d'une découverte de ce que l'on y avait caché : version numérique d'une banale chasse au trésor... Mais si l'on n'y prend pas garde, on voit un groupe d'élèves qui croit expérimenter réellement, qui croit inventer des lois de la nature et qui ne fait plus la différence entre son observation effective et le jeu de simulation. De fil en aiguille la question arrive tôt ou tard : pourquoi faudrait-il expérimenter sur le réel puisque l'on peut obtenir les mêmes résultats avec un ordinateur ? Où l'on voit en quoi la confusion entre le réel et le virtuel déforme l'esprit.

Ces deux cas sont exemplaires et conduisent à une conclusion : les outils sophistiqués, issus de la mise en œuvre d'une puissance de calcul et d'une programmation savante, sont utiles et efficaces si on les utilise en connaissance de cause, inutiles et même dangereux s'ils sont mis en œuvre sans conscience de ce qu'ils sont. La qualité de l'acte pédagogique reste l'apanage du pédagogue.

#### **4.5. Le document : médiatisation de l'idée**

C'est évidemment un usage fréquent du document que la présentation d'une idée, sous forme schématique par exemple. Un schéma de synthèse, après tout, est aussi un document.

Mais, là encore, c'est la confusion dans la nature des choses qui est dangereuse : les élèves qui apprennent par cœur le schéma représentatif d'une belle théorie sont-ils toujours conscients qu'ils étudient l'opinion de scientifiques et non une description de la réalité ? À ce propos, évoquons une anecdote significative. Un candidat au concours d'entrée à l'école vétérinaire dessine une mitochondrie au tableau noir pendant son épreuve orale. À l'intérieur, il représente les crêtes et dans la matrice un rond. « *Qu'est-ce que ce rond dans la matrice ?* » demande l'examineur. « *C'est le cycle de Krebs* » répond l'étudiant. Cet exemple vécu montre la confusion possible – mise ici sur le même plan figuratif – entre des éléments matériels (les crêtes mitochondriales) et un modèle biochimique abstrait (le cycle des acides tricarboxyliques).

Dans ce cas, l'histoire des sciences peut rendre service à la didactique, dans la mesure où elle permet de rendre plus vivants et plus pleins les problèmes, les difficultés, les évolutions du questionnement, les retours et les réinterprétations. Un regard historique aide à donner un statut de modèle, d'objet construit à ce qui pouvait sembler être une réalité observable. La figure 4 laisse percevoir, à travers quelques unes des formulations proposées au fil du temps par Hans Adolf Krebs, la part d'imagination inhérente au processus de construction du savoir scientifique (Desbeaux-Salviat, 1997, 2003).

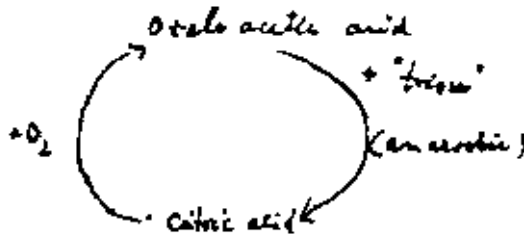
#### **4.6. La place du document numérique**

Comme on le voit, la discussion sur les relations entre le réel et le virtuel n'est pas directement liée à l'introduction de l'outil numérique. Cependant, l'utilisation

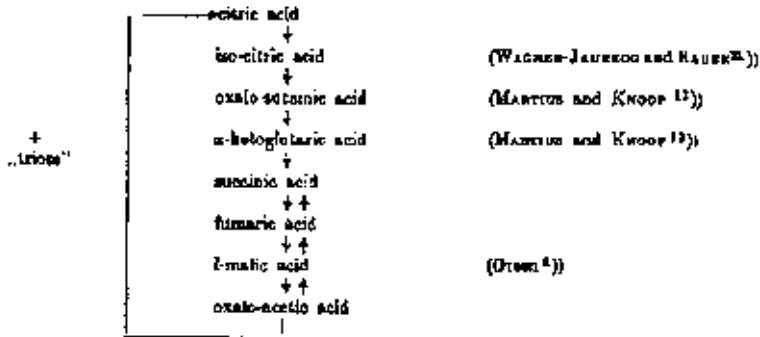
des technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'enseignement complique et enrichit cette relation, et rend indispensable une réflexion sur la nature de ces relations.

Figure 4. Formulations successives du cycle de Krebs par son auteur en 1937

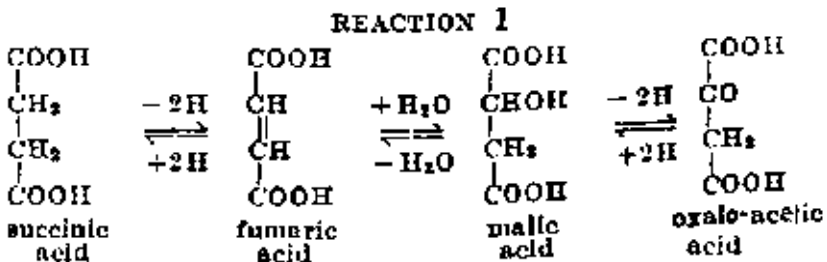
1. Protocycle extrait d'un projet d'article refusé par la revue *Nature*



2. Présentation rectangulaire du cycle publiée dans la revue *Enzymologia*



3. Formules semi-développées des molécules impliquées dans le cycle publiées dans la revue *The Lancet*



Les TIC permettent l'utilisation de documents virtuels d'un très grand réalisme, notamment par l'introduction facile du mouvement, dans un document animé. Quoi de plus parlant, pour expliquer la structure d'une molécule, qu'un logiciel de présentation en trois dimensions, permettant de faire tourner la molécule dans l'espace ? Mais quel danger si les élèves prennent cette image pour une photographie de la molécule !

L'expérimentation à l'école est enrichie, dans l'*expérimentation assistée par ordinateur* (ExAO), par la puissance de traitement du signal d'un ordinateur de bureau ordinaire. Quelques mesures réalisées par une sonde à oxygène et transmises automatiquement à un logiciel très simple permettent le tracé direct de courbes qu'il serait long et fastidieux de produire à la main. Mais que devient la formation intellectuelle de l'élève si le traitement informatique du signal est senti comme un procédé magique et fait oublier toute l'incertitude inhérente à l'expérimentation ?

Dans une classe de la Réunion, l'Internet permet une excursion virtuelle dans une forêt du bassin parisien, une plongée sur la dorsale médio-atlantique ou une excursion géologique sur le rift de Djibouti. Mais quel drame si cette possibilité sert de prétexte ou d'excuse pour renoncer à tout travail réel sur le terrain ! Cette ouverture sur le monde lointain permettra-t-elle de mieux prendre conscience de l'originalité du contexte local, ou fera-t-elle oublier les distances ? Saurons-nous exploiter les riches potentialités pédagogiques de la communication à distance entre élèves ?

## 5. Le fait, un concept qui a évolué dans le temps

Dans le langage commun, dire « *c'est un fait !* » permet de couper court à la discussion. Pour Bachelard (1938) la « *méthode des faits pleine d'autorité et d'empire* » résume les conceptions préscientifiques du réel. Dans ce qui précède, on a pris le terme de fait dans ce sens primaire, de simple élément d'un ensemble qui constitue la réalité. Mais, à y regarder de plus près, ce concept lui-même ne résiste pas totalement à l'analyse critique et il y perd de son objectivité. D'une façon cocasse l'étymologie du mot *fait* renvoie à son caractère construit.

### 5.1. Le fait, élément perçu de la réalité sensible

En 1865, Claude Bernard soumet le fait – en tant que réalité – à l'idée expérimentale : il en est à la fois l'origine et le contrôle. Ce sont les faits qui jugent l'idée. La formule extrait le fait du réel brut pour en faire l'occasion ou la cause d'un jugement épistémologique. Le fait branché sur l'idée sert à construire une connaissance dotée d'une véritable architecture.

Henri Poincaré (1902) affirme : « *Une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierre n'est une maison* ». Si les faits sont des éléments à relier,



organiser, structurer pour qu'ils produisent un sens, on admet qu'ils sont eux-mêmes le produit d'une construction.

### 5.2. Le fait, produit pénétré de raison critique

Bachelard, dans *Le nouvel esprit scientifique*, propose une sorte de chaîne où le phénomène, après une série d'opérations de tri, d'épuration et de formatage, passe par les instruments, eux-mêmes produits matériels des théories. Lorsque le phénomène est ainsi transformé par la théorie – via l'observation et l'expérience – il aura peut-être droit à l'appellation *fait scientifique*.

À l'encontre du réalisme naïf du langage ordinaire, en désaccord avec l'idéalisme d'origine platonicienne, il en résulte que le fait ne se définit non plus comme un élément du réel ou de l'être, mais à la fois comme construction et description. Le fait – dans cette acception – est pris dans un processus de construction théorique. Les faits scientifiques ne sont ni des choses, ni des phénomènes, mais des descriptions de la nature soumises à des procédures de réfutation. Ce sont ces procédures qui leur confèrent un statut scientifique. Dans *La logique de la découverte scientifique*, Popper écrit : « *un système faisant partie de la science empirique doit pouvoir être réfuté par l'expérience* ».

Il nous faut distinguer le « *fait perçu ou observé* » du « *fait critiqué ou reconstruit* ». Seul ce dernier peut être mis en relation avec des théories ou des hypothèses qu'il peut alors infirmer ou confirmer<sup>9</sup>. Selon Canguilhem une théorie ne procède jamais des faits, « *c'est dans les aller-retour du concept image de cellule entre théorie mécaniste et théorie vitaliste, entre protocoles d'observation scientifique et enrôlement au service d'analogies politico-idéologiques que vont surgir des enjeux successifs* »<sup>10</sup>. L'élaboration du fait scientifique suppose l'abandon de l'empirisme au profit du raisonnement constructif et expérimental qui aboutit à une nouvelle conceptualisation du fait. Dans le participe passé fait, on trouve le résultat d'une action double : celle de la raison humaine et de la construction d'un paradigme du réel sur le résultat supposé d'une autre action, naturelle et non humaine.

La science se nourrit de faits observés. « *Mais il n'y a pas de faits bruts; même l'éclipse, le coup de tonnerre, le précipité dans l'éprouvette, portent une théorie plus ou moins naïve, plus ou moins élaborée, jamais absente. Nous ne pouvons même pas sentir*

---

9 Cette complexité de la notion de fait se trouve déjà clairement exprimée par Rousseau (*L'Émile ou de l'éducation*, 1762) : « *Mais qu'entend-on par ce mot de faits ? Croit-on que les rapports qui déterminent les faits historiques soient si faciles à saisir, que les idées s'en forment sans peine dans l'esprit des enfants ? Croit-on que la véritable connaissance des événements soit séparable de celle de leurs causes, de celle de leurs effets, et que l'historique tienne si peu au moral qu'on puisse connaître l'un sans l'autre ?* ».

10 Georges Canguilhem, *philosophe, historien des sciences*, Bibliothèque du collège international de philosophie, Paris, Albin-Michel, 1993, p.51. « *Bien loin qu'un fait perçu ou observé soit, du seul fait qu'il est perçu ou observé, un argument pour ou contre une hypothèse, il doit d'abord être critiqué et reconstruit de façon que sa traduction conceptuelle le rende logiquement comparable à l'hypothèse en question (...)* Seuls les faits réformés apportent des informations » (Leçon sur la méthode).

ou percevoir sans y apporter de nous-mêmes, de notre acquis. La pensée ne se laisse jamais éliminer » (Piaget, 1967).

### 5.3 Les faits s'insèrent dans un contexte culturel

Donc, les faits ne sont pas donnés *en soi*, indépendamment de tout contexte culturel. Toutefois, ils ne sont pas des constructions subjectives, dans le sens courant de cet adjectif, c'est-à-dire individuelles. C'est grâce à une manière commune de les voir et de les décrire que les faits sont les faits. Personne ne peut décrire le monde par sa seule subjectivité, il est indispensable de s'insérer dans quelque chose de plus vaste, une institution sociale, une vision organisée admise par une communauté.

Si je suis daltonien et que je déclare que « *les algues chlorophylliennes dans une bouteille transparente posée devant moi sur la table sont un breuvage rouge* », mon interprétation est subjective car elle dépend de ma manière individuelle de structurer le monde. Mais si, dans les mêmes conditions, je parle d'une bouteille contenant une suspension d'algues vertes capables de photosynthèse, on dira que mon observation est objective et pourtant c'est par une activité structurante et par la médiation d'une culture partagée que j'ai pu produire cette observation. On peut ainsi s'apercevoir que le caractère prétendument objectif des observations provient directement de conventions véhiculées par des activités humaines.

## 6. Conclusions

Il a fallu des siècles pour admettre que le fait était le produit d'un faire, ce que le langage spontané affirme pourtant clairement : *factum* peut renvoyer à une construction, un ouvrage, un travail. Passer du fait perçu au fait scientifique résulte de pratiques contrôlées, de théories incarnées par des instruments, hauts faits de l'activité humaine et pédagogique.

L'arrivée des *technologies de l'information et de la communication appliquée à l'enseignement* (TICE) dans l'outillage pédagogique banal oblige à repenser les relations entre réalité et virtualité qui fondent la réflexion scientifique. La puissance des outils numériques, le réalisme des effets spéciaux au service de la science et de son enseignement, l'abolition des distances, le jeu permanent avec la dimension temps permettent une richesse de la pratique didactique inaccessible jusque là. Mais le risque est grand de perdre ses repères, de confondre le réel et le virtuel et d'oublier ainsi le sens même de la science.

Comme souvent, à l'arrivée des outils, l'appropriation des nouveaux moyens de communication concentre toute l'énergie et l'attention disponible. On utilise l'outil pour l'outil ; la pédagogie est au service de l'usage de l'outil et non l'inverse. Cette période est aujourd'hui révolue : nous entrons dans la phase d'appropriation, d'asservissement (au sens de mise au service) de l'outil. La relation pédagogique est l'essentiel de l'enseignement, les TICE sont là pour l'enrichir. ■

## Remerciement

Nous remercions Guy Rumelhard pour ses relectures et judicieuses suggestions.

## BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1934). *Nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.
- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique : contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Paris : Vrin.
- BERNARD C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris : Flammarion.
- CANGUILHEM G. (1968). Modèles et analogies dans la découverte en biologie. In *Études d'histoire et de philosophie des sciences*. Paris : Vrin.
- CANGUILHEM G. (1972). Vie. In *Encyclopaedia Universalis*.
- DE BROGLIE L. (1937). L'invention dans les sciences théoriques. *Science, l'Encyclopédie annuelle*, n° 14, p. 7 (Paris, 14, rue Brunel).
- DESBEAUX-SALVIAT B. (1997). L'histoire du cycle de Krebs. Un exemple de retour aux publications-sources. In J. Rosmorduc (dir.). *Histoire des sciences et des techniques*. Rennes : CRDP de Bretagne.
- DESBEAUX-SALVIAT B. (2003). Enseignement des sciences et communautés virtuelles à vocation éducative sur le site Internet *La main à la pâte*. In A. Senteni & A. Taurisson (dir.) *Les communautés virtuelles en action : exemples concrets pour penser le futur*. *Pédagogies.net*. Québec : Presses de l'Université du Québec.
- FERRY L. & VINCENT J.-D. (1988). *Qu'est-ce que l'homme ?* Paris : Odile Jacob.
- HUGO V. (1882). William Shakespeare. In *Œuvres complètes*, t. II. Paris : J. Hetzel.
- JACQUARD A. (1998). *L'équation du nénuphar*. Paris : Calmann-Lévy.
- MARTINAND J.-L. (dir.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- PIAGET J. (1967). *Logique et connaissance scientifique*. Paris : Gallimard.
- POINCARÉ H. (1902). *La science et l'hypothèse*. Paris : Flammarion.
- POPPER K. (1984). *Logique de la découverte scientifique*. Paris : Payot.
- POPPER K. (1991). *La connaissance objective*. Paris : Aubier.

ROJAT D. (2002). Modélisation et simulation, quelques aspects des relations entre l'idée et le réel. *Les dossiers de l'ingénierie éducative*. Paris : Scéren.

RUMELHARD G. (1988). Statut et rôle des modèles dans le travail scientifique et dans l'enseignement de la biologie. *Aster*, n° 7, p. 21-48.

RUMELHARD G. (1992). Un exemple de modélisation en biologie : les mécanismes de régulation. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP.

SCHWARTZ D. (1996). Les modèles en biologie et en médecine. *Pour la Science*, n° 227.

# Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie

Muriel Ney, laboratoire Leibniz, CNRS, Grenoble; muriel.ney@imag.fr

---

*Une typologie des fonctions des modèles est construite à partir d'un cadre théorique (Nifle) permettant de définir le rapport entre modèle et expérience. Il est admis qu'il existe un lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant, et que ce lien repose sur le rapport expérience/modèle. La typologie est construite pour le cas particulier des modèles formels (utilisant un formalisme mathématique, statistique ou informatique). Pour chaque type de modèle, une option pédagogique est proposée, en particulier sur l'usage des simulations. Nous obtenons une fonction du modèle, pour indiquer, pour laquelle nous proposons une pédagogie expérientielle. Un état des lieux de l'enseignement de la modélisation en biologie à l'université est également présenté ainsi que des exemples de modèles.*

Nous proposons quelques définitions servant de point de départ à cette étude. Il ne s'agit pas de définitions universelles mais du sens dans lequel ces termes sont employés dans cet article. Le fil conducteur et la structure générale de l'article sont présentés brièvement à la fin de cette introduction.

Le modèle, la modélisation et la simulation sont des termes souvent employés dans la recherche en sciences expérimentales (par exemple en biologie), en didactique et en épistémologie. Aussi, il est utile de préciser ce que l'on entendra par ces termes dans un article qui prétend emprunter à ces trois disciplines.

Les modèles envisagés ici sont basés sur les mathématiques, « *un langage permettant de comprendre la dialectique qui va sans fin, et dans les deux sens, de l'esprit aux choses* » (Bachelard, 1971, p. 112). Soulignons qu'il s'agit ici d'esprit et de choses et qu'apparaît le mot langage sur lequel nous reviendrons plus loin. Nous nous intéresserons donc au « *contact entre expérience et mathématiques* » (Legay, 2000) parmi d'autres formes de modèles.

Si, au sein de la biologie, il y a plusieurs sortes de modèles (pour un ouvrage très complet sur les modèles en biologie, leur nature, leur fonction, leur construction, voir Legay, 1973), on se focalisera ici sur ceux qui reposent sur les outils mathématiques, statistiques ou informatiques. Nous emploierons le raccourci *modèles formels* pour les désigner dans cet article. Ces outils, on le verra, ont un double rôle à jouer : celui d'instrument d'analyse et celui de modèle, de construction formelle permettant de rendre l'observation intelligible (Martinand, 1994, p. 131). Il s'agit donc de modèles qui rendent compte de l'expérience.

La démarche de modélisation formelle, si on la réduit à sa plus simple expression, consiste à isoler un système et des objectifs d'étude à son propos, puis à formaliser ces objectifs. Isoler un système, c'est « limiter le champ d'une situation et en extraire un ensemble cohérent » (Legay, 1997). On fait, chemin faisant, plusieurs hypothèses, à la fois sur les composants essentiels du système et sur les relations entre ces composants. Formaliser dans le but d'étudier le fonctionnement, bien souvent la dynamique, du système biologique peut se faire par le biais du langage mathématique. Nous entendons par *langage formel* non seulement l'écriture mathématique à l'aide d'équations mais aussi le formalisme logique, certains schémas, figures géométriques ou graphiques d'usages dédiés en mathématiques ou en informatique et les algorithmes permettant le calcul numérique.

Qu'est-ce qu'une simulation dans cet article ? Une simulation numérique est utilisée par le biologiste en lien avec un modèle, un modèle dynamique en général. La simulation va résoudre, de manière explicite pour l'utilisateur ou pas, des équations représentant l'évolution du système. De Jong et van Joolingen (1998) proposent deux catégories de simulations à usage pédagogique : celles qui reposent sur un modèle conceptuel (dynamique ou statique, qualitatif ou quantitatif, continu ou discret, etc.) et celles qui proposent un modèle opératoire (un simulateur de vol, une dissection virtuelle, etc.). Dans cet article, nous parlons des simulations de modèles conceptuels dans un sens un peu plus large que d'ordinaire (comme on le verra plus loin avec le tableau 1).

En référence à ses usages dans un cadre pédagogique, on entendra ici par simulation une application, développée avec un outil logiciel ou *web*, faisant des calculs numériques à partir d'un modèle. Une simulation peut parfois être accompagnée d'une animation (un graphique animé sur lequel on peut éventuellement agir). Une simulation est généralement interactive, elle permet de changer des paramètres, de sélectionner des données, de créer des graphes, etc. Plusieurs logiciels permettant de créer ou de faire tourner de telles simulations seront présentés en fonction des usages pédagogiques variés qu'ils permettent. Par exemple, il y a les logiciels de programmation (classiquement utilisés en cours de modélisation, on aura Maple®, SciLab®, etc.), les logiciels de modélisation dynamique déterministe (e.g. Stella®), les logiciels de statistique (e.g. le logiciel libre R).

Enfin, on utilisera le mot expérience au sens large pour parler d'une expérience humaine (à caractère pédagogique, scientifique ou autre) et l'on désignera l'expérience scientifique par le terme expérimentation (voir Coquidé [2003] pour une présentation plus élaborée de la polysémie du terme expérience).

La section qui suit est une revue de l'enseignement de la modélisation en biologie à l'université et des problèmes pédagogiques posés par cet enseignement. Nous entendons par enseignement de la modélisation des cours où l'on propose aux étudiants d'utiliser, modifier ou construire des modèles. Puis le point de vue des biologistes qui conçoivent des modèles est présenté (section 2) car nous pensons qu'il y a un lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant. Un cadre théorique est présenté en section 3 à partir duquel est construite la typologie des fonctions des modèles (section 4). Cette étude théorique aboutit à quatre fonctions des modèles pour celui qui est en situation de résoudre un problème par la modélisation (donc aussi bien pour le professionnel que pour l'étudiant). Ces fonctions des modèles sont de *calculer*, *décrire*, *expliquer* ou *indiquer*.

## I. Unité d'enseignement de modélisation en biologie

### I.1. Faut-il enseigner la modélisation ?

Cette question revêt de multiples facettes : à quels étudiants enseigner la modélisation ? Quelle modélisation enseigner ? Doit-on l'enseigner comme telle, ou comme approche pour résoudre des problèmes dans un sous-domaine de la biologie ? Autrement dit, s'agit-il d'un cours de mathématiques, d'un cours de biologie ou d'un cours de modélisation ? L'étude présentée ici est centrée non pas sur la nature épistémologique mais sur la fonction des modèles (pour le biologiste), ceci dans le but d'envisager un enseignement de la modélisation au début d'un cursus universitaire où les étudiants ne se destinent pas forcément à une formation professionnalisante de biologiste ou d'expert en modélisation.

Orange (1997) avance qu'apprendre la modélisation, c'est acquérir une compétence : la maîtrise du problème de mise en concordance faits/théorie. La construction de modèle implique des connaissances théoriques (le modèle, les concepts et les outils qu'il utilise) et des connaissances pratiques (utiliser le modèle pour résoudre des problèmes). Il s'agit bien pour nous de proposer des pistes pour un enseignement de compétences et de connaissances (mais peut-on jamais les dissocier) à des étudiants qui doivent acquérir cette maîtrise.

Un des arguments en faveur de l'enseignement de la modélisation est son utilisation courante par les biologistes. Examinons rapidement les utilisations qu'ils font des modèles dans un contexte académique et dans un contexte d'expertise. Dans un contexte académique, ce sont des expérimentateurs qui adaptent ou utilisent des modèles ou des théoriciens qui les conçoivent. Apparaît alors une distinction entre

ceux qui analysent des données recueillies par eux-mêmes ou par leurs collaborateurs, et qui construisent des modèles que l'on qualifie de *data-driven*, et ceux qui conçoivent des modèles pour répondre à des problématiques biologiques ou pour développer de nouvelles méthodologies, et que l'on qualifie de *model-driven*. Par ailleurs, il y a ceux qui utilisent ou adaptent des modèles dans des contextes d'expertise, par exemple dans le cadre de la gestion forestière (Lett, 1999), de la conservation des espèces (Lebreton, 1973) ou de la gestion de pêcheries (Johnson, 1995). Dans ces contextes d'expertise, un certain nombre de difficultés peuvent apparaître : les finalités sont multiples et conduisent à des objectifs qui peuvent être peu clairs, voire contradictoires; les lois théoriques ou simplement empiriques, sur lesquelles le modèle est construit, ne sont pas forcément connues; les données peuvent être insuffisantes voire entachées d'erreurs. Les modèles d'expertise (modèles de décision, Legay [1997] et section 2) doivent tenir compte de ces incertitudes.

Doit-on enseigner la modélisation dans un cours de mathématiques, dans un cours de biologie ou bien dans un cours dédié à la modélisation ? Dans les années 1960-1970, plusieurs formations universitaires ont commencé à proposer des cours de mathématiques, spécifiques aux cursus de biologie, incluant certains thèmes négligés dans un cours de mathématiques s'adressant à des mathématiciens ou des ingénieurs (comme les statistiques, les équations discrètes) et prenant des exemples en biologie (plutôt qu'en physique). Aujourd'hui, aux États-Unis comme en France, ce genre de formation n'est plus (ou pas) systématiquement proposé dès le début d'un cursus universitaire de biologie. Si elle l'est, c'est bien souvent par une équipe de mathématiciens, avec les problèmes que cela pose pour construire d'authentiques situations de biologie. L'enseignement oscille entre deux extrêmes : du centré-mathématiques, où la biologie est un prétexte, au centré-biologie, où les mathématiques sont des recettes.

Doit-il y avoir un cours de mathématiques spécifique aux biologistes et enseigné par les biologistes ? C'est une question encore débattue. L'université Claude-Bernard-Lyon I, est un exemple remarquable à ce titre puisqu'un cours interdisciplinaire mathématiques/biologie, dispensé par les biométriciens (la biométrie regroupe les méthodes quantitatives pour l'étude des phénomènes biologiques) existe depuis sa création par J.-M. Legay au début des années soixante-dix.

Les cours de modélisation sont encore plus rares que les cours de mathématiques, en particulier dans les trois premières années universitaires (licence). Pourquoi ? Certains avanceront que la modélisation est plus un art qu'une science (tout comme l'art de la programmation). Les modèles sont enseignés dans des cours thématiques, par exemple un cours de dynamique de population ou d'épidémiologie, et plutôt au niveau master.

### **1.2. Comment enseigner la modélisation à l'université ?**

On peut distinguer trois tâches dans l'approche et la compréhension des mécanismes de modélisation : (1) utiliser un modèle; (2) modifier un modèle;



(3) construire un modèle. La première activité familiarise avec les phénomènes biologiques et leurs formalisations. Il peut s'agir, par exemple, d'apprendre à représenter graphiquement l'évolution temporelle des variables d'un système, ou d'étudier mathématiquement les solutions et prédictions d'un système d'équations dynamiques. Les deux autres activités permettent d'aborder explicitement la nature, l'utilité et les limites d'un modèle, à des degrés différents selon que l'on adapte certains modèles existant ou que l'on en construit de nouveaux.

Enseigner la construction de modèles nécessite d'en dégager les étapes importantes. Pour fixer les idées, disons que ces étapes consistent grossièrement à poser un problème, à analyser ce problème, à le traduire en langage formel (mathématique ou autre), à y répondre par résolution numérique ou formelle et enfin à interpréter les résultats, faire des prédictions ou prendre des décisions. Ainsi, résoudre des équations différentielles (construire un diagramme de phase par exemple) procède bien de la modélisation mais dans un sens très réduit puisque cela ne fait appel qu'à certaines étapes et en réduit d'autres au minimum. Malheureusement, ce type d'activité est pratiquement le seul proposé au niveau de la licence où, de plus, les étudiants travaillent presque toujours avec des modèles qu'on leur fournit. Nous avons entrepris une recherche (non exhaustive) des unités d'enseignement (UE) de licence de biologie portant sur la modélisation. Nous en avons trouvé peu, par exemple une UE de l'université Claude-Bernard-Lyon I (document 1) et une autre de l'université Paris-Sud II (document 2).

**Document 1. Unité d'enseignement « Biologie et modélisation », université Claude-Bernard-Lyon I**

**Intitulé de l'UE :** Biologie et Modélisation

**Niveau :** L1 ou L2

**Parcours :** mathématiques, informatique ou biologie

**Organisation :** 15 heures de cours magistraux et 32 heures de travaux pratiques

**Source :** université Claude-Bernard-Lyon I ([http://spiral.univ-lyon1.fr/14-ue/lecture\\_UE.asp?choix\\_UE=305](http://spiral.univ-lyon1.fr/14-ue/lecture_UE.asp?choix_UE=305) – consulté le 18 octobre 2006)

Deux champs complémentaires sont abordés : l'analyse statistique de données écologiques et la modélisation mathématique. Le premier champ intègre les enseignements de statistique par l'utilisation du logiciel R. Le second champ intègre les enseignements de mathématiques par l'utilisation du logiciel Maple. Le pont entre les deux champs est établi autour de l'activité de modélisation.

Analyse statistique de données écologiques et modélisation :

- statistiques descriptives
- tirages aléatoires et simulation d'échantillonnages

Modélisation de la dynamique des populations :

- modèles en temps continu

- modèles en temps discrets
- modèles spatiaux

Compétences acquises :

- Méthodologiques

Analyser et interpréter les données biologiques afin d'en extraire des informations en vue de la compréhension et de la modélisation des processus du vivant.

- Techniques

Utilisation de logiciels informatiques pour intégrer les enseignements de mathématiques et de statistique dans le contexte de la biologie.

## **Document 2. Unité d'enseignement « Introduction à la modélisation en biologie », université Paris-Sud II**

**Intitulé de l'UE :** Introduction à la modélisation en biologie

**Niveau :** L2

**Parcours :** Biologie

**Organisation :** 50 heures de cours magistraux, 21 heures de travaux dirigés et 8 heures de travaux pratiques

**Source :** Université Paris-Sud II (<http://www.lmd.u-psud.fr/licence/sts/PDF/Fiches.pdf> – page 93 – consulté le 18 octobre 2006)

Objectifs :

La modélisation des phénomènes biologiques est une discipline originale et en plein développement qui nécessite de pouvoir franchir les frontières disciplinaires. Un modèle n'est pas une simple mise en ordre de l'observation. Les modèles biologiques modernes cherchent à identifier, au-delà des corrélations, les liens de causalité susceptibles d'exister entre des phénomènes en apparence disjoints. Lorsque la discipline a acquis une maturité suffisante, le modèle devient mathématique, ce qui permet de clarifier les hypothèses et d'en étendre les capacités d'analyse.

L'enseignement proposé a un triple but :

- Donner aux étudiants une méthode de travail alliant le substratum biologique aux outils de traitement mathématiques et informatiques.
- Les familiariser avec le maniement des outils logiciels dédiés à la modélisation.
- Donner une première idée de l'intérêt, de la diversité et de la puissance de la modélisation en biologie.

Résumé des contenus :

L'outil informatique : apprentissage de la programmation en langage Scilab.

L'outil mathématique : introduction aux méthodes de calcul numérique.

Réflexion et expérimentation sur la notion de modèle en biologie.

Ajustement des paramètres d'un modèle aux données.

Introduction à la modélisation de systèmes dynamiques.

Modélisation de processus stochastiques.

On note à la lecture de ces deux documents que des catégorisations des modèles d'ordre disciplinaire peuvent être faites et sont le fil conducteur des programmes d'UE : modèles basés sur des lois de la physique, sur des lois empiriques ou sur des lois statistiques, modèles discrets ou continus, déterministes ou stochastiques, modèles basés sur l'analyse de données ou sur des concepts, sur des outils mathématiques ou informatiques...

Un regard sur la situation aux États-Unis nous est offert par les conclusions d'un *workshop* réunissant un grand nombre d'universités américaines (Gross, 1992), sur le thème de l'enseignement des méthodes quantitatives en biologie. Le point de départ en est un constat des difficultés des étudiants à faire le lien entre cours de mathématiques et cours de biologie, des résultats très médiocres en mathématiques et l'anxiété, voire du rejet, suscité par ces cours (un constat similaire est fait par l'auteur à Lyon I). Un ensemble de difficultés clés a été identifié par les professeurs des universités américaines participant au *workshop* (Gross, 1992) :

- comment bien poser le problème (énoncer correctement le problème verbalement de manière à pouvoir le formaliser ensuite, sélectionner une stratégie de modélisation appropriée, définir les bonnes variables) ? ;
- comment traduire une information verbale en modèle formel ? ;
- comment analyser des modèles existants ? ;
- comment interpréter des résultats, des prédictions du modèle ?

Dans le cadre des enseignements scientifiques au primaire et au secondaire, Genzling et Pierrard (1994) portent un regard didactique sur ces questions qui rejoint sur certains points les considérations précédentes. Ils proposent trois approches complémentaires de la modélisation : (i) se représenter un ensemble de situations, unifier les points de vue, et rapprocher des situations différentes ; (ii) répondre à des questions, et relier des phénomènes à des descripteurs (propriétés, grandeurs, paramètres) ; (iii) tester la validité d'un modèle. D'autres auteurs, en sciences de l'éducation ou en sciences cognitives, vont jusqu'à proposer un mode pédagogique privilégié pour certaines approches de la modélisation (de Jong & van Joolingen, 1998). C'est ce type d'association que nous tenterons de systématiser et de fonder sur une base théorique.

### **1.3. Options pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation**

Comme cela est souvent souligné, par exemple par Weil-Barais et Lemeignan (1994), toute proposition d'enseignement est nécessairement supportée par une conception de l'apprentissage, explicite (dans le cadre d'une recherche) ou implicite (cas le plus courant dans le cadre des enseignements traditionnels) : « *L'étude de l'enseignement et de l'apprentissage de la modélisation suppose de prendre un certain nombre d'options : d'ordre épistémologique (quelles conceptions des modèles va-t-on prendre en compte ?), disciplinaire (quels sont les modèles qui du point de vue de la*

*discipline méritent d'être enseignés ?), pédagogique (quels moyens mettre en oeuvre aux plans matériel et humain ?), psychologique (quel cadre théorique d'apprentissage ?) et social (quelles finalités de l'enseignement poursuivre ?) » (Weil-Barais & Lemeignan, 1994).*

Le but de cet article est de passer en revue certaines des options qui s'offrent à celui qui décide d'enseigner la modélisation en biologie à l'université et de proposer un cadre cohérent permettant de discerner puis de mettre en pratique les liens de parenté entre ces options.

## 2. Les modèles vus par les scientifiques qui les conçoivent

Dans cette étude, nous nous référons d'abord aux réponses apportées par des biologistes qui conçoivent des modèles à la question de la fonction des modèles au cœur de leur discipline.

On l'a vu auparavant, le modèle est souvent défini comme un trait d'union entre l'esprit et les choses, entre les mathématiques et l'expérience, entre le réel et la théorie, entre un problème concret et sa solution formelle. Orange (1997) présente le modèle comme interface entre registre empirique (comprenant les phénomènes dont le modèle rend compte) et registre explicatif (englobant les éléments permettant de construire différents modèles, de résoudre une classe de problèmes). Il distingue les fonctions heuristiques et explicatives du modèle qui seraient liées au registre explicatif, des fonctions prédictives liées au registre empirique. Ces points de vue nous offrent une vision d'un réel et d'une théorie qui ne demandent qu'à se laisser lier par le modèle, mais comment ?

Ceci renvoie à la question du rapport de précédence entre théorie, modèle et expérience scientifique (Hacking, 1989; Legay & Schmid, 2004). La théorie scientifique se distingue du modèle, quoique de façon pas toujours claire et certains emploient l'un pour l'autre. Disons qu'une théorie est plus générale et explique le fonctionnement d'un ensemble de phénomènes (Hilborn & Mangel, 1996). Legay (1997, 2004) parle d'une méthode descendante d'élaboration des modèles dans laquelle la théorie précède tout le reste (théorie → modèle → expérimentation) et d'une méthode ascendante (situation → modèle → théorie). Dans le second cas, il s'agit bien d'une situation de départ, faisant appel ou non à des expérimentations (de terrain ou de laboratoire). Hacking (1989) montre, en se basant principalement sur l'histoire des sciences, qu'une expérimentation est toujours précédée par un semblant de théorie ou modèle. En biologie, la méthode descendante est une approche plus répandue en recherche moderne qu'elle ne l'a été autrefois (Israel cité dans Coquidé, 2000). Pourtant, dans le cadre d'un enseignement universitaire, on peut se demander si la méthode ascendante ne doit pas rester prépondérante. En effet, si modéliser implique de résoudre un problème (Orange, 1997), c'est un problème issu des phénomènes et des situations appréhendables

par les étudiants que l'on partira plutôt que d'un problème de chercheur en biologie.

Lorsque le modèle est envisagé comme un instrument de recherche pour l'expérimentateur, Legay (1997) propose trois types de modèles en fonction de leurs rôles. Notons, tout d'abord, sa définition de l'expérimentation : « toute procédure organisée d'acquisition d'information qui comporte, dans la perspective d'un objectif exprimé, une confrontation avec la réalité ». Dans les trois paragraphes suivants, nous détaillons sa typologie des fonctions des modèles que nous illustrons sur l'exemple de la dynamique de population et du modèle exponentiel continu qui sera repris en section 4.

Le premier type est qualifié de *modèle d'hypothèse*. Dans ces modèles, on admet un certain nombre de choses *a priori*, souvent en langage commun, comme par exemple des conditions initiales (valeurs initiales de paramètres), et l'expérimentateur cherche les conséquences résultant de ces hypothèses. Par exemple, on admet que l'évolution de la population humaine entre 1750 et 2000 peut être décrite par une fonction exponentielle. Modéliser la croissance de cette population consiste à superposer des points expérimentaux et cette fonction, au plus près, et en déduire une vitesse de croissance, une prédiction etc. Ici, on se base principalement sur le constat, dans un langage descriptif.

Le deuxième type est celui des *modèles de mécanismes* qui partent d'une proposition d'explication (hypothèse explicative) qu'il s'agit de tester. On peut proposer que le taux de croissance de la population est proportionnel à son effectif, écrire l'équation différentielle et la résoudre. Cela conduit à une solution exponentielle qui est justifiée par le mécanisme énoncé au départ. Ces modèles mettent l'accent sur les résultats du calcul et les performances du mécanisme explicatif.

Le dernier type comprend les *modèles de décision* et les *modèles de prévision* qui sembleraient être les moins connus mais les plus demandés actuellement (Legay, 1997). Ils prennent en compte la situation au sens large, y compris les intentions et les objectifs des personnes impliquées. L'intention et les prédictions potentielles arrivent très tôt dans la modélisation ; par exemple, il s'agit de contrôler les naissances d'une population afin de réduire sa croissance en deçà d'un certain niveau (pour le gouvernement Chinois). On peut tester les conséquences possibles de ses décisions sur des données réelles. Pour avoir une bonne probabilité de ne pas se tromper, on va se baser sur des modèles d'hypothèse et des modèles de mécanisme et définir le degré de précision dont on a besoin en fonction de l'enjeu. Les deux premiers types de modèle sont alors pris en compte.

Le modèle intervient souvent en lien avec une nouvelle hypothèse. En effet, la démarche scientifique, qu'elle soit expérimentale ou théorique, est basée sur la génération et la validation d'hypothèses : il n'y a pas de modèle sans hypothèses explicites (Legay, 1997). Hilborn et Mangel (1997) définissent un modèle comme

la « *version simplifiée d'une hypothèse* ». L'hypothèse est, selon ces auteurs, une nouvelle proposition (explicative) à tester.

Il semble que tous les types de modèles prédisent ou expliquent quelque chose, alors y a-t-il différents sens des mots prédiction et explication ? De plus, on peut se demander s'il y a un modèle-instrument privilégié selon l'expérience de celui qui modélise, sa vision de la situation ? Nous tenterons de répondre à ces questions dans la section 4.

Envisagé comme un instrument, on ne peut pas dire du modèle qu'il est vrai ou faux (Hilborn & Mangel, 1997). Un stylo n'est ni vrai ni faux, c'est un instrument qui peut servir, entre autres, à écrire, mais qui sera peu utile pour effacer. Un modèle est un outil qui fournit simplement des résultats plus ou moins valables dans un domaine plus ou moins étendu. Il peut être utilisé à bon ou à mauvais escient, la responsabilité en incombe à l'utilisateur.

Pour conclure, il me semble que la démarche de modélisation se définit au travers d'une trialectique (voir section 3) sujet (intentionnalité), objet (objectivation), projet (projection) : un projet de modélisation résulte du rapport entre un sujet et un objet qui fait problème au sujet, celui qui modélise et qui est porteur du questionnement, de l'intention. Une personne (sujet intentionnel) décide d'utiliser le stylo (objectivation) pour écrire (projection). Une autre l'utilisera peut-être pour appuyer sur les touches de son téléphone : il y a plusieurs projets possibles. Le modèle se définit dans le projet du sujet.

### **3. Une base théorique pour une typologie des fonctions des modèles**

Si la trialectique sujet-objet-projet est prépondérante dans la modélisation, il semble difficile que le scientifique puisse être neutre, ni dans le système qu'il choisit d'étudier, ni dans sa vision de la science. Le type d'outils mathématiques qu'il utilise et le type d'expérience qu'il fait peuvent être révélateurs de cette vision. Toute la difficulté est de rester conscient de ce lien et de ne pas croire unique l'image que l'on se fait de la situation. C'est la multiplicité des points de vue sur la science, véritables positions épistémologiques, et leur lien avec la modélisation, son usage en recherche et dans l'enseignement, que nous tenterons d'examiner dans la section 4, dans un cadre théorique que nous allons à présent introduire.

Dans cette étude nous prendrons le parti de la primauté de l'expérience humaine : la réalité n'est pas donnée mais est toujours construction humaine. En effet nous ne connaissons des phénomènes que nous choisissons d'isoler, que ce que nos expériences nous en donnent à vivre, qu'elles soit triviales, pédagogiques, ou scientifiques. C'est du rapport complexe entre expérience et modèle que nous allons discuter. Bien que ces deux termes puissent être pris au sens large dans cette section, nous rappelons, dans le document 3, le sens plus précis dans lequel nous les utiliserons pour notre analyse.

### Document 3. Définitions : modèle et expérience

Modèle : Il s'agit des modèles formels construits dans un cadre non pédagogique, par l'expert ou le chercheur, et réinvestis pour l'enseignement de la biologie.

Expérience : Dans une démarche de modélisation, une personne est confrontée au phénomène biologique ; elle en fait l'expérience, c'est-à-dire qu'elle va l'éprouver ou bien le mettre à l'épreuve (et l'on verra que cette expérience peut parfois être essentiellement d'ordre sensible ou factuel ou mental).

Une approche permettant de comprendre le rapport modèle-expérience a été développée par la théorie du sens et des cohérences humaines (Nifle, 1986). Cet essai philosophique a donné lieu à de nombreuses applications théoriques, méthodologiques et pratiques, principalement dans des contextes non académiques. Dans le contexte académique, ces travaux ont été utilisés dans différents domaines : par exemple, les sciences de la gestion (Bessire & Baker, 2005), les sciences de l'éducation (Condette, 1984), la sociologie (Nifle, 1995), la didactique des langues (Forestal, 1991). En didactique des sciences expérimentales, Maisch et Ney ont utilisé cette approche (Maisch, 2006) afin d'analyser des pratiques enseignantes, dans les travaux pratiques à l'université.

Dans le cadre de la théorie du sens et des cohérences humaines, théories et modèles sont qualifiés de *re-présentations* d'une situation et sont liés par homologie : modèle et situation sont homologues s'ils ont même sens. Le sens est une disposition d'être de la personne humaine ou d'une communauté, sa vision du monde, sa logique, sa cohérence, voire même sa théorie. Le sens est toujours lié à un système de valeurs, par exemple c'est une position épistémologique ou une position (une théorie) sur l'apprentissage. Les modèles sont ainsi des re-présentations de l'expérience et de ce fait deviennent à leur tour expérience, n'échappant pas au champ de l'expérience humaine. Ces modèles-expériences peuvent conduire à la réalisation d'expériences nouvelles, re-présentations des modèles. Prenons un exemple pour clarifier cela : une simulation (on parle aussi d'expérimentation virtuelle) est une re-présentation d'un modèle, tout comme peut l'être une expérimentation de laboratoire quand elle se base sur un modèle. En outre, les modèles peuvent donner lieu à d'autres modèles, par exemple un modèle verbal peut être re-présenté par un modèle mathématique. Ainsi, il y a souvent plusieurs étages de re-présentations et ces re-présentations partagent un sens commun (par homologie). Dans l'exemple ci-dessus, une expérimentation est re-présentée par un modèle qui est ensuite re-présenté par une autre expérimentation ou une simulation pouvant à son tour être re-présentée successivement par un modèle verbal puis un modèle formel.

Selon Nifle (2004a), si le sens est conservé d'un modèle à l'autre, ou de la situation au modèle, alors on pourra essayer de discerner ce sens au travers de ces différentes re-présentations. *Re-présenter* une situation, c'est réaliser, re-mobiliser, une expérience (humaine) dans un même sens mais sous une autre

forme. Toute expérience humaine (y compris scientifique) est une réalité réalisée.

Le terme *situation* désigne, dans cet article, un ensemble de phénomènes biologiques, on pourrait dire une réalité, telle qu'elle se présente à celui qui suit une démarche de modélisation et qui a pris la décision de délimiter cet ensemble. Une situation est un exemple de réalité réalisée qui peut être le point de départ de la modélisation (méthode ascendante, Legay, 1997 et section 2). Tout comme les termes expérience et modèle peuvent être employés dans un cadre plus large que celui de notre analyse (de l'enseignement de la modélisation en biologie), le terme *situation* désigne plus largement « *un environnement, physique ou culturel, mis au foyer de l'expérience d'un sujet, c'est-à-dire un environnement privilégié et expérimenté* » (Dewey, 1938/1993).

Dans une optique qui nous semble proche de notre cadre théorique, S. Bachelard (1979) propose la définition suivante : « *le modèle... sépare le pertinent du non pertinent par rapport à la problématique considérée. En ce sens le modèle est un fictif réalisé. Il est un instrument d'intelligibilité d'un réel* ». Pour Bousquet (2001), « *l'objet modèle étant réalisé, il va être utilisé à des fins de représentation (re-présentation) de situations/.../ Je représente (formalise) une représentation (un point de vue) à des fins de représentation (médiation)* ».

Dans la théorie des cohérences humaines (Nifle, 1986) toute re-présentation possède trois composantes exprimées comme des relations entre trois dimensions :

- une dimension intentionnelle (sujet) ;
- une dimension objective (objet) ;
- une dimension projective (projet).

Bien que la dialectique sujet-objet soit prépondérante, d'autres philosophes ont introduit l'idée d'une réalité à trois dimensions. Bachelard, par exemple, note que « *la méditation de l'objet par le sujet prend toujours la forme du projet* » (1934/1995, p. 15).

Les trois composantes de Nifle (2004a) sont :

- la composante sensible ou affective (relation sujet-objet). Ce sont le vécu, les appréciations, les perceptions sensibles ;
- la composante factuelle ou matérielle (relation objet-projet). C'est ce qui se produit, ce qui se fait ;
- la composante conceptuelle ou mentale (relation sujet-projet). Ce sont les concepts, les représentations mentales, les projections structurées.

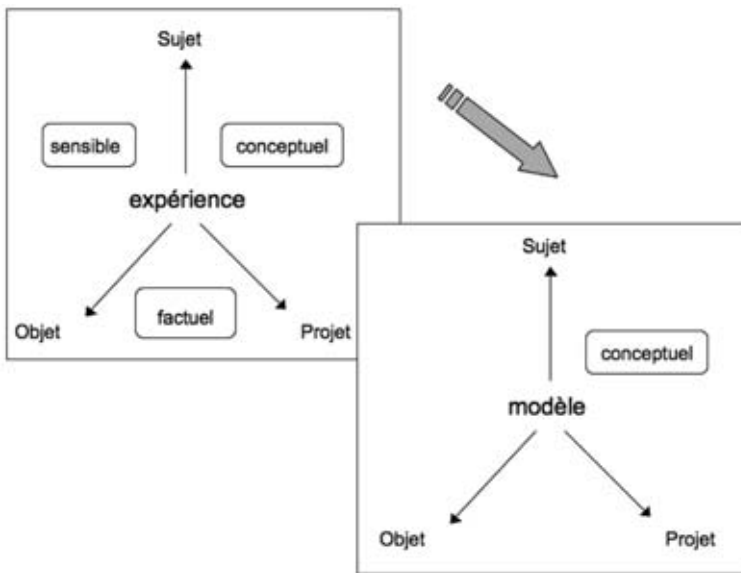
Toute expérience humaine, et donc tout modèle, comporte ces dimensions et ces composantes. Le rapport d'homologie entre expérience et modèle se définit par une combinaison entre une ou plusieurs composantes du modèle et une ou



plusieurs composantes de l'expérience. Par exemple, une composante factuelle du phénomène biologique expérimenté (des faits) peut être re-présentée par une composante conceptuelle du modèle (des équations), ou toute autre combinaison. Le rapport expérience-modèle peut donc prendre de très nombreuses formes multipliées par la variété, d'une part des expériences possibles et, d'autre part, des modèles possibles (figure 1). Ainsi, croiser successivement une des trois composantes de l'expérience avec une des trois composantes du modèle donne neuf combinaisons. À cela s'ajoutent des combinaisons multiples, entre plusieurs composantes de l'expérience et plusieurs composantes du modèle.

**Figure 1. Le modèle est une re-présentation de l'expérience (humaine)**

Modèle et expérience comportent trois composantes et trois dimensions. Seule la composante conceptuelle du modèle est envisagée dans cet article



Dans un modèle formel, tel qu'il est défini ici, c'est la composante conceptuelle qui apparaît au premier plan, même si les autres composantes sont aussi présentes. Plus généralement, la composante conceptuelle du modèle peut être de nature formelle (comme une équation) mais aussi structurelle (comme un schéma) ou analogique (comme une métaphore). D'autre part, un modèle dont c'est la composante factuelle qui apparaît au premier plan est, par exemple, un modèle réduit ou un prototype, tandis que pour la composante sensible ce sera par exemple un modèle situationnel (mise en situation).

Dans cet article, nous n'envisageons que la composante conceptuelle des modèles en biologie, c'est pourquoi seule cette composante a été indiquée sur la figure 1. Nous allons d'abord croiser la composante conceptuelle du modèle avec

les trois composantes de l'expérience, une à une. Chacun de ses trois croisements donnera un type de modélisation (section 4). Cela signifie que nous chercherons à déterminer la fonction du modèle lorsque celui qui modélise a une expérience du phénomène biologique d'ordre sensible ou factuelle, ou conceptuelle. Enfin, en intégrant les trois composantes de l'expérience, nous obtiendrons un quatrième type de modélisation.

#### 4. Les fonctions du modèle

Les modèles sont envisagés ici dans des contextes où l'enseignant met l'étudiant en situation d'apprendre quelque chose sur un phénomène biologique et de résoudre un problème. Cela pose différentes questions auxquelles il faudra répondre indépendamment du contexte de l'enseignement de la modélisation : que signifie expliquer, prédire, résoudre un problème avec un modèle ? Quelles options pédagogiques choisir pour l'enseignement de la modélisation ?

Quatre fonctions du modèle sont proposées ici (on se reportera au tableau I pour un résumé). Il est important de noter qu'un même modèle peut avoir plusieurs fonctions et que c'est sa fonction principale (la finalité première de la modélisation) qui est mise en avant dans chacun des quatre cas.

**Tableau I. Typologie des fonctions des modèles formels basée sur le rapport modèle/expérience**

Composante de l'expérience	Fonction du modèle formel	Pédagogie : donner à...	Usage de la simulation	Outils de simulation
Factuelle, matérielle	<i>Calculer</i>	... faire	Calculer, produire et gérer des données	Applet, base de données
Conceptuelle, mentale	<i>Expliquer</i>	... expliquer	Programmer un modèle, générer différents modes de représentation	Programmation (Scilab), calcul formel (Maple), modélisation (Stella)
Sensible, affective	<i>Décrire</i>	... voir	Visualiser, simuler en temps réel, partager	Animation (automate cellulaire, Flash)
Intégration des trois composantes	<i>Indiquer</i>	... vivre	Mettre en scène une situation-problème	Un espace virtuel (Co-Lab, cité macropédagogique)

Dans ce qui suit, chaque fonction du modèle est présentée de la même façon. On envisage d'abord l'activité de modélisation dans le contexte d'une recherche appliquée, avec l'exemple de la percolation et des incendies de forêts (voir l'annexe I pour une introduction à ces notions inspirée par un TP de l'UE présentée dans le document I). Dans certains cas nous proposons (comme simple hypothèse, à

ce stade de notre étude) l'option épistémologique de celui qui modélise. C'est enfin l'activité de modélisation dans le contexte de l'enseignement universitaire qui est abordée, avec des éléments sur l'option psychologique, l'option pédagogique et des exemples d'usages des simulations dans ce contexte. Nous espérons ainsi montrer le lien entre toutes les options citées par Weil-Barais et Lemeignan (1994 et section 1.3).

Une illustration, sur l'exemple de la croissance bactérienne, sera déclinée pour chaque partie. Ce thème a été choisi car il nous permet de présenter une innovation pédagogique mise en place à l'université Claude-Bernard-Lyon 1, comme exemple de notre quatrième fonction, *pour indiquer*, des modèles (section 4).

#### **4.1. Calculer : un modèle pour résoudre un problème ou prédire quantitativement ce qui pourrait se passer**

Le modèle de percolation comme modèle de la propagation des feux de forêt est utilisé ici pour calculer des valeurs de paramètres, des corrélations entre paramètres, etc.; par exemple, calculer la densité d'arbres au-delà de laquelle le feu se propage, autrement dit la densité critique de percolation (voir annexe 1). Dans cette approche de la modélisation, on va par exemple se centrer sur le développement de méthodes d'approximation pour calculer cette densité critique.

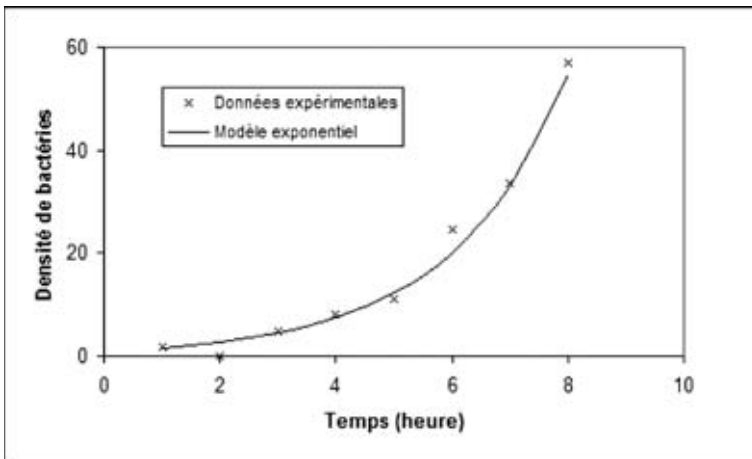
La fonction du modèle est de trouver une solution quantitative à un problème, que ce soit une évaluation ou une prédiction. Modéliser, ici, c'est opérer. On met au point des procédures, des méthodes de calcul et des modèles qui marchent. Ce type de modélisation privilégie la composante factuelle de l'expérience (figure 1) car l'accent est mis sur les faits, les opérations, le monde matériel et l'expérience concrète. On conçoit par exemple des protocoles d'expérimentations réelles ou simulées ayant pour but d'acquérir, stocker, extraire et extrapoler des données quantitatives.

Comment apprend-on dans ce contexte ? L'option psychologique la plus représentative est sans doute le béhaviorisme, la théorie du comportement (Lebrun, 2002). Un processus d'apprentissage privilégié est le conditionnement. Ainsi, l'activité pédagogique va donner l'occasion à l'apprenant, par la répétition, de s'exercer, s'entraîner; elle va lui « *donner à faire* » et attendre une réponse précise à chacun de ses *stimuli*. Cette approche conduit souvent à des leçons très séquentielles illustrées par des questions fermées (Lebrun, 2002; Ney *et al.*, 2005). Le modèle est plutôt utilisé comme une boîte noire : une simulation numérique, un logiciel de statistique ou un outil de calcul formel quand ils sont utilisés comme des calculateurs, des processeurs de données. Lebrun (2002) rapproche le béhaviorisme du courant épistémologique de l'empirisme (Bernard dans Rumelhard, 1994) de par la primauté de l'expérience et des faits. Martinand parle d'un modèle qui se contente de postuler la relation reliant certaines entrées et certaines sorties de la boîte noire (1994, p. 131).

La simulation permet de rentrer des valeurs et de regarder ce qui sort, probablement sur le mode de l'essai-erreur bien souvent employé par les étudiants dans ces cas là (de Jong & van Joolingen, 1998). La fonction principale de la simulation, dans ce cas, est de générer des données, des résultats quantitatifs.

Prenons l'exemple de la croissance d'une population de bactéries déjà évoqué dans la section 2. L'apprenant recueille des données décrivant l'évolution dans le temps du nombre de bactéries dans des colonies (expérimentation que l'on peut faire au laboratoire) et son travail de modélisation consiste alors à rechercher des courbes de tendance, des fonctions-modèles pour chaque type d'évolution temporelle constaté. C'est le modèle d'hypothèse de Legay (1997). Modéliser la croissance d'une population consiste à superposer des points expérimentaux et une fonction au plus près (figure 2) pour en déduire une vitesse de croissance, une prédiction sur le futur. Comme dans l'exemple de la percolation, pour modéliser la propagation du feu, une activité centrale de modélisation est de déterminer les valeurs des paramètres du modèle à partir du calcul et des données expérimentales.

**Figure 2. Ajustement d'une courbe exponentielle sur des points expérimentaux**



Nous venons donc de croiser la composante factuelle de l'expérience avec la composante conceptuelle du modèle (figure 1). Si ce type de modélisation se pratique (voir l'exemple de la percolation), il peut toutefois poser certains problèmes dans un contexte pédagogique. La difficulté principale, si on se focalise exclusivement sur ce type de modélisation, est que l'étudiant perd facilement de vue l'intention qui sous-tend le modèle et se met rapidement en action (presser des boutons sous le mode essai-erreur, faire fonctionner la boîte-noire), mais sans but.

#### 4.2. Expliquer : un modèle pour expliquer ce qui est ou ce qui se passe

Le modèle de percolation explique que la propagation du feu en forêt est la conséquence de la répartition spatiale des arbres et de son caractère aléatoire, irrégulier. Le raisonnement qui conduit à cette explication part de l'hypothèse que l'on peut décrire cette répartition spatiale avec une probabilité de liens autorisant la propagation directe de l'incendie entre deux zones favorables (annexe 1).

Dans ce cas, la fonction du modèle est d'établir un lien causal entre des lois, des formules et des phénomènes et ainsi d'offrir un cadre rationnel pour interpréter les faits qui ne sont eux-mêmes établis que dans ce cadre (cadre qui permet de concevoir l'expérience scientifique visant à établir ces faits). Modéliser, ici, c'est expliquer par le raisonnement. C'est la conjugaison de la formule de départ, du raisonnement logique et pour finir du résultat mathématique final qui explique le phénomène. Ce type de modélisation privilégie la composante mentale, conceptuelle, de l'expérience (figure 1), les idées, les concepts, les connaissances théoriques. Différents types de représentations sont possibles, la langue maternelle, les graphes, les schémas dynamiques, les formules mathématiques, et ils concourent à expliquer le phénomène (Duval, 1995). La fonction la plus importante est donc ici la fonction de représentation. L'activité de modélisation est une aide à la construction, à l'appropriation d'une représentation nouvelle, à l'élaboration des systèmes de symbolisation nécessaires à la représentation (Martinand, 1992).

Apprendre à modéliser, dans ce contexte, pourrait se traduire dans une conception cognitiviste ou constructiviste de l'apprentissage, car on apprend par construction de connaissances nouvelles situées dans une structure cognitive par rapport aux connaissances antérieures. L'apprentissage se fait quand l'étudiant comprend ce qui se passe, ce que lui disent le modèle et ses différentes représentations, ce que le modèle explique. Selon Lebrun, le courant épistémologique qui s'apparente le mieux au cognitivisme est le rationalisme. Il s'agit d'expliquer par le raisonnement, de construire des modèles à partir de structures cognitives déjà présentes chez l'étudiant.

L'activité pédagogique de modélisation donne à expliquer. L'apprenant est invité à expliquer ce qui se passe, à construire des représentations sous le mode formel des mathématiques. Elle permet de construire le chemin logique du raisonnement vers les concepts. Elle est centrée sur la mise en équations, en graphes, la mise en relation entre plusieurs représentations, puis la recherche de solutions. Pourtant la mise en équation n'est qu'une partie de la construction du modèle; il y a d'autres objets que les équations qui donnent sens au modèle, comme les paramètres par exemple (Orange, 1997, p. 31).

Les outils prototypiques sont les logiciels de calcul formel et les logiciels de modélisation qui demandent à l'étudiant, placé dans un environnement proposé par le logiciel, de construire et faire fonctionner son modèle. Les premiers, comme

le logiciel *Maple*® par exemple, sont particulièrement bien adaptés pour créer différents modes de représentation (graphique, histogramme, numérique, formule, texte) et résoudre formellement des équations. Les seconds, comme le logiciel de modélisation *Stella*®, proposent une modélisation de type physico-chimique caractérisée par la séparation des facteurs et une approche déterministe des problèmes. Il est probable que c'est le type de modèle que l'on retrouve le plus souvent dans l'enseignement de la modélisation à l'université (voir les documents 1 et 2).

Dans l'exemple de la croissance d'une population de bactéries, on proposera aux apprenants de retrouver, comme précédemment, la fonction-modèle mais, cette fois, en la déduisant non pas des données mais d'un raisonnement explicatif : c'est parce que la population se reproduit qu'il y a un facteur de proportionnalité entre le taux de reproduction et la taille instantanée de la population (équation différentielle du modèle exponentiel continu, document 4).

**Document 4. Le modèle exponentiel appliqué à une population de bactéries**

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

La taille de la population de bactéries est notée  $N$ , le temps  $t$ . Le taux d'accroissement de cette population,  $r$ , est la différence entre le taux de natalité et la taux de mortalité.

C'est le modèle de mécanisme de Legay (section 2).

Nous venons cette fois de croiser la composante conceptuelle de l'expérience avec la composante conceptuelle du modèle (figure 1). Un écueil, si l'on se centre exclusivement sur ce type de modèle, est d'amener l'étudiant à confondre équation, représentation et explication, et à perdre le sens du modèle, ses conditions d'application, son lien avec les variables du problème. L'étudiant est capable de reconnaître le modèle et se contente d'expliquer les phénomènes par des automatismes explicatifs : « *c'est comme ça car c'est le modèle exponentiel* ».

**4.3. Décrire : un modèle pour reproduire ce qui se passe et/ou prédire qualitativement ce qui pourrait se passer**

Une simulation, basée sur le modèle de percolation, est utilisée pour illustrer de manière la plus directe possible (en l'occurrence sur une grille bidimensionnelle qui offre une vue d'avion), la propagation du feu (document 3) et les *patterns* de propagation (proche en proche, ou blocs). Des méthodes de visualisation et d'analyse graphique des *patterns* (par exemple du degré d'agrégation) sont développées. On intégrera dans le modèle différents types d'interactions entre les arbres (la taille du voisinage de combustion) pour constater des changements de *patterns*. Le chercheur développe des simulations, individu-centrée, orientée-objet ou

orientée-agent, qui ne sont pas tant des calculateurs résolvant des équations du modèle (sections 4.1. ou 4.2.), que des scénarios virtuels tendant à mimer un aspect complexe du réel, dans ses différentes dimensions, spatiales et temporelles (Varenne, 2005).

La fonction du modèle, ici, est avant tout de simuler : rejouer, reproduire pour obtenir la meilleure description des phénomènes. Modéliser, dans ce cas, c'est reproduire, décrire, réaliser une représentation fidèle du phénomène. Plus que d'expliquer ou d'agir, il s'agit avant tout d'observer. Ce type de modélisation privilégie la composante sensible de l'expérience et les interactions sujet-objet (figure 1). La visualisation, comme outil de représentation et de dialogue, a une place importante dans le processus de modélisation. Le modèle peut être conceptuel (de Jong & van Joolingen, 1998 et introduction) mais le concept n'est pas justifié en soi (comme dans le modèle explicatif). C'est la relation ou un ensemble de relations entre les concepts qui construit le modèle.

Cette approche de la modélisation pourrait s'apparenter à certains courants épistémologiques comme le naturalisme. On cherche à faire des typologies, à repérer des propriétés homogènes, à trouver des indicateurs de ces types. Dans une option naturaliste, on nomme, décrit, classe et organise. L'accumulation des observations, du savoir, peut être un but en soi. Il n'y a pas vraiment « à comprendre ou expliquer ou rechercher des relations causales mais à accumuler les connaissances comme un trésor » (Rumelhard, 1994, p. 130).

Comment apprend-on avec ce type de modèles ? L'activité pédagogique donne à voir. Il est important d'être exhaustif, de faire un tour aussi complet que possible du phénomène (de constituer ou consulter des bases de données par exemple) et d'imiter la réalité au plus près. L'objectif est de décrire une masse d'observations.

L'outil privilégié est une forme de simulation qui propose un déroulement sous nos yeux du phénomène, en temps réel. Ce type de simulation se présente par exemple sous la forme d'une animation (voir Tversky *et al.* [2002] pour une comparaison animation/simulation et Chomat *et al.* [1992] pour un exemple d'enseignement à l'aide d'une animation).

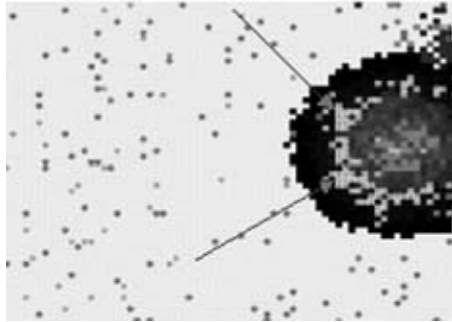
Dans l'exemple des bactéries, on va représenter chaque bactérie par un point et observer la dynamique de ces points à l'écran. Tout est comme si on observait les organismes réels au laboratoire. Il s'agit d'observer l'évolution et la forme des colonies de bactéries, en présence d'antibiotique par exemple (figure 3).

Cette fonction du modèle est le résultat d'un croisement entre la composante sensible de l'expérience et la composante conceptuelle du modèle (figure 1). Le problème, si on se focalise sur ce type de modèle uniquement, est que les étudiants ne voient pas qu'ils sont guidés dans leurs observations. L'approche privilégiée est inductive et amène les étudiants à passer de l'observation du cas particulier au

principe général. Il est tentant de confondre cette simulation, cette reproduction au plus près de la réalité, avec une explication.

**Figure 3. Simulation de la croissance d'une population de bactéries**

*La colonie de bactéries en train de croître au cours du temps et la croissance est régulée par un antibiotique. Les flèches indiquent des zones où les bactéries sont attaquées par l'antibiotique (source : Kerr, 2005).*



**4.4. Indiquer : un modèle pour s'orienter, comprendre, décider et prédire le sens des choses, des phénomènes**

Le modèle de propagation des incendies est inscrit dans un contexte social et décisionnel. C'est un modèle fait pour être compris, interprété et utilisé. Ce travail constituera à lui seul une réalité combinant réflexion théorique, actions de terrain et dialogue entre partenaires. Le modèle est, par exemple, un outil d'aide à la décision et d'accompagnement de projets d'aménagement et de prévention des incendies de forêt qui intègre les 3 dimensions de l'expérience (section 3) :

- une intention (surveiller et prévenir les feux, évaluer des risques, protéger ou restaurer des populations, planifier et aménager le territoire...) ;
- des objets, des conditions (contexte humain et écologique, statistiques des incendies de forêt, paramètres de la dynamique de propagation du feu, facteurs de déclenchement du feu...) ;
- un projet de modélisation (objectifs de réalisation, acquis, développement, contrôles, transferts...).

La fonction du modèle, dans ce cas, est de soutenir une intention et d'envisager des décisions (c'est bien dans cette optique que l'on a besoin de modéliser les incendies de forêt). Le lien avec l'expérimentation de terrain et la problématique est essentiel (contrairement au modèle explicatif précédent qui, s'il se base éventuellement sur des données, ne prend pas en compte le contexte, l'expérience du phénomène de celui qui modélise étant essentiellement d'ordre mental). Modéliser, ici, c'est indiquer une direction et donner du sens (section 3). Le langage mathématique va permettre à celui qui est engagé dans une problématique biologique



d'être plus compétent dans ses jugements (prendre des décisions) et dans sa capacité d'utiliser son imagination (enrichir ses représentations, faire face à des problèmes non standard).

Ce type de modélisation intègre les trois composantes (figure 1), factuelle, sensible et mentale de toute expérience humaine. Le langage des mathématiques permet une représentation rigoureuse et formelle de l'expérience mentale, une modélisation efficace de l'expérience pratique, et véhicule aussi de l'expérience relationnelle et sensible. Ce n'est pas le résultat final qui est à enregistrer comme un savoir mais la représentation symbolique véhiculée par le modèle qui permettra à d'autres personnes de trouver un chemin de maîtrise (conjuguant connaissance et compétence) dans le domaine.

L'activité pédagogique donne à vivre cette fois. On ne peut pas se contenter de demander de résoudre une équation, de décrire le modèle ou de suivre une recette (des statistiques par exemple). L'activité est personnalisée pour permettre une internalisation par chaque étudiant des connaissances tout au long du parcours pédagogique proposé. Elle donne une grande place à la démarche de modélisation au lieu d'être centrée exclusivement sur le contenu et les résultats. Des parcours de ce type sont peut-être difficiles à mettre en place dans une approche universitaire traditionnelle (cours/TD) tandis qu'ils bénéficient pleinement des approches par apprentissage actif, comme, par exemple, l'apprentissage par problème (Lebrun, 2002), l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984), ou bien encore l'apprentissage par investigation (« *inquiry learning* », de Jong & van Joolingen, 1998). Ces trois approches ont en commun de proposer aux étudiants une quête, de se confronter à l'inconnu, avec des phases d'apprentissage alternant le travail en groupe et le travail individuel et incluant la problématisation, la recherche ouverte d'information, la familiarisation avec le problème et ses objets, la prise d'initiative et de décision... Il s'agit de proposer des activités permettant à l'apprenant de trouver son chemin propre et non de l'obliger à passer par des étapes fixées conduisant à un résultat prédéfini et unique.

L'ordinateur et Internet peuvent aider l'enseignant à mettre en scène l'activité, et à mettre l'apprenant en situation, mais ce dernier gardera une responsabilité dans la construction de cette situation. Des scènes virtuelles sont réalisées par les enseignants et les concepteurs. Par exemple, la plate-forme d'apprentissage par investigation scientifique Co-Lab® (van Joolingen et al., 2005) permet de gérer les aspects conceptuels (outils de modélisation), affectifs (gestion de la collaboration, de la motivation) et factuels (expérimentations réelles filmées et guidées par un robot) de l'expérience (voir aussi le concept de cité macropédagogique, plate-forme de formation, d'enseignement et de recherche dédiée à un thème, Nifle, 2004b).

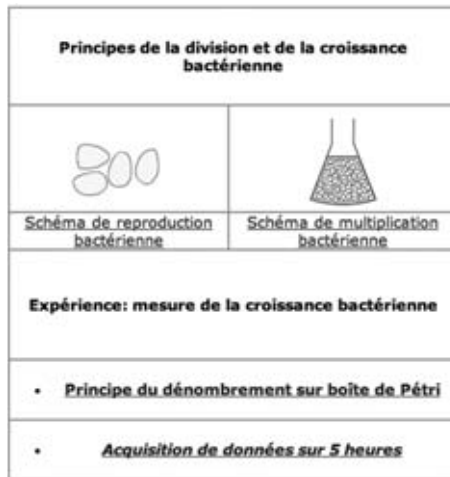
Sur le thème de la croissance d'une population de bactéries, une innovation pédagogique a été mise en oeuvre à l'université Claude-Bernard-Lyon I (Ney et al.,

2004) et fait toujours partie d'une UE de licence I à ce jour. Les étudiants suivent un apprentissage par problème et travaillent sur deux *situations-problèmes* successivement sur un semestre (l'une d'entre elles est présentée en annexe 2).

Ils disposent pour cela d'une séance de travaux tutorés hebdomadaire en présentiel, encadrée par un tuteur, et d'une aide méthodologique, un guide pour travailler en groupe (de 4 ou 5 étudiants) suivant les phases classiques d'une APP. De plus, ils ont accès à un laboratoire virtuel (une animation développée en flash permettant de recueillir des données, figure 4) et à un ensemble d'aides conceptuelles (cours et exercices en ligne sur le site web MathSV). Une attention particulière est donnée au fait que les animations ne sont efficaces que lorsqu'elles proposent une correspondance directe avec le problème, dans l'espace et dans le temps, et qu'elles sont interactives (Tversky *et al.*, 2002). Dans ce contexte, l'évaluation des progrès des étudiants dans la démarche intellectuelle de modélisation (Weil-Barais & Lemeignan, 1994) se fait au travers des comportements en présentiel et par le biais d'une grille d'évaluation du compte rendu, à l'opposé d'une évaluation des performances qui sommerait des résultats attendus.

**Figure 4. Page d'accueil du laboratoire virtuel, issue du site web MathSV**

Elle montre la liste de liens vers quatre animations pour l'étude de la croissance d'une population de bactéries (voir aussi document 4).



Dans cet exemple, l'intégration des trois composantes, sensible, factuelle et mentale, se fait au travers du problème et de la situation des travaux tutorés. L'étudiant ne se contente plus de réfléchir ou de s'exercer et chercher les solutions prédéterminées par l'enseignant. Il doit s'organiser pour travailler en groupe, prendre des initiatives et des décisions, s'exprimer sur ses idées et ses résultats. Son but est la réussite du projet en suivant la stratégie de résolution du problème adoptée par le groupe.

## 5. Conclusion : évaluation de la typologie et propositions pour l'enseignement de la modélisation

La typologie des fonctions des modèles peut être utilisée à double titre. Par l'enseignant qui veut initier ses étudiants à la modélisation en biologie et qui pourra faire fonctionner les modèles d'une manière ou d'une autre en connaissance de cause. Pour le chercheur en didactique, la typologie demande à être évaluée. Trois critères d'évaluation sont proposés par De Vries (2001), celui de nécessité, d'exhaustivité et d'exclusivité que nous reformulons un peu différemment comme des critères de relevance (nécessité), de cohérence (exhaustivité et exclusivité) et de performance.

Pour tester si les quatre fonctions sont pertinentes nous avons cherché des points de recouvrement avec des types de fonctions des modèles décrits dans la littérature (au moins pour les modèles selon Legay, 1973, 1997). Les quatre fonctions sont cohérentes dans la mesure où elles sont basées sur le rapport expérience/modèle (modèle formel ici) et où les trois composantes de toute expérience ont été envisagées. La dernière fonction du modèle est basée sur une intégration des trois composantes. Cependant, certains modèles et certaines simulations pourront remplir plusieurs fonctions selon l'usage qui en est fait, comme on a pu le constater avec les deux exemples qui sont déclinés dans les quatre fonctions (la percolation et la démographie). Ce ne sont pas les modèles qui sont par leur nature d'un type ou d'un autre mais la fonction qu'ils prennent pour l'utilisateur en situation de résoudre un problème par la modélisation. Enfin, la performance de cette typologie devra être mesurée par rapport à la proposition suivante. Il faut prendre en compte les trois composantes de l'expérience : factuelle (matérielle), sensible (affective) et mentale (conceptuelle) dans la mise en place de supports et de méthodes pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation en sciences expérimentales (biologiques). Il serait intéressant d'analyser le contenu de plusieurs enseignements de modélisation (les documents 1 et 2 et d'autres) en utilisant la typologie proposée.

Cette typologie a la particularité d'être basée sur une théorie (dont la pertinence pour la didactique des sciences reste certes à démontrer) plutôt que sur une approche empirique. Cependant, un lien pourrait être établi entre les fonctions des modèles présentées ici et d'autres catégorisations. Celle de Lebrun présente un certain nombre de congruences avec la nôtre et la complète par des associations entre option épistémologique, option psychologique et option pédagogique. Nous sommes partis du postulat que ces options, ces points de vue, influencent la façon dont sont utilisés les modèles et les simulations (Hilborn & Mangel, 1996 ; Lebrun, 2002). Nous devons faire trois remarques importantes à ce propos. Tout d'abord ces options théoriques (constructivisme, béhaviorisme, etc.) sont présentées sous une forme qui peut paraître caricaturale. De plus, un point de vue théorique ne commande pas de façon déterministe la conception des fonctions

pédagogiques du modèle ou de la simulation (DeVries, 2001), mais, toutefois, celles-ci peuvent être vues comme une implémentation d'un point de vue théorique sur l'apprentissage, qu'il soit implicite ou explicite. Enfin, ni toutes les théories de l'apprentissage, ni toutes les postures épistémologiques n'ont été citées. Il serait intéressant d'étudier la nature des modèles selon les différents courants épistémologiques, idéalisme/réalisme, empirisme/rationalisme, universalisme/relativisme... (on pourra lire la thèse de Darley [1994] pour une approche très accessible de l'épistémologie des sciences au travers de l'exemple de la biologie, mais aussi d'Espagnat [1979] et Chalmers [1987]). Ceci fait l'objet d'une recherche en cours menée par un groupe de travail dont l'auteur fait partie.

Comment apprend-on à modéliser, à se servir des modèles ? Cela dépend donc de ce que l'on entend par apprendre. De plus, il est certain que les jeunes étudiants ne construisent pas des modèles mais les adaptent, les manipulent. Les enseignements de modélisation en biologie sont exceptionnels au niveau de la licence. La tendance est de se contenter de résoudre des systèmes d'équations et d'interpréter les solutions (une gymnastique certes nécessaire pour ceux qui voudront aller plus loin). Dans ce cas, il est possible de remplacer avantageusement l'expérience vécue d'un problème réel, issu de l'expérimentation de laboratoire ou du monde professionnel, par des activités sur des représentations théoriques ou des simulations. En effet, les composantes factuelles et sensibles de l'expérience (de celui qui s'approprie le problème puis le modélise) sont négligeables dans cette optique. Dans cet article, nous soulignons que toute expérience (humaine) comporte les trois composantes et que nier l'une ou l'autre peut conduire à des difficultés pour l'étudiant. Nous proposons une fonction *indiquer* des modèles qui intègre les trois composantes de l'expérience. Nous proposons une pédagogie expérientielle (Kolb, 1984). Une innovation pédagogique a été présentée brièvement (on trouvera une description un peu plus détaillée dans Ney et al., 2004). Nous préconisons donc de s'assurer de l'intégration de toutes les composantes de l'expérience et, en particulier, de redonner sa place à l'expérience qui ne soit pas purement mentale (manipuler des paramètres dans une simulation) mais située (dans ce cas : partir d'une situation inconnue, planifier une expérience, prendre des décisions concrètes) et à l'interaction sensible (manipuler des objets, se motiver grâce au travail entre pairs).

L'enseignement de la modélisation formelle en biologie est un enseignement de nature interdisciplinaire au cœur duquel se trouve le rapport entre le modèle et l'expérience. Ici l'expérience est entendue au sens large comme celle d'un apprenant qui, dans une démarche de modélisation, est confronté à un phénomène biologique. Pour concevoir des dispositifs pédagogiques d'apprentissage de la modélisation formelle, nous n'avons d'autre choix que de comprendre la nature de ce rapport. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.
- BACHELARD G. (1971). *Bachelard, épistémologie*. Textes choisis par Dominique Lecourt. Paris : PUF.
- BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éd.). *Élaboration et justification des modèles*. Paris : Maloine.
- BESSIRE D. & BAKER R.C. (2005). The french tableau de bord and the american balanced scorecard: a critical analysis. *Critical Perspectives on Accounting*, vol. 16, n° 6, p. 645-664.
- BOUSQUET F. (2001). *Modélisation d'accompagnement, simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Claude-Bernard-Lyon 1, Lyon.
- CHALMERS A.F. (1987). *Qu'est-ce que la science ?* Paris : Éd. La Découverte.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1992). Modèle particulière et démarche de modélisation. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*. Paris : INRP, p. 119-170.
- COQUIDÉ M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Paris-Sud 11, Orsay.
- COQUIDÉ M. (2003). Face à l'expérimental scolaire. In J.-P. Astolfi (dir.). *Éducation, formation : nouvelles questions, nouveaux métiers*. Paris : ESF, p. 153-180.
- CONDETTE J.-P. (1984) *Conseil et cohérence dans l'organisation : contribution à la théorie des cohérences*. Thèse de doctorat en sciences de l'éducation, université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, Saint-Denis.
- DARLEY B. (1994). *L'enseignement de la démarche scientifique dans les travaux pratiques de biologie à l'université, analyses et propositions*. Thèse de doctorat de l'université Joseph-Fourier-Grenoble 1, Grenoble.
- D'ESPAGNAT B. (1979) *À la recherche du réel, le regard d'un physicien*. Paris : Gautier-Villard : Bordas.
- DE VRIES É. (2001). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ? *Revue française de pédagogie*, n° 137, p. 105-116.
- DEWEY J. (1993). *Logique : la théorie de l'enquête*. Paris : PUF.
- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.
- FORESTAL C. (1991) Quelques réflexions sur l'approche systémique et ses applications en didactique des langues étrangères. In *Introduction à la recherche scientifique en Didactique des Langues*. Paris : Didier : CREDIF, p. 217-231.

- GENZLING J.-C. & PIERRARD M.-A. (1994). La modélisation, la description, la conceptualisation, l'explication et la prédiction. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- GROSS L. (1992). *Workshop on quantitative sciences: curriculum for life science students*. Tennessee : Knoxville. Février 6-8. Summary report.
- HACKING I. (1989). *Concevoir et Expérimenter*. Paris : Bourgeois.
- HILBORN R. & MANGEL M. (1997). *The ecological detective: confronting models with data*. Monographs in population biology. Princeton: Princeton University Press.
- JOHNSON B. J. (1995). Applying computer simulation models as learning tools in fishery management. *North American Journal of Fisheries Management*, n° 15, p. 736-747.
- JONG (DE) T. & VAN JOOLINGEN W. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, n° 68, p. 179-202.
- KERR G. (2005). BAIT : Bacteria – Antibiotic Interaction Tool. *ERCIMS news*, n° 60.
- KOLB D.A. (1984). *Experiential learning, experience as the source of learning and development*. Prentice Hall : Englewood Cliffs, NJ.
- LEBRUN M. (2002). *Théories et méthodes pédagogiques pour enseigner et apprendre : quelle place pour les TIC dans l'éducation ?* Bruxelles : De Boeck.
- LEBRETON J.-D. (1973). *Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique de population*. Paris : Informatique et Biosphère.
- LEGAY J.-M. (1973). *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*. Paris : Informatique et Biosphère.
- LEGAY J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Versailles : INRA éditions.
- LEGAY J.-M. (2000). L'informatique et les sciences de la vie. In *Encyclopedia Universalis*.
- LEGAY J.-M. & SCHMID A.-F. (2004). *Philosophie de l'interdisciplinarité. Correspondance (1999-2004) sur la recherche scientifique, la modélisation et les objets complexes*. Paris : Éditions PETRA.
- LETT C. (1999). *Modélisation et simulation de la dynamique des écosystèmes forestiers : des modèles agrégés aux modèles individuels spatialisés*. Thèse de doctorat de l'université Louis-Pasteur-Strasbourg I, Strasbourg.

- MAISCH C. (2006) *Conception d'un outil de classification et d'un outil de scénarisation de TP*. Mémoire de master recherche en didactique des sciences, université Joseph-Fourier-Grenoble 1, Grenoble.
- MARTINAND J.-L. (1992). Texte du coordinateur. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*. Paris : INRP.
- MARTINAND J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on tirer des travaux dans la perspective du développement de curriculum ? In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- NEY M., NIFLE R., CHARLES S., MACEDO-ROUET M., BATIER. C. & HUMBLLOT L. (2004). Approche méthodologique pour faire évoluer la pédagogie en TD vers un apprentissage actif soutenu par des TICE. *Actes du colloque annuel AIPU (Association Internationale de Pédagogie Universitaire)*, Marrakech, mai 2004.
- NEY M., MACEDO-ROUET M., CHARLES S. & LALLICH-BODOIN G. (2005). Are well-designed web sites efficient for learning mathematics at the undergraduate level ? *Actes de la conférence EARLI (European Association for Research on Learning and Instruction)*, Chypre, août 2005.
- NIFLE R. (1986). *Au coeur du sujet : la théorie de l'instance et des cohérences*. Brassac : Éditions de Poliphile. Disponible sur Internet : [http://journal.coherences.com/article.php3?id\\_article = 208](http://journal.coherences.com/article.php3?id_article = 208) (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (1994). *Le sens*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com/article17.html> (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (1995) *Pour une compréhension de l'entreprise : construction de types cohérents de représentations*. Thèse de doctorat en sociologie, université Paris-Sorbonne-Paris 4, Paris.
- NIFLE R. (2004). *La science et l'art comme re-présentations de l'expérience humaine*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com/article68.html> (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (2004). *Cité macropédagogique : plate-forme d'enseignement et de formation*. Disponible sur Internet : [http://journal.coherences.com/article.php3?id\\_article = 72](http://journal.coherences.com/article.php3?id_article = 72) (consulté le 18 octobre 2006).
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- PAJOT S. (2001). *Percolation et Économie*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Nantes. Disponible sur Internet : <http://percolation.free.fr> (consulté le 5 juin 2006).

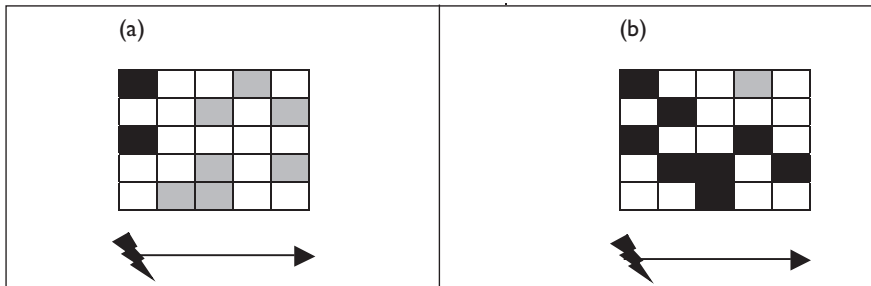
- RUMELHARD G. (1994). Spécificité et difficulté de l'apprentissage de la modélisation en biologie. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- TVERSKY B., BAUER MORRISON J. & BETRANCOURT M. (2002). Animation : can it facilitate ? *Int. J. Human-Computer Studies*, n° 57, p. 247-262.
- VARENNE F. (2005). Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations. *Compte-rendu du séminaire externe d'épistémologie de l'équipe de recherche STOICA* (Savoirs, Techniques, Organisation, Innovation, Conception Appliqués, équipe du Centre des humanités de l'INSA de Lyon).
- VAN JOOLINGEN W.R., DE JONG T., LAZONDER A.W., SAVELSBERGH E.R. & MANLOVE S. (2005). Co-Lab : research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning. *Computers in Human Behavior*, n° 21, p. 671-688.
- WEIL-BARISA. & LEMEIGNAN G. (1994). Approche développementale de l'enseignement et de l'apprentissage de la modélisation. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 85-113.



## Annexe I. Le modèle de percolation appliqué à la propagation des feux de forêts

Dans le domaine des mathématiques, l'étude de la percolation tire son origine d'une question posée en 1954 par S. R. Broadbent sur la pénétration d'un fluide ou d'un gaz, dans un labyrinthe formé de passages ouverts ou fermés (Pajot, 2001). J. M. Hammersley estimant que la singularité du problème nécessitait une terminologie qui lui soit propre propose de le baptiser du nom de percolation, par analogie avec la fabrication du café dans un percolateur.

Prenons le cas des incendies de forêts. Au cours de son déplacement, le feu rencontre des zones qui sont favorables à sa propagation et des zones qui sont défavorables. On peut modéliser ce phénomène sur un paysage bidimensionnel (une vue d'avion) constitué d'une mosaïque de zones favorables (des zones où se trouve du combustible, de la végétation essentiellement, cases grises) et de zones défavorables (cases blanches). La dynamique du modèle est la suivante : à chaque pas de temps, le feu (cases noires) se propage à toutes les zones favorables contiguës (la zone contiguë peut être définie, par exemple, par les huit cases voisines). La question est de savoir dans quelles conditions le feu va se propager de gauche à droite de la mosaïque. Si c'est le cas, on dira que le phénomène a percolé (c'est le cas b).



Dans ce modèle, cela va dépendre de la proportion (densité) de zones favorables au sein de la mosaïque (elle est de  $9/25$  sur a et sur b). Cela peut aussi dépendre de la distribution spatiale des zones favorables dans la mosaïque ou de la taille de cette mosaïque. À chaque densité spatiale de zones favorables va correspondre une probabilité de percoler. Lorsque cette probabilité devient un, on dit que l'on a atteint la densité critique, ou seuil de percolation.

## Annexe 2. Bio-capteurs de bactéries

Dans le domaine de la conservation des aliments, le respect de la chaîne du froid est capital pour éviter tout risque de contamination des aliments par des bactéries pathogènes.

En 2001, Renaud Vaillant, un étudiant lyonnais de l'école centrale, a eu l'idée d'un bio-capteur qui permette de détecter si un produit alimentaire est resté convenablement réfrigéré. Si ce n'est pas le cas, le code barre sur l'emballage s'obscurcit et le produit ne peut plus passer en caisse.

L'idée de cet étudiant a été de mettre un substrat contenant des micro-organismes sur le film d'emballage du produit. Ces organismes se multiplient rapidement s'ils sont à température ambiante et induisent alors le changement de couleur du bio-capteur. Le nombre de bactéries dans le bio-capteurs est un indicateur de l'état sanitaire du produit.

Le service biotechnologies d'une entreprise d'agro-alimentaire a décidé d'adapter ce système à leur gamme de produits. L'entreprise a déjà mis au point un bio-capteur qui contient au départ 100 bactéries et qui change de couleur à partir de 5500 bactéries. Leurs produits ne doivent pas être exposés à température ambiante (25 °C) pendant plus de 10 heures.

Dans ce cadre, votre mission consiste à proposer un modèle permettant de choisir la ou les bactéries adéquates. Comme d'autres applications pourront être envisagées, il vous est demandé d'être le plus général possible.

Pour vous aider dans votre tâche, vous disposez (sur le site <http://mathsv.univ-lyon1.fr>) de :

- quatre bactéries pour faire des expériences (sur 5 heures ou sur 30 heures) dans le laboratoire virtuel.
- une liste de 20 autres bactéries avec leurs caractéristiques.

# Modélisation : une approche épistémologique

**Gérard Sensevy**, CREAD, université Rennes 2 ; IUFM de Bretagne ;  
gerard.sensevy@bretagne.iufm.fr

**Jérôme Santini**, CREAD, université Rennes 2 ; IUFM de Bretagne ;  
jerome.santinil@ac-nice.fr

---

*Nous développons dans cet article une approche épistémologique de la modélisation à partir des travaux de deux auteurs de l'école de Stanford, Cartwright et Hacking, et de leur référence commune à Fleck. Dans cette approche, il s'agit de se défaire de l'idée classique du modèle comme simple application ou représentation de lois scientifiques. Avec les auteurs cités, nous entendons montrer pourquoi les modèles sont intrinsèquement contextuels et sont affaire de capacités plus que de lois, comment ces modèles réalisent l'articulation du concret de l'expérience avec l'abstrait de la théorie et sont, enfin, l'expression d'un collectif de pensée. De cette épistémologie novatrice, nous dégageons de premières implications didactiques pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences*

Dans cet article, nous procédons tout d'abord (section 1) à une réflexion épistémologique relative à la notion de modèle. Nous appuyant principalement sur les travaux de Cartwright (1983, 1999), Fleck (1934/2005), et Hacking (1983/1989), nous proposons une manière particulière de décrire l'activité scientifique qui nous paraît, à la fois, plus rigoureuse et plus respectueuse de la réalité de cette activité que la plupart des descriptions classiques, et d'un certain pouvoir heuristique pour la recherche en didactique.

Dans la seconde partie de l'article (section 2), nous envisageons certaines implications didactiques possibles issues de la réflexion conduite dans la première partie.

## I. Modèle, style de pensée, expérimentation

### I.1. Qu'est-ce qu'un modèle ?

La conception de ce qu'est un modèle dépend sans doute étroitement d'un système d'idées relatif à ce que sont la science et l'activité scientifique même. Selon l'épistémologie – au sens de la théorie de la connaissance – dans laquelle on se situe, le modèle, au sein de la théorie qui l'intègre, pourra être pensé différemment. Dans ce qui suit, nous voulons présenter une conception que nous pourrions qualifier d'empirique, et cela à un double titre : empirique parce qu'elle tente de réévaluer l'importance de l'expérience, de la situation, et des instruments, dans la production continue des modèles; mais empirique aussi parce qu'elle s'efforce continûment de produire une épistémologie de la science telle qu'elle se fait<sup>1</sup>, et non à partir de la description plus ou moins scolastique que certains épistémologues classiques ont pu en produire<sup>2</sup>.

#### • Modèle, localité et multiplicité

Concevoir un modèle, c'est, sous une certaine description, produire une loi. Quelle peut être alors la nature d'une telle loi ? Cartwright écrivit en 1983 un livre au titre provocateur : *How The Laws of Nature Lie*<sup>3</sup>. Contrairement à ce que pourrait laisser penser ce titre, il ne s'agit pas d'un ouvrage d'épistémologie relativiste, qui contesterait la prétention de la science à dire le vrai, mais plutôt d'une invitation à s'éloigner d'une conception universaliste de la science, au sein de laquelle les lois de la nature, valables toujours et partout, gouvernent nos expériences. Cartwright a développé depuis ce point de vue, et voici comment elle envisage un modèle emblématique,  $F = ma$ , qui lui paraît paradigmatique d'une science réelle, dans laquelle on utilise des concepts précis reliés par d'exactes relations déductives : « *En mécanique, nous avons ce genre de relation exacte, mais au coût d'introduire des concepts abstraits comme force, concepts dont la relation au monde doit être médiée par des concepts plus concrets. Ces concepts plus concrets se révèlent très spécifiques dans leur forme : les formes sont données par les modèles interprétatifs de la théorie, par exemple, deux masses compactes séparées par une distance  $r$ , l'oscillateur harmonique linéaire, ou le modèle pour une charge se déplaçant dans un champ magnétique uniforme. Ceci assure à force un contenu très précis. Mais cela signifie aussi que ce contenu est sévèrement limité dans sa gamme d'applications. Il ne peut être attaché seulement qu'à ces situations qui peuvent être représentées par ces modèles hautement spécialisés* »<sup>4</sup> (Cartwright, 1999, p. 3). On comprend

---

1 En cela, cette épistémologie se rapproche de la moderne sociologie des sciences (Bloor, 1982; Latour, 1995), sans en partager toutefois nombre de caractéristiques.

2 Nous reviendrons *infra* (paragraphe 4 dans cette partie I) sur la caractérisation de cet empirisme.

3 *Comment les lois de la nature mentent.*

4 Nous avons produit nous même la traduction, volontairement quasi-littérale, de toutes les citations de Cartwright reproduites dans cet article. Certaines fois, nous avons fait suivre un terme particulier par le mot anglais utilisé par l'auteur.

donc l'argument : les sciences produisent des modèles explicatifs du monde, mais pas du monde tel qu'il est, bien plutôt du monde tel qu'il est reconstruit dans l'enceinte expérimentale : cela ne diminue en rien la vérité des assertions scientifiques, et la conception empirique n'est nullement relativiste. Au contraire, pourrait-on dire, puisqu'elle décrit la science comme production complexe et organisée de la vérité (au sein de ces situations représentées par des modèles hautement spécialisés), le « localisme » seul pouvant précisément garantir cette vérité : il s'agit donc de réévaluer l'importance des situations dans lesquelles le vrai s'élabore.

Cartwright peut ainsi énoncer l'une des thèses fondamentales de son propos : « L'impressionnant succès empirique de nos meilleures théories physiques peut faire arguer en faveur de la vérité de ces théories mais pas pour leur universalité. Plutôt, c'est le contraire qui est le cas. La manière propre dont la physique a l'habitude de générer des prédictions précises montre quelles sont ses limites. Les concepts abstraits théoriques de la haute physique décrivent le monde via les modèles qui interprètent ces concepts plus concrètement. Ainsi, les lois de la physique s'appliquent seulement où ses modèles s'ajustent (fit), et cela, apparemment, inclut seulement un domaine très limité de circonstances » (ibid., p. 4).

Cartwright propose ainsi un arrière-fond tout à fait particulier au travail épistémologique, en empruntant une grande partie de son argumentation à Neurath (1882-1945), savant et politique, membre fondateur du cercle de Vienne. L'une des fonctions de cet arrière-fond consiste à lutter contre la tendance, forte selon elle, à se représenter l'édifice des sciences comme celui d'une pyramide, au sommet de laquelle on trouve la physique, la psychologie occupant la base de cette pyramide (figure 1).

Figure 1. La pyramide des sciences (Cartwright, 1999, p. 7)

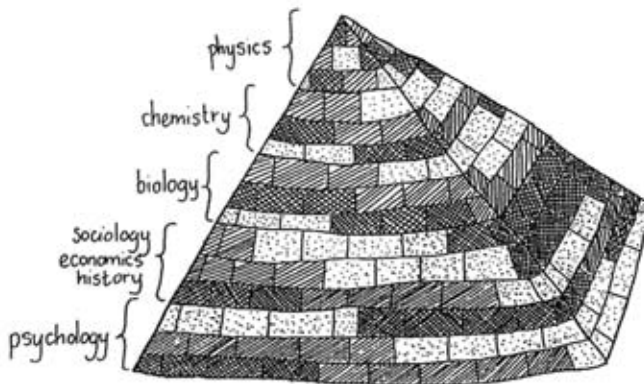


Figure 0.1 Pyramid. Source: Rachel Hacking.

Le cœur de cette représentation résident en ceci : « les lois et concepts de chaque domaine scientifique sont réductibles à ceux d'un domaine plus fondamental, tous disposés selon une hiérarchie » (Cartwright, 1999, p. 6). Il faut saisir, ici, les liens logiques existant entre l'universalisme des lois de la physique, et le type de réductionnisme que la conception pyramidale suppose. Considérer les lois de la physique comme universelles justifie ce réductionnisme particulier qu'est le physicalisme : puisque les lois de la physique sont universelles (et indépendantes des contextes), elles sont valables partout, et on peut donc ramener tous les processus (en particulier les processus vitaux)   des processus physiques, sans les dénaturer.

Cartwright, en s'appuyant sur Neurath (1983), propose alors une vue alternative, qu'on peut figurer comme sur la figure 2.

**Figure 2. Le monde pommelé (Cartwright, 1999, p. 8)**

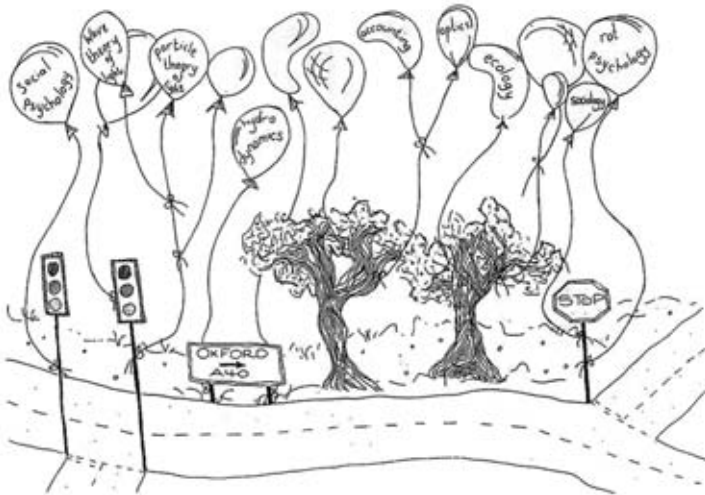


Figure 0.2 Source: Rachel Hacking.

Elle commente ainsi ce dessin : « Les sciences sont pour chacune d'entre elles reliées, à la fois pour ce qui concerne les applications et les confirmations, au même monde matériel; leur langage est le langage partagé des  v nements spatio-temporels. Mais au-delà, il n'y a pas de système, pas de relations fixes entre elles. Les ballons peuvent être attachés ensemble pour coopérer de différentes man res dans différents agrégats quand nous avons besoin d'eux pour résoudre des problèmes différents. Leurs frontières sont flexibles; elles peuvent être expansées ou contractées; elles peuvent même en arriver à couvrir une partie du même territoire. Mais il y a indubitablement des frontières. Il n'y a pas de couverture universelle des lois » (ibid., p. 6).

On voit donc se dessiner, en lieu et place d'un monde de lois universelles architecturant un ensemble de sciences hiérarchiquement emboîtées les unes dans les autres, rendues parfaitement commensurables par la réduction physicaliste, un

« monde pommelé<sup>5</sup> », fait de domaines scientifiques en partie incommensurables les uns aux autres, et dans lequel ont disparu les relations de hiérarchie conceptuelle.

Non seulement l'idée qu'il existe des concepts fondamentaux de la physique auxquels peuvent se réduire les concepts des autres sciences est battue en brèche, mais encore il découle de cette vision des choses qu'aucune hiérarchie entre sciences de la nature et sciences de l'homme et de la société n'est posée *a priori*.

• **De l'abstrait au concret : l'analogie fable/modèle**

Une telle conception n'est pas sans effet sur la manière dont on peut concevoir la réalité d'un modèle scientifique. De fait, dans la description pommelée de l'épistémologie empirique, un enjeu essentiel réside dans la compréhension du passage du concept abstrait (par exemple celui de force, en physique), aux concepts plus concrets – les modèles interprétatifs de la réalité, hautement spécialisés. Comprendre la science et ses modélisations, c'est donc comprendre ce passage de l'abstrait au concret : « *ce dont nous avons besoin pour comprendre la manière dont les lois scientifiques s'appliquent au monde (fit the world), c'est la relation entre l'abstrait et le concret; et pour comprendre cela, cela aidera de penser aux fables et à leurs morales. Les fables transforment l'abstrait en concret, en faisant cela, je prétends qu'elles fonctionnent comme des modèles en physique. La thèse que je veux défendre est que la relation entre la morale et la fable est la même que celle existant entre une loi scientifique et un modèle* » (ibid., p. 37).

Considérons la fable suivante, empruntée à un auteur des Lumières allemandes, Lessing (1729-1781) : « *Une martre mange la grouse; un renard étrangle la martre; la dent du loup, le renard* » et sa morale : « *Les plus faibles sont toujours proies des plus forts* ».

Cartwright reprend l'argumentation de Lessing pour caractériser la fable, notamment selon ses fonctions épistémologiques et cognitives. Au plan épistémologique, l'idée fondamentale de Lessing est que « *la connaissance intuitive<sup>6</sup>* » est claire en elle-même, et que la connaissance symbolique « *emprunte sa clarté à [la connaissance] intuitive* » (Lessing, cité par Cartwright, ibid., p. 38). Lessing en arrive ainsi à l'argument suivant : « *pour donner à une conclusion symbolique générale toute la qualité dont elle est capable... nous devons la réduire au particulier afin de la connaître intuitivement* » (ibid.).

Cette réduction au particulier joue un rôle tout à fait essentiel dans le mécanisme à la fois épistémologique et cognitif de la fable, comme le montre cette autre citation de Lessing travaillée par Cartwright : « *le général existe seulement dans le*

---

5 C'est le titre du livre de Cartwright (1999) : *The dappled world. A Study of the Boundaries of Sciences*.

6 Au sens des Lumières allemandes, est intuitive la connaissance qui provient des idées que nous nous faisons des choses, est figurale (ou symbolique) celle qui provient des signes que nous leur avons substitués. Pour une analyse éclairante des relations entre idées et signes, on peut notamment se reporter à Hacking (1975).

*particulier et peut seulement devenir visualisable (anschauend) dans le particulier » (ibid.). Il s'agit bien de comprendre, ici, que la fable ne constitue pas une allégorie : dans la fable étudiée, la martre ne ressemble pas au plus faible, elle est la faible du renard, comme elle est la forte de la grouse.*

Cartwright résume alors comme suit l'apport de Lessing et de sa manière de comprendre les fables :

*« Le compte-rendu (account) de l'abstraction que j'emprunte à Lessing pour décrire comment fonctionnent les théories physiques contemporaines nous procure deux conditions nécessaires. Tout d'abord, un concept qui est abstrait par rapport à un autre ensemble de descriptions plus concrètes ne s'applique jamais sans que l'une des plus concrètes descriptions ne s'applique en même temps. Ce sont ces descriptions qui peuvent être utilisées pour « aménager » (fit out) la description abstraite dans chaque occasion donnée. Deuxièmement, satisfaire la description concrète associée qui s'applique à une occasion particulière correspond à la satisfaction de la description abstraite pour cette occasion » (ibid., p. 39). Il faut comprendre, dans une telle perspective, qu'on a bien affaire à deux niveaux de description, l'un plus abstrait, l'autre plus concret, qui ne sont pas emboîtés l'un dans l'autre comme peuvent l'être le genre et l'espèce. Cartwright illustre ceci par l'exemple suivant : si l'on me demande ce que j'ai fait ce matin, je peux dire « j'ai travaillé » ou bien « j'ai lavé la vaisselle ». Aucun de ces énoncés n'est réductible à l'autre, en particulier parce que chacun est relié à des jeux de langage et à des formes de vie spécifiques (ceux relatifs au mot travail et ceux relatifs à l'expression laver la vaisselle).*

Cette relation abstrait-concret, au cœur de la fable, est donc aussi au cœur des modèles de la physique et Cartwright va au bout de l'analogie : *« Considérons  $F = ma$ . Je prétends qu'il s'agit d'une vérité abstraite relative à des assertions à propos des positions, des mouvements, des masses, et des étendues, de la même façon que la morale de Lessing « Les plus faibles sont toujours proies des plus forts » est abstraite relativement aux plus concrètes descriptions qui l'aménagent (fit out). Être soumis à une force d'une certaine intensité, disons  $F$ , est une propriété abstraite, comme être plus faible que. La loi de Newton dit que si quelque chose a cette propriété, il en a d'autres, en particulier une masse et une accélération qui, multipliées l'une par l'autre, donnent la valeur numérique déjà mentionnée,  $F$ . C'est comme dire que quelqu'un de plus faible sera aussi une proie pour le plus fort » (ibid., p. 43).*

Cartwright en vient ainsi à l'une de ses thèses principales :

*« Force – de même que les divers autres termes de la physique – n'est pas un terme concret dans le sens où l'est un prédicat de couleur. Il est plutôt abstrait, sur le modèle de travail, ou être plus faible que ; et dire qu'il est abstrait signifie pointer qu'il est toujours adossé (piggyback) à des descriptions plus concrètes. Dans le cas de la force, les descriptions plus concrètes sont celles qui utilisent les concepts traditionnels de la mécanique, comme position, étendue, mouvement et masse. La force est alors,*



selon mon compte-rendu, abstraite relativement à ces concepts de la mécanique ; et étant abstraite, elle peut seulement exister dans des modèles mécaniques particuliers » (*ibid.*, p. 45).

### • Contexte et machine nomologique<sup>7</sup>

Est-ce à dire qu'un modèle scientifique est en tout point assimilable à une fable ? Certes non. La fable permet de comprendre la structure logique du modèle qui sous-tend la narration, mais certainement pas d'en saisir la spécificité. Après avoir montré tout le profit, notamment dans la compréhension fine de la relation abstrait/concret, qu'on peut tirer de l'analogie fable = modèle, Cartwright s'emploie à déterminer en quoi un modèle scientifique peut se spécifier. Pour cela, elle forge la notion de « *machine nomologique* », qu'elle définit comme : « *un arrangement (suffisamment) fixe de composants, ou facteurs, avec des capacités (suffisamment) stables, qui, dans une sorte d'environnement adéquat (suffisamment) stable, donnera lieu, au moyen d'opérations répétées, au type de comportements réguliers que nous figurons dans nos lois scientifiques* » (*ibid.*, p. 150).

La centration sur la notion de *machine nomologique* permet de préciser un aspect fondamental de la relation entre lois, modèles et contextes : il s'agit d'une relation de dépendance mutuelle qui, d'une certaine manière, interdit de penser une loi donnée sans le contexte au sein de laquelle elle est vraie. Décrire une machine nomologique, c'est précisément décrire ce type de relations entre modèle et contexte. Un aspect essentiel de ces relations réside dans les conditions de clôture<sup>8</sup> (*shielding conditions*). Par exemple, lorsque Newton établit l'intensité de la force requise pour garder une planète dans une orbite elliptique ( $F = -GmM/r^2$ ), une condition de clôture/protection est cruciale : une orbite elliptique n'est observée que si 2 corps interagissent en l'absence de tout autre corps massif, et de tout autre facteur qui puisse modifier le mouvement.

Nous pouvons d'ores et déjà porter attention au vocabulaire utilisé : celui de « *capacités* » et de « *comportements* ». C'est en grande partie dans le langage utilisé que Cartwright construit une épistémologie qui lui permet de se dégager du physicalisme, et de relier l'épistémologie de la science à celle de la vie quotidienne. Cartwright montre en effet qu'il existe une parenté étroite entre la notion de capacité qu'on peut attribuer, dans la vie quotidienne, à tel ou tel objet ou telle ou telle personne, et la notion de capacité scientifique qu'elle utilise pour donner corps à la notion de machine nomologique. Penser en terme de capacité, c'est en effet se rendre sensible au fait que tel objet (au sens large) possède un pouvoir, une potentialité<sup>9</sup>, et que la description du comportement de cet objet peut gagner

---

7 L'adjectif nomologique réfère au grec *nomos*, qui signifie loi. Une machine nomologique, c'est donc une machine à produire des lois, ou à illustrer des lois.

8 On pourrait également traduire *shielding condition* par « condition d'enceinte ».

9 La conception de l'action humaine en terme de capacité prend sa source dans Aristote et dans sa notion de *dynamis* (la *potentia* latine) qu'on a traduit par puissance, potentialité, tendance, ou *capacité*.

à lui attribuer les potentialités qui sont les siennes. Par exemple, si l'on a affaire à quelqu'un d'irritable, pour reprendre l'exemple utilisé par Cartwright, lui attribuer cette capacité d'irritabilité nous permettra de comprendre – voire de prédire – certains aspects de son comportement qui nous resteront opaques si nous ne le faisons pas.

Cependant, élaborer une telle parenté entre les capacités quotidiennes et les capacités scientifiques ne signifie nullement les assimiler.

En effet, « les modèles nous fournissent un ensemble de composants et leur arrangement », et le rôle de la théorie consiste à nous dire « comment les capacités sont exercées ensemble ». Mais pour cela, il faut saisir que « les capacités déployées dans les modèles que nous construisons dans les sciences exactes différeront des capacités auxquelles nous référons dans la vie de tous les jours » (*ibid.*, p. 53). Pour mettre cela en évidence, Cartwright compare deux types de capacités, celles qu'on obtient en disant de quelqu'un qu'il est irritable, d'une part, et celles, d'autre part, qu'on peut voir à l'œuvre dans une machine nomologique (l'exemple choisi étant la loi de Coulomb).

Elle distingue trois différences marquantes. La première est la suivante : au-delà du fait que ces deux types de capacités sont « hautement génériques » et « donnent naissance à une grande variété de comportements », c'est la relation entre la capacité et ses manifestations qui constitue un enjeu important de l'activité scientifique : « une part du travail (job) de la science consiste à trouver les connexions systématiques qui existent et à construire une méthode enseignable<sup>10</sup> pour les représenter » (*ibid.*, p. 54). La seconde différence entre une capacité de la vie quotidienne et une capacité scientifique comme la loi de Coulomb réside dans le fait que cette dernière possède une « forme fonctionnelle exacte et une force précise, qui sont contenues dans sa loi particulière elle-même » (*ibid.*). La troisième différence tient au fait que « nous connaissons certaines lois explicites relatives à la manière dont la capacité de Coulomb se combinera avec d'autres, décrites par différentes lois de force, pour affecter les mouvements des particules chargées » (*ibid.*).

On le voit, considérer les modèles scientifiques sous la description des capacités ne consiste pas à les banaliser dans un relativisme oublieux de leur spécificité et de leur puissance. Il s'agit bien plutôt d'utiliser certaines notions du quotidien (comme celle, précisément, de capacité) et les conceptualisations qu'elles permettent afin de se rendre mieux capable, précisément, d'identifier ce qui fait cette spécificité et cette puissance.

---

<sup>10</sup> Où l'on perçoit comment l'activité scientifique comporte une dimension didactique organique dès ses premiers moments.

### • Machines nomologiques, capacités, langage

Les machines nomologiques qui sont ainsi décrites nous font donc comprendre comment l'activité scientifique permet d'obtenir une vérité contextuelle. Dans la même perspective, le fait de penser les modèles et les lois en termes de capacités et de comportements fournit les moyens d'établir un certain type de continuité entre l'épistémologie du quotidien et l'épistémologie scientifique, tout en identifiant avec précision certains éléments de rupture entre les deux types d'épistémologie<sup>11</sup>.

Il s'agit donc, nous dit Cartwright, de voir la science comme connaissance de capacités, et non comme connaissance de lois. Et, ajoute-t-elle, « *quand nous refusons de reconstruire notre connaissance comme connaissance de capacités, nous dénions beaucoup de ce que nous savons et nous transformons la plupart de nos meilleures inventions en pures devinettes. Ce qui est important à propos des capacités est leur ouverture (open-endedness) : ce que nous savons à leur propos suggère des stratégies plutôt que des conclusions déjà écrites* » (*ibid.*, p. 59). Cartwright montre en particulier qu'une capacité ne saurait être assimilée à une disposition, en ceci que les termes des dispositions, usuellement, sont liés un par un à des régularités type-loi (*law-like regularities*). Une manière de s'en persuader peut être de considérer (de nouveau) la loi de Coulomb ( $F = -q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0 r^2$ , pour 2 particules de charge  $q_1$  et  $q_2$ , séparées par une distance  $r$ ). Que nous dit « la loi de Coulomb à propos des mouvements de la paire de particules. Elle ne nous dit absolument rien. Avant qu'un mouvement quelconque ait pu être fixé, les particules doivent être placées dans un environnement adapté ; précisément le type d'environnement que j'ai décrit comme une machine nomologique. Sans cet environnement spécifique, aucun mouvement n'est déterminé » (*ibid.*, p. 59). Ainsi, poursuit Cartwright, ce que nous pourrions appeler le « *comportement naturel* » pour des charges opposées est de se déplacer l'une vers l'autre, et pour des charges similaires, de se repousser. Mais ceci ne constitue nullement un effet *in abstracto*. On peut même imaginer, nous montre l'auteur, des environnements au sein desquels « *la répulsion entre 2 particules négativement chargées les amène à se rapprocher* » (*ibid.*). Ce qui différencie une capacité, dans son ouverture, d'une disposition, c'est bien le fait « *qu'elle donne naissance à des comportements hautement variés* », alors que les dispositions sont « *usuellement liées à des manifestations uniques* » (*ibid.*, p. 64). Corrélativement, le langage pour nommer les capacités reflète cette ouverture, avec un degré de spécificité de plus en plus grand lorsqu'on va de la capacité générale à la manifestation spécifique<sup>12</sup>.

11 La question centrale du rapport épistémologique entre « *le sens commun* » et la « *pensée scientifique* » peut être alors repensée dans une dialectique entre rupture et continuité qui permet de réunir les apports de Bachelard et de Dewey - sur ce dernier point, cf. Fabre (2005).

12 Cartwright reprend ici la distinction produite par le philosophe anglais G. Ryle (1949) entre les verbes référant à des « *dispositions hautement génériques* » (les capacités selon Cartwright), et les verbes référant à des « *dispositions hautement spécifiques* » (les dispositions selon Cartwright). On peut décrire le travail d'un pêcheur en disant qu'il pêche (disposition spécifique), mais pas le travail d'un épicier en disant qu'il fait de l'épicerie (on dira plutôt qu'il coupe du jambon, ou qu'il emballe telle nourriture, etc.), précisément parce que le travail d'épicerie renvoie à une disposition « *hautement générique* », c'est-à-dire une capacité selon Cartwright. Notons que cette distinction n'est nullement absolue, mais relative, ce qui nous semble le propre de la distinction générale/spécifique.

## 1.2. Modèle et style de pensée

Les considérations qui précèdent veulent contribuer à la caractérisation des modèles et du processus de modélisation en ce qu'ils sont spécifiques aux sciences. Il nous paraît important de dégager également des dimensions génériques au processus de catégorisation lui-même. Pour faire cela, nous allons tout d'abord mettre l'accent sur des éléments toujours spécifiques à la modélisation scientifique, mais dont les conséquences nous paraissent importantes dans la perspective d'une compréhension plus large du processus de modélisation. Nous aborderons ensuite la question du style de pensée.

### • Modèle et référence : le holisme du modèle

Un modèle scientifique, si on le considère comme l'épure d'une machine nomologique, ne peut se comprendre indépendamment d'un arrière-fond nécessaire à son appréhension. Cet arrière-fond peut se décrire à différents niveaux de spécificité : pour comprendre la loi de Newton, par exemple, il est nécessaire et, on l'a vu, non suffisant de partager un certain nombre de connaissances conceptuelles (par exemple la notion de force, de masse, d'accélération). Mais il faut également disposer de notions beaucoup plus communes, comme celle d'égalité, et celles de multiplication<sup>13</sup>. Au-delà, ce sont les notions d'action, de réaction et d'objet qui doivent être appropriés, d'une manière à la fois voisine du sens commun, mais aussi différente, le sens commun fournissant une sorte de base première redéfinie dans l'usage de la loi<sup>14</sup>. Si l'on considère les choses encore plus génériquement, on se persuadera qu'un nombre quasi-infini de connaissances, aucunement spécifiques du modèle, sont tout de même nécessaires aux opérations de catégorisation sur lesquelles le modèle repose. Nous désignons par holisme du modèle cette dépendance du spécifique du modèle au générique d'objets et d'opérations de pensée cristallisées dans le langage. Dès que l'on considère un modèle dans son usage effectif, on prend conscience d'un très grand nombre de nécessités dont beaucoup, même triviales, conditionnent son application.

### • Style de pensée

L'usage d'un modèle doit donc se penser d'une manière holistique, en appui sur des catégories générales qui tiennent au sens commun tel qu'il est déposé dans le langage. Mais cette dépendance doit être précisée. Pour cela, il nous semble décisif de prendre conscience que ce sens commun est, pour une grande part, lui-même spécifique au domaine de pensée dans lequel le modèle est en usage.

---

13 Notions certes plus communes mais qui doivent être, d'une certaine manière, revisitées dans leur emploi au sein de la loi de Newton.

14 Tiberghien *et al.* (2005) montrent ainsi comment les termes d'action ou d'objet, en mécanique, sont à la fois en lien étroit avec le sens commun (si l'on ne connaît pas le sens commun du mot « action » ou du mot « objet », on n'a aucune chance de pouvoir décrire correctement un système mécanique) et en rupture avec le sens commun (puisqu'on va pouvoir parler de l'objet « terre », ou de « l'action du stylo sur la table »), dans un jeu de langage spécifique dont l'appréhension va éventuellement constituer un obstacle pour les élèves.

Pour expliciter cela, Fleck (1934/2005) a créé le concept de *style de pensée*. Dans *Genèse et développement d'un fait scientifique*, sur l'exemple de l'emploi de la réaction de Wassermann<sup>15</sup> dans l'étude de l'histoire de la syphilis, Fleck montre qu'on ne saurait appréhender le concept moderne de syphilis sans comprendre sa genèse et ce qu'elle doit aux conceptions anciennes et mythiques, de la maladie – par exemple le fait qu'être malade de la syphilis suppose un « *sang gâté* ». La dépendance du modèle scientifique aux conceptions plus larges et plus populaires est ainsi patente. Fleck montre également, avec des accents annonciateurs du paradigme khunien<sup>16</sup>, comment le style de pensée s'arc-boute nécessairement à un collectif de pensée : à partir des découvertes scientifiques, « *se constitue un système de faits universellement interconnectés, maintenant son équilibre grâce à des interactions continuelles. Cet entrelacs serré confère au « monde des faits » une constance massive et éveille le sentiment d'une réalité fixe, de l'existence indépendante d'un monde... Nous appelons le « porteur » communautaire du style de pensée : le collectif de pensée. Le concept de collectif de pensée, suivant l'usage que nous en avons fait pour analyser le conditionnement social de la pensée, n'équivaut pas à un groupe fixe ou à une classe sociale. C'est pour ainsi dire un concept plus fonctionnel que substantiel, comparable par exemple au concept de champ de force en physique<sup>17</sup>... » (Fleck, 1934/2005, p. 179). Ces collectifs de pensée et styles de pensée peuvent concerner des collectifs très restreints (jusqu'à deux individus seulement), « *entre lesquels il se crée un état d'esprit particulier qui, sinon, n'affecterait aucun des participants et qui très souvent revient à chaque fois que les personnes concernées se rencontrent* » (*ibid.*, p. 180). Mais leur force tient à ce qu'ils caractérisent avant tout les institutions<sup>18</sup> : « *outre ces collectifs de pensée momentanés, produits par hasard, il existe des collectifs de pensée stables ou comparativement stables : ces derniers se constituent en particulier autour de groupes**

15 La réaction de Wassermann est un test, pratiqué depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle, pour diagnostiquer la syphilis. Elle utilise l'identification de l'antigène d'un microbe dans le sérum d'un malade.

16 Il est intéressant de constater que Kuhn a rédigé la préface de l'édition anglaise du livre de Fleck. Latour, quant à lui, dans la postface à l'édition française, conteste ce type de filiation en affirmant que « *rien dans la succession des paradigmes, des anomalies, puis des révolutions, ne correspond à la complexité du scénario imaginé par Fleck pour rendre compte de l'innovation en science... Kuhn a, si l'on peut dire, rationalisé et profondément désocialisé ce que Fleck avait inventé. Passer du style collectif au paradigme, c'est vider l'événement de pensée de toutes ces interactions, en faire une banale épistémé à la manière de Foucault* » (Latour, in Fleck, 1934/2005, p. 260). Il est édifiant de lire dans la préface de Kuhn que celui-ci reproche précisément à Fleck d'osciller entre une vue psychologisante du collectif de pensée et une vue sociologique qui rende effectivement compte de la contrainte logique qu'exerce le collectif : « *ce que le collectif de pensée fournit à ses membres est donc quelque chose de proche des catégories kantienues, prérequis à toute pensée. L'autorité d'un collectif de pensée est donc plus logique que sociale, même s'il elle n'existe pour l'individu que par la vertu de son introduction dans un groupe* » (Kuhn, in Fleck, 1934/1979). La pensée de Kuhn n'est donc pas « *désocialisante* », comme le pense Latour, mais elle essaie au contraire de mettre au jour en quoi le social produit des contraintes logiques, dans une acception de ce dernier terme qui n'est pas celui de la logique mathématique, mais celui de la grammaire des pensées et des actions au sens de Wittgenstein (1953/2004). Il nous semble, pour notre part, que c'est exactement le projet de Fleck que de montrer en quoi le style de pensée, socialement produit, fonctionne comme une sorte d'*a priori* kantien. Cf. *infra*.

17 On perçoit ici ce que Fleck semble devoir aux conceptions relationnelles de l'activité scientifique telle qu'elles ont été dégagées par Cassirer (1914/1977).

18 En donnant à ce dernier terme le sens de « *groupe social légitimé* », à la manière de l'anthropologue britannique Mary Douglas (1987/1999, 1996), pour laquelle le livre de Fleck a constitué une référence constante (son livre de 1996 étant expressément intitulé *Thought Styles*).

sociaux organisés. Si un groupe social important existe depuis suffisamment longtemps, alors un style de pensée se fixe et devient une structure formelle. L'exécution pratique prend alors le pas sur l'état d'esprit créatif qui s'abaisse à un niveau fixe, discipliné, uniforme et discret. La science actuelle, en tant que structure spécifique de collectifs de pensée se trouve dans cette situation » (*ibid.*).

On le voit, un style de pensée constitue donc une structure formelle fonctionnelle qui, selon Fleck, affecte quasi-inexorablement tout collectif suffisamment stable. Cette structure est formelle en tant qu'elle constitue une théorie du monde; elle est fonctionnelle en tant qu'elle est, à la fois, condition et résultat de l'activité collective. Une telle conception du style de pensée pourrait toutefois donner lieu à un intellectualisme très éloigné des préoccupations de Fleck.

#### • Style de pensée et perception

Pour s'éloigner de cet intellectualisme, dans lequel le style de pensée apparaîtrait comme un système de conceptions en partie détaché du réel, nous pouvons en venir à la définition que donne Fleck : un style de pensée est caractérisé par « la disposition pour une perception dirigée et pour une assimilation conforme de ce qui a été perçu » (*ibid.*, p. 247). C'est dire que parler de style de pensée, c'est d'abord envisager en quoi c'est la perception même, au sens premier du terme, qui est affectée par la cognition et l'affecte en retour<sup>19</sup>. Fleck peut ainsi déclarer : « La perception visuelle directe d'une forme (gestalt) demande d'être expérimentée dans un domaine de pensée particulier : ce n'est qu'après de nombreuses expériences<sup>20</sup>, éventuellement après avoir reçu une formation, que l'on acquiert la capacité de remarquer directement des sens, des formes, et des unités fermées sur elles-mêmes. Il est vrai que dans le même temps on perd la capacité de voir ce qui est en contradiction avec ces formes. Une telle disposition pour une perception dirigée constitue cependant l'élément principal du style de pensée » (*ibid.*, p. 161). Le livre de Fleck est ainsi plein d'exemples saisissants dans lesquels il est patent que les systèmes sémiotiques de représentation (anatomiques, par exemple) ne peuvent être fidèles à la nature : même les bonnes images « sont travaillées de façon à être explicites, toutes sont schématiques, symboliques presque, toutes sont fidèles non pas à la nature mais à la théorie... Dans la science, tout comme dans l'art ou dans la vie, il n'y a pas d'autre fidélité à la nature que la fidélité à la culture » (*ibid.*, p. 66). On perçoit donc que tout modèle, dès l'instant où il s'exprime sur l'arrière-fond d'un style de pensée, suppose ce que Fleck appelle une « harmonie des illusions » ou une « harmonie intrinsèque du style de pensée... laquelle

---

19 Ici, on voit comment, Fleck rompt avec ce que le logicien et philosophe américain Hilary Putnam décrit comme « une idée désastreuse qui hante la philosophie occidentale depuis le XVII<sup>e</sup> siècle, l'idée que la perception implique une interface entre l'esprit et les objets "extérieurs" que nous percevons » (Putnam, 1999, p. 43). Cette rupture avec la perception comme (simple) interface est sans doute proche de la notion moderne d'affordance (Gibson, 1986; Norman, 1988; Beauvois & Dubois, 2000) à condition de dégager cette dernière de la connotation biologiste qui lui est souvent attachée, pour reconnaître ce que les affordances doivent aux catégories socialement constituées.

20 Nathalie Jas, la traductrice du livre de Fleck, précise que le mot expérience doit s'entendre ici au sens « d'événement vécu susceptible d'apporter un enseignement ». Cette notion particulière d'expérience est probablement décisive dans le système conceptuel de Ludwick Fleck.

engendre une applicabilité des résultats scientifiques et la croyance ferme en une vérité qui existerait indépendamment de nous mêmes » (*ibid.*, p. 153).

Penser le modèle sur l'arrière-fond d'un style de pensée, c'est donc à la fois le considérer dans sa vertu productive de faits et de relations en tant qu'épure d'une machine nomologique reconnue dans un collectif de pensée, dans sa vertu productive d'une perception dirigée à travers cette machine nomologique par ce collectif de pensée, et dans sa vertu inhibitrice d'autres faits et d'autres relations au sein de l'harmonie intrinsèque à un style de pensée.

### 1.3. Modèle et expérimentation

Penser le modèle dans un style de pensée nous amène donc à concevoir la perception, et donc l'observation, en lien avec un collectif de pensée. C'est dans la perception même, pour réunir Cartwright et Fleck, que nous effectuons ce passage de l'abstrait au concret que Cartwright désigne comme le propre de la fable ou du modèle. Une lecture (trop) rapide de Fleck pourrait laisser penser, dans une sorte de kantisme primaire, que nous ne pouvons observer que ce que nous avons dans la tête. Mais il semble que l'étude effective de la science en train de se faire montre une relation matériellement beaucoup plus complexe, dans laquelle à la fois, d'une part, la théorie contraint la nature même des observables et des systèmes sémiotiques qui en réalisent l'inscription (force de l'abstrait) et, d'autre part, les phénomènes produits par les instruments atteignent à une certaine autonomie qui agit en retour sur la théorie (force du concret). Nous allons développer rapidement ce point en utilisant une étude de Hacking (1983/1989).

#### • Expérimentation, théories et instruments

Hacking commence la seconde partie de son livre *Concevoir et expérimenter* par une réévaluation de l'importance de l'expérimentation dans la science. Il y pose ainsi la question : « Une expérience n'a-t-elle de sens que dans la mesure où elle contribue à vérifier une hypothèse ? » (Hacking, 1989, p. 253). La réponse de Hacking est complexe, reposant sur la description d'un grand nombre d'exemples et sa discussion nous amènerait hors du cadre de cet article, mais on peut la résumer par les lignes suivantes : « Certains travaux expérimentaux de grande portée proviennent intégralement de la théorie. Certaines théories fondamentales doivent tout aux expériences qui les précèdent. Certaines théories stagnent par manque de prise sur le réel, alors que certains phénomènes expérimentaux restent sans emploi par manque de théorie. On rencontre aussi des "familles heureuses" où théories et expériences de divers horizons s'harmonisent<sup>21</sup> » (*ibid.*, p. 260). Cette réponse

---

21 Hacking donne alors en exemple la découverte expérimentale, en 1965, des radioastronomes Penzias et Wilson, qui mirent en évidence un « phénomène absurde » et pourtant « bien réel » : « une petite quantité d'énergie, présente partout, uniformément répartie dans tout l'espace ». Alors que « l'idée d'une radiation de fond complètement homogène leur semblait absurde... un groupe de théoriciens de Princeton fit circuler un texte suggérant, chiffres à l'appui que si l'univers est issu du Big Bang, alors il doit y avoir une température uniforme partout présente dans l'espace, la température résiduelle de la première explosion » (*ibid.*, p. 261). Exemple typique de « famille heureuse » où expérimentation et théorisation, produites indépendamment l'une de l'autre, s'épaulent mutuellement.

profondément nominaliste, où abonde l'adjectif « *certain (some)* », aboutit à l'assertion suivante : «... je ne prétends pas que le travail expérimental pourrait exister sans la théorie. Cela reviendrait à travailler à l'aveuglette comme les "purs empiristes" dont se moquait Bacon. Reste ce fait que, généralement, la plupart des recherches vraiment fondamentales précèdent toute théorie pertinente<sup>22</sup> » (*ibid.*, p.260). Il s'agit donc, en fait, non de contester l'importance de la théorie dans la science, mais de rétablir l'équilibre en faveur de l'expérience, en contestant une philosophie des sciences « *dominée par la théorie* », et en admettant que « *l'expérimentation mène parfois sa vie propre* » (*ibid.*, p. 347).

Une manière radicale de limiter cette domination consiste à réévaluer l'importance des instruments dans les sciences<sup>23</sup>. L'exemple du microscope apparaît tout à fait édifiant, pour lutter contre la conception idéaliste selon laquelle on n'observe que ce que la théorie permet de voir<sup>24</sup>. Hacking montre ainsi que des microscopes reposant sur des théories et donc des phénoménotechniques différentes (par exemple la micrographie fluorescente et la micrographie électronique) peuvent être utilisés pour détecter des corps et prouver ainsi que les configurations visuelles identifiées ne constituent pas des artefacts. Cela ne constitue pas seulement un plaidoyer pour une forme mesurée de réalisme épistémologique (les phénomènes que nous observons ont une existence en soi). Il s'agit surtout de comprendre que les instruments produisent des mondes spécifiques sans la fréquentation desquels (fréquentation répétée et insistante) aucune théorie ne saurait durablement se dégager. On peut alors arguer avec Hacking, en prenant l'exemple de l'étude de la cellule : « *En ce qui concerne la cellule, notre conviction ne provient pas d'une théorie à haute puissance déductive, une telle théorie n'existe pas, mais d'un grand nombre de généralisations solidaires et de faible portée nous permettant de contrôler et de créer des phénomènes avec le microscope. En bref, nous apprenons à nous déplacer dans le monde microscopique* » (*ibid.*, p. 338). Les instruments, par le fait qu'ils créent un « *monde de phénomènes* » dans lequel nous pouvons agir, produisent ainsi un milieu, partiellement indépendant des théorisations, et causalement contraignant.

#### • La fourmi, l'araignée et l'abeille

Pour penser les relations entre expérience et théorie, Hacking entreprend une réévaluation de Bacon, en commentant la métaphore fameuse de ce dernier : « *L'expérimentateur est comparable à une fourmi, il se contente de ramasser et d'utiliser; le raisonneur ressemble à l'araignée qui tisse sa toile à partir de sa propre substance. Mais l'abeille choisit une voie médiane : elle rassemble le matériau provenant des fleurs sauvages et cultivées, mais c'est pour le digérer et le transformer par un pouvoir qui lui*

---

22 Traduction française un peu modifiée par nous-mêmes. Hacking écrit : « *It remains the case, however, that much truly fundamental research precedes any relevant theory whatsoever* » (Hacking, 1983, p. 158).

23 On est alors dans la perspective bachelardienne de phénoménotechnique (cf. *infra*, paragraphe 1.4).

24 Ce qui est fort différent de l'idée de Fleck selon laquelle il n'est pas de systèmes sémiotiques indépendants d'une théorie.



est propre. Assez comparable à cela est le vrai travail de la philosophie, car elle ne dépend pas uniquement ou principalement des pouvoirs de l'esprit, pas plus qu'elle ne prend le matériau provenant de l'histoire naturelle et des expériences de mécanique pour le déposer tel quel dans la mémoire, mais plutôt elle le dépose dans la compréhension, digéré et transformé ».

« Par conséquent », continue Bacon, « des liens plus intimes et plus purs entre ces deux facultés, l'expérimentale et la rationnelle, on peut attendre beaucoup (et à un point qui n'a jamais été atteint) » (Bacon, cité par Hacking, *ibid.*, p. 397).

L'idée centrale, pour Bacon et pour Hacking, c'est que « réduite à elle-même », chaque catégorie (« l'expérimentale » et la « rationnelle ») produit peu de connaissance. Hacking poursuit : « Qu'est-ce qui caractérise la méthode scientifique ? C'est sans doute qu'elle met ces deux aptitudes en contact au moyen d'une troisième, que j'ai appelé « articulation » et « calcul »<sup>25</sup> [...] Le fait remarquable à propos de la physique nouvelle est qu'elle crée une nouvelle entité humaine collective en donnant libre cours à trois intérêts humains fondamentaux, la spéculation, le calcul, et l'expérience. En engageant ces trois intérêts à collaborer, elle leur apporte une richesse dont ils auraient été autrement privés » (*ibid.*, p. 398-399).

On arrive ainsi, par un autre chemin, à un carrefour atteint par Cartwright : une machine nomologique est précisément le lieu de convergence réel de ces trois aptitudes, puisqu'elle permet, dans la clôture/protection de l'enceinte expérimentale, de convertir la forme abstraite de la loi en capacités et comportements qui actualisent ce que Hacking nomme « articulation ».

#### • Qu'est-ce qu'une représentation ?

Avant d'en venir à tenter un positionnement épistémologique et didactique de l'ensemble de ce qui précède, nous voudrions terminer par quelques considérations relatives à la notion de représentation. L'ensemble des lignes qui précèdent, on l'aura compris, tente de faire admettre une vision de la science plus proche à la fois de l'expérimentation et de l'expérience effective, et une conception des modèles et de l'activité de modélisation plus dépendante de la matérialité réelle de l'activité scientifique. Dans une telle perspective, les systèmes sémiotiques par lesquels cette activité se déploie jouent un rôle fondamental et la notion de représentation elle-même se dégage du mentalisme qui lui est souvent inhérent<sup>26</sup> pour gagner un sens matériel et public. Nous suivrons là encore Hacking : « Les êtres humains sont des représentants. Non pas homo faber, dis-je, mais homo depictor. Les humains produisent des représentations... Les humains créent des simulacres (likenesses). Ils peignent des tableaux, imitent le caquetage de la poule, modèlent l'argile,

---

25 Hacking produit, pour la notion d'articulation et de calcul, la définition suivante : « par « calcul », je n'entends pas un simple alignement de chiffres, mais l'altération mathématique d'une hypothèse donnée qui se trouve ainsi en résonance plus intime avec le monde » (*ibid.*, p. 345).

26 Sur cette question, cf. notamment Sensevy (2002).

façonnent le cuivre. Telles sont quelques-unes des représentations qui, dès l'origine, caractérisent les êtres humains. Le mot "représentation" a un lourd passé philosophique. On s'en est servi pour traduire le *Vorstellung* kantien, une chose que l'on place devant l'esprit, un mot, qui désigne à la fois des images et des pensées abstraites. Kant avait besoin d'un terme pour remplacer la notion d'"idée" des empiristes anglais et français. Ce que j'entends par «représentation» est exactement l'inverse de l'acception kantienne. On ne peut pas toucher une idée lockienne, mais seul un gardien de musée peut nous empêcher de toucher quelques-unes des premières représentations produites par nos ancêtres. Selon Kant, un jugement est la représentation d'une représentation, la mise devant l'esprit d'une mise devant l'esprit, doublement privée. C'est donc doublement ce que je n'appelle pas une représentation. Mais pour moi sont aussi des représentations certains événements qui n'impliquent pourtant que le verbe<sup>27</sup>. Je ne fais pas allusion aux simples phrases déclaratives, qui ne sont sûrement pas des représentations, mais plutôt aux spéculations compliquées qui tentent de fournir une représentation de notre monde » (*ibid.*, p. 221).

Gagner, comme le fait Hacking, un sens matériel et public aux représentations entre en consonance avec une conception de la science dans laquelle l'activité scientifique se déploie au sein de collectifs de pensée structurant (et structurés par) des styles de pensée. En effet, si la caractéristique première d'un style de pensée, c'est d'organiser la perception, alors la perception la plus décisive qui soit est la perception adéquate de systèmes sémiotiques spécifiques, de ces représentations au sens de Hacking, au moyen desquelles les modèles peuvent à la fois être exprimés, dans les descriptions concrètes qui les spécifient à des situations particulières, et articulés, dans les systèmes formels qui les caractérisent.

#### **1.4. Modèles, styles de pensée, expérimentation : positionnement épistémologique, positionnement didactique**

##### **• Un nouvel empirisme**

Il nous semble pouvoir trouver dans les lignes qui précèdent une conception épistémologique cohérente, à laquelle on pourrait associer des épistémologues comme Cartwright, Fleck ou Hacking, mais aussi un historien d'art comme Baxandall (1991), dans la lignée de la philosophie anglaise ou du pragmatisme américain. Les liens que l'on peut établir entre ces auteurs ne sont d'ailleurs pas le fruit de cette seule étude, et de loin. En effet, Cartwright et Hacking, tous deux un temps enseignants à Stanford, reconnaissent une mutuelle filiation à l'école de Stanford, dans laquelle on peut notamment ranger le philosophe de la biologie John

---

27 Hacking écrit ici « *some public verbal events can be representations* » (Hacking, 1983, p. 133).

Dupré<sup>28</sup>. Une telle tradition épistémologique trouve dans Ludwick Fleck un pré-décèsseur décisif : Hacking consacre ainsi une partie importante de son cours au Collège de France 2005-2006 à reprendre et travailler le concept de style de pensée (*Denkstil*) tel que Fleck nous l'a légué.

Cette conception cohérente pourrait, d'une certaine manière, être considérée comme un *nouvel empirisme*. Il s'agit d'un *empirisme*, nous l'avons dit, au double sens où l'accent est mis sur le rapport particulier que la science entretient avec l'expérimentation et sur l'étude effective de la science en action. Un empirisme renouvelé, notamment au plan philosophique, dans le sens où s'il s'agit toujours de *réhabiliter l'expérience*, mais dans un rapport nouveau entre celle-ci et la conceptualisation. La perception n'est plus conçue comme une interface entre le concept et la réalité (dans la conception cartésienne sous-jacente à l'identification des sensations telle qu'elle fut produite par Locke et Hume), mais comme indissolublement liée au concept. Cette conception, présente chez les trois auteurs approchés ici, suppose un lien particulier entre le concret et l'abstrait : l'abstrait (de la catégorie d'observation ou du modèle) permet le concret, mais il ne tire son sens que de son actualisation dans ce concret, d'où l'importance corrélative, pour l'activité scientifique, notamment dans l'instrumentation, de l'activité créative<sup>29</sup> de caractérisation/production des contextes. Cet empirisme renouvelé est donc un *contextualisme*.

#### • Une esquisse de positionnement épistémologique

Cette conception spécifique pourrait être caractérisée en référence à d'autres épistémologues importants, mais ce serait le sujet d'un autre article, et au-delà, d'un ouvrage. Toutefois, pour initier une telle perspective, on pourrait désigner deux types de relations.

Tout d'abord, en référence à Popper (notamment 1934/1973, 1963/1985), on pourrait dire que le nouvel empirisme, auquel nous faisons allusion ici, échappe aux apories de l'induction que Popper a mise en évidence. Contre les empiristes anglais (particulièrement Hume), Popper a montré que la connaissance ne peut être

---

28 Cartwright écrit ainsi dans *The dappled word* : « Ce livre est nettement dans la tradition de l'école de Stanford et est profondément influencé par les philosophes des sciences avec lesquels j'ai travaillé là-bas. Ceci commença avec le pragmatisme de Patrick Suppes et le genre de chose qu'il a articulées dans *Probabilistic Metaphysics*. Puis il y eut Ian Hacking, John Dupré, Peter Galison et, pour une année, Margaret Morrison » (Cartwright, 1999, p. ix). Hacking, quant à lui, souligne dans les remerciements de son ouvrage (*Concevoir et Expérimenter*, *op. cit.*) l'étroite parenté entre ses conceptions et celles de Cartwright : « Le présent ouvrage fut conçu alors que Nancy Cartwright, du département de philosophie de l'Université de Stanford, travaillait sur son propre livre, *How the Laws of Physics Lie*. Nos deux livres ont plus d'un point commun... Nous ne partons pas des mêmes postulats anti-théoriques car elle considère les modèles et les approximations alors que c'est surtout l'expérience qui m'intéresse, mais nos conceptions convergent » (Hacking, 1983/1989, p. 9).

29 Dans son troisième cours (*Méthodes de raisonnement*) au collège de France (2006), Hacking insiste sur cet aspect créatif en revenant sur son livre *Concevoir et expérimenter* : « Les chercheurs, au laboratoire, ne font pas qu'observer le monde : ils changent le monde, ils interviennent dans le cours de la nature... Dans un laboratoire on crée des phénomènes. Des phénomènes qui n'avaient pas d'existence avant leur création par les chercheurs. C'est pourquoi le titre de la deuxième partie de mon livre n'est pas *Expérimenter*, comme dans la traduction française, mais *Intervenir*, qui est plus fort ». On saisit la parenté forte avec la phénoménoteknique bachelardienne (cf *infra*).

directement issue des sens et des seuls énoncés d'observation que les sens permettent de produire. On l'a vu, la conception de la perception et de l'expérience sous-tendue en particulier par les travaux de Fleck dépasse largement cette conception de l'empirisme classique, puisque dans le processus de perception s'enchevêtrent organiquement percepts et concepts. Comme le remarque Armengaud (2003), pour Popper « l'essentiel... n'est certes pas de fonder les sciences... Il faut abandonner la métaphore de "l'édifice" de la connaissance tout comme la quête de la certitude et la recherche du point de départ adéquat. Nous sommes bien plutôt "embarqués", et la métaphore la plus apte à décrire notre situation cognitive serait celle qu'offre O. von Neurath : il faut réparer le bateau en pleine mer et au coup par coup ». On perçoit ici comment peuvent se rejoindre l'épistémologie popperienne et les conceptions explicitées dans cet article, dans une sorte de pragmatisme scientifique, anti-fondationaliste<sup>30</sup> : la métaphore sollicitée par Armengaud commentant Popper (le bateau de Otto von Neurath) est celle-là même qu'utilise Cartwright dans son ouvrage. Cela dit, la convergence que nous soulignons ici ne doit pas occulter de réelles divergences, dont deux qui nous semble importantes.

La première réfère à la centration forte de Popper, en particulier dans ses premiers livres, sur la théorie. Hacking (2006) cite ainsi les phrases suivantes de Popper : « Le théoricien pose certaines questions déterminées à l'expérimentateur et ce dernier essaie, par ses expériences, d'obtenir une réponse décisive à ces questions-là et non à d'autres... [L'expérimentateur] lui-même n'a pas pour tâche principale de faire des observations précises ; son travail à lui aussi est pour une large part d'espèce théorique. La théorie commande le travail expérimental de sa conception aux derniers manèges en laboratoire » (Popper, 1934/1973, p. 107). La conception de Hacking et de Cartwright (ainsi, sans aucun doute, que celle de Fleck) n'est pas opposée en général à de telles assertions (Hacking dit même que « appliqués [aux exemples de la théorie de la relativité et de la théorie quantique], les propos de Popper ne sont pas faux »), mais elle fait de la description popperienne un cas particulier au sein d'un processus beaucoup plus vaste et bigarré, qui rend justice au fait que comme le dit Hacking (1983/1989), « les expériences ont leur vie propre », ou comme le dit Galison (1987/2002), « les instruments scientifiques ont leur vie propre ».

On pourrait relever une seconde différence : l'essentiel des thèses que nous avons analysées dans cet article est descriptif, non de la science telle qu'elle devrait être mais de ce qu'elle est effectivement. Contrairement à cela, la tendance de Popper est très souvent normative : « mon problème est... de défendre ma position selon laquelle la science est la recherche de la vérité par la critique. Ma position est simple : très inventive et critique. Formule ta thèse le plus précisément possible ! C'est une règle normative, non pas une description de l'histoire des sciences, mais un conseil au savant pour améliorer la position de la science ! » (Lorenz & Popper, 1990, p. 71-72).

---

<sup>30</sup> En désignant sous ce terme (« fondationaliste ») une conception de la science où celle-ci permet d'atteindre au fondement même des choses.

Cette centration normative, chez Popper, pour précieuse qu'elle soit, semble être relativement absente des travaux étudiés dans cet article.

Une autre référence pourrait être utile ici pour contribuer à initier certains rapprochements conceptuels. C'est la notion bachelardienne de phénoménoteknikue qu'il semble utile de convoquer pour cela. On sait que cette notion constitue un élément central pour Bachelard (1934/1991, p. 16-17), et qu'il la définit notamment comme suit : « *Entre le phénomène scientifique et le noumène scientifique, il ne s'agit donc plus d'une dialectique lointaine et oisive, mais d'un mouvement alternatif qui, après quelques rectifications des projets, tend toujours à une réalisation effective du noumène. La véritable phénoménoteknikue est donc bien essentiellement une phénoménoteknikue. Elle renforce ce qui transparait derrière ce qui apparait. Elle s'instruit par ce qu'elle construit* ». On perçoit alors le lien étroit qu'on peut établir d'un côté entre la centration sur l'expérimentation et les instruments propre à Hacking ou à Cartwright, ou sur la théorie immanente aux systèmes sémiotiques que Fleck met en évidence, et d'un autre côté la phénoménoteknikue bachelardienne. Voir dans ce processus ce que Bachelard appelle « *la réalisation effective du noumène* » consonne avec ce passage de l'abstrait au concret qui constitue pour Cartwright la raison d'être des modèles, ou avec la notion de « *famille heureuse* » chez Hacking dans laquelle expérimentation, instruments, et théorie marchent de concert. Cette profonde similarité amène à donner un sens fort, dense, à la notion de phénomène et à sa production. Notons toutefois, au chapitre des différences, que là où Bachelard peut voir seulement « *quelques rectifications des projets* », les épistémologues présentés dans cet article identifient une intense activité qui semble constituer pour eux le cœur même de l'activité du savant dans la constitution des machines nomologiques.

• **Une esquisse de positionnement épistémologique en didactique**

Il peut être utile de prolonger la confrontation avec des travaux épistémologiques directement liés aux perspectives didactiques. Nous évoquerons rapidement, pour cela, plusieurs auteurs, Martinand (1998), Orange (2000), et Tiberghien et Vince (2005).

Si l'on considère dans un premier temps la notion de registre (Martinand, 1998), nous serons amenés à distinguer, avec cet auteur, le registre du « *réfèrent empirique, c'est-à-dire celui des objets, des phénomènes, et de leur connaissance phénoménoteknikue...* » et « *le registre des modèles construits sur ces référents* » (Martinand, 1998, p. 6). On obtient donc une caractérisation à deux niveaux, l'activité didactique consistant en particulier dans la détermination de « *tâches ou problèmes* » impliquant « *des processus de modélisation que les élèves peuvent prendre en charge, en tout ou partie* ». Poursuivant la réflexion, Martinand (*ibid.*) montre la nécessité d'un troisième niveau, supposant la recherche d'une « *représentation à un niveau plus*

*caché du réel* ». Il nomme ce troisième niveau « *matrice cognitive*<sup>31</sup> », ce troisième niveau comprenant à la fois « *des paradigmes épistémiques (conceptions de ce que doit être la connaissance, les formes, des “bonnes pratiques” théoriques ou empiriques), et les ressources théoriques (langages, schémas, théories)* » (*ibid.*, p. 10).

Orange (2000), pour sa part, retrouve cette nécessité de trois niveaux de registre en caractérisant ce troisième registre comme « *registre explicatif* », ou « *registre des références explicatives* », « *qui donne sens aux explications en contrôlant les formes jugées acceptables* ». Dans ses études sur la notion de milieu intérieur chez Claude Bernard, Orange montre ainsi qu'alors même que l'espace des contraintes de la problématisation du milieu intérieur chez Claude Bernard évolue considérablement sur les deux premiers registres et sur leurs relations, le troisième niveau (les références explicatives) change relativement peu et pourrait continûment être représenté par les significations de « *vitalisme physique* », et de « *déterminisme* ».

Tiberghien et Vince problématisent la question de la modélisation d'une façon un peu différente, puisqu'ils construisent une double distinction : « *celle entre savoir quotidien et savoir de la physique, et pour chacun de ces savoirs celle entre théorie et description en termes d'objets et d'évènements d'une situation matérielle* » (Tiberghien & Vince, 2005, p. 5). Cette approche de la modélisation permet aux auteurs l'interprétation des difficultés des élèves, qui « *portent majoritairement sur l'établissement des liens entre le monde des objets et évènements et le monde de la théorie et des modèles* ».

Comme on le voit, l'ensemble de ces théorisations s'accorde à distinguer dans le processus de modélisation des domaines de la réalité plus ou moins abstraits, chacun de ces domaines devant être à la fois conceptuellement appréhendé et décrit pour lui-même au moyen de formes symboliques spécifiques, et mis en relation avec les autres domaines. L'intérêt des descriptions épistémologiques produites, en particulier à des fins didactiques comme celles que nous venons d'évoquer, nous semble résider spécifiquement dans le fait suivant : c'est à la fois au sein d'un même domaine (registre) et entre les différents domaines que le processus de modélisation s'établit. Ainsi, nous pouvons trouver une continuité réelle entre les conceptions développées par les épistémologues étudiés dans cet article et celles que les didacticiens des sciences ont élaborées. Si le travail essentiel du scientifique consiste à produire des relations entre formes abstraites (idéelles) relativement qualitatives et modèles à la fois plus concrets et mathématiquement articulés à la réalité expérimentale, alors les conceptualisations des didacticiens permettent de situer, à partir des espaces de contraintes (Orange, 2000) qu'ils peuvent déterminer, les directions de travail dans lesquelles doit nécessairement s'engager une didactique de la modélisation.

---

31 « *Dans une perspective un peu analogue* », nous dit Martinand (*ibid.*), « *à celle des schèmes d'intelligibilité étudiés par J.-M. Berthelot en sociologie (1990)* ».

## 2. Implications didactiques : premières directions

Tout enseignement suppose une épistémologie, une théorie des connaissances qu'il transmet. Ainsi, on peut diffuser une conception dogmatique des sciences en les enseignant, ou une conception positiviste, relativiste ou sensualiste. La vision des sciences « *non-pyramidale* » et « *non-physicaliste* » que nous semblent défendre, chacun à sa manière, Cartwright, Fleck, et Hacking, implique-t-elle en retour une manière particulière de les enseigner ? Nous produirons, pour terminer cet article, certains linéaments de réponse à cette question.

### 2.1. Les relations entre abstrait et concret : instruments et situations

Les conceptions défendues par Cartwright relativement à la relation abstrait/concret (et qu'on pourrait synthétiser sous l'analogie modèle/fable) peuvent amener les recherches en didactique à se rendre davantage sensibles au processus de concrétisation et de contextualisation de l'abstrait que peut représenter l'activité scientifique. Il semble admis que dans l'activité scientifique les élèves doivent abstraire, et qu'ils doivent également « mettre la main à la pâte » dans une espèce particulière de tâtonnement expérimental<sup>32</sup>. Mais peut-être n'a-t-on pas encore pris suffisamment conscience de la nécessité et de la difficulté de cet aménagement de l'abstrait dans un particulier, que Hacking confie à « *l'articulation* » et Cartwright au fonctionnement de la « *machine nomologique* ». Cela suppose certainement un rapport didactique particulier aux formalismes mathématiques, dans lesquels le rapport à la référence puisse constituer un objet d'étude en tant que tel. Au-delà des formalismes mathématiques, les relations entre abstrait et concret, c'est-à-dire entre abstrait et particulier, posent la question des conséquences didactiques de ce « *nominalisme dynamique* » (Hacking, 2005) qui incite à comprendre les catégories dans leur genèse et donc dans la manière dont elles aménagent le monde. C'est l'opération de réduction au particulier qui semble ainsi décisive, et donc la question de sa transposition ou reproblématisation dans la classe.

Si les lois scientifiques sont localement vraies, sans nous permettre directement une explication du comportement des objets du monde, alors l'enseignement des sciences se doit de mettre les élèves en contact avec les modèles interprétatifs et les situations au sein desquelles ces modèles déterminent l'aménagement des lois. Ceci incite à accorder un soin tout particulier à la production des situations didactiques et des dispositifs qui doivent pouvoir produire les rétroactions à partir desquelles les apprentissages des élèves vont se construire. Cette sensibilité très grande des modèles aux situations, aux contextes qui leur donnent sens, et donc

---

32 Il faut comprendre que ce « *tâtonnement expérimental* » présuppose en lui-même un certain style de pensée : « *admettre la modélisation d'un volcan avec de la purée et de la confiture ne peut se faire que si on a déjà une connaissance théorique assez élaborée du fonctionnement de ce volcan. Idem pour le rift [en couches de sable coloré]* » (Orange, 2002, p. 19). En somme, comprendre le fonctionnement d'un modèle de volcan en purée, c'est déjà faire partie d'un certain collectif de pensée scientifique. C'est une perception orientée par ce collectif de pensée qui permet à celui qui en est membre de reconnaître dans de tels modèles les traits pertinents d'un volcan ou d'un rift.

aux conditions de clôture/production qui permettent de délimiter ces contextes, nous semble devoir constituer une dimension fondamentale en didactique des sciences. Une telle assomption incite à prendre toute la mesure de la difficulté à construire avec les élèves (et notamment ceux de l'école primaire) des situations dans lesquelles des connaissances, ou pour parler comme Cartwright, des comportements et des capacités soient réellement cristallisés.

## **2.2. Conceptions versus représentations publiques**

Nous pensons que la focalisation sur les représentations, au sens quasi-kantien du terme, qui paraît contemporaine de la naissance même d'une grande partie de la didactique des sciences pourrait être avantageusement mise au second plan. Ce qui nous semble beaucoup plus déterminant, à la fois pour comprendre les sciences, leur enseignement, et pour aider les professeurs, c'est la centration, comme nous le signifiions au plus haut, sur les instruments et les systèmes sémiotiques au moyen desquels on obtient des *représentations publiques* des phénomènes étudiés. Pour le dire autrement, c'est la relation entre phénoménographie et phénoménotechnique (Martinand, 1998) qui nous semble ici décisive, et c'est donc la question des systèmes sémiotiques par lesquels nous rendons compte des inscriptions produites par les instruments qui devient majeure. Faire des sciences, c'est nécessairement déchiffrer des systèmes de signes en ayant compris la relation instaurée entre les capacités et comportements agissant sur et dans les instruments et ces systèmes de signes. Penser un dispositif didactique, c'est donc nécessairement penser aussi un système de signes (de symbolisation) et le rapport à construire entre ce système de signes et l'instrument dont il rend compte.

## **2.3. Collectifs de pensée et styles de pensée**

Faire des sciences dans la classe suppose assurément de construire un collectif de pensée spécifique sur l'arrière-fond duquel le travail des élèves et du professeur va prendre corps. Ce collectif de pensée, comme le montre Fleck, se caractérise à la fois par ce qu'il permet, en tant que producteur de la grammaire des actions possibles et nécessaires dans la classe, et par ce qu'il inhibe : le style de pensée issu du collectif est ainsi un « *voir comme* » (Wittgenstein, 1953/2004) qui suppose l'ignorance de choses non vues parce qu'elle ne participe pas des événements ou des objets pertinents pour ce style. Si le style de pensée est d'abord une disposition à percevoir d'une manière dirigée, alors une question didactique centrale réside dans les modalités concrètes d'inculcation, sur le long terme, d'une telle disposition, et dans la dialectique entre connaissance et ignorance que cette inculcation fait jouer.

On perçoit une nouvelle fois le rôle fondamental des instruments et inscriptions associées au moyen desquels professeur et élèves parviendront à des manières communes de percevoir.



Dans une telle perspective, l'enjeu d'enseignement pourra se décrire comme suit : élaborer dans la classe, à partir des rétroactions que les dispositifs mis en œuvre ont produites et dont les systèmes sémiotiques fournissent la représentation, un collectif de pensée dans lequel à la fois le professeur, pour ce qui le concerne, et les élèves, à leur place, assument une réelle responsabilité. La notion de collectif de pensée permet, aussi, de penser la participation des élèves à l'institution didactique. ■

## BIBLIOGRAPHIE

- ARMENGAUD J.F. (2003). Popper. *Encyclopaedia Universalis*. Paris : Encyclopaedia Universalis.
- BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.
- BAXANDALL M. (1991). *Les formes de l'intention*. Nîmes : J. Chambon.
- BEAUVOIS J.L. & DUBOIS N. (2000). Affordances in social judgment: experimental proof of why it is a mistake to ignore how others behave towards a target and look solely at how the target behaves. *Swiss Journal of Psychology*, n° 59, p. 16-33.
- BLOOR D. (1982). *Sociologie de la logique ou les limites de l'épistémologie*. Paris : Éd. Pandore.
- CARTWRIGHT N. (1983). *How the laws of physics lie*. Oxford : Oxford University Press.
- CARTWRIGHT N. (1999). *The dappled world: a study of the boundaries of sciences*. Cambridge : Cambridge University Press.
- CASSIRER E. (1914/1977). *Substance et fonction*. Paris : Éd. de Minuit.
- DOUGLAS M. (1987/1999). *Comment pensent les institutions*. Paris : Éd. La Découverte.
- DOUGLAS M. (1996). *Thought styles*. London : Sage Publications.
- FLECK L. (1934). *Genesis and development of a scientific fact*. Chicago : The University of Chicago Press.
- FLECK L. (1934). *Genèse et développement d'un fait scientifique*. Paris : Éd. Les Belles Lettres.
- FABRE M. (2005). Deux sources de l'épistémologie des problèmes : Dewey et Bachelard. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, vol. 38, n° 3, p. 53-67.
- GALISON P. (1987/2002). *Ainsi s'achèvent les expériences : la place des expériences dans la physique du xx<sup>e</sup> siècle*. Paris : Éd. La Découverte.

- GIBSON J.J. (1986). *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- HACKING I. (1975). *Why does language matter to philosophy?* Cambridge : Cambridge University Press.
- HACKING I. (1989). *Concevoir et expérimenter*. Paris : Bourgois.
- HACKING I. (2005). *Façonner les gens II*. Paris : Collège de France, 112 p., disponible sur Internet : [http://www.college-de-france.fr/site/phi\\_his/p998922592913.htm](http://www.college-de-france.fr/site/phi_his/p998922592913.htm) (consulté le 6 septembre 2006).
- HACKING I. (2006). *Méthodes de raisonnement*. Paris : Collège de France, 14 p., disponible sur Internet : [http://www.college-de-france.fr/media/phi\\_his/UPL50860\\_methodesia3.pdf](http://www.college-de-france.fr/media/phi_his/UPL50860_methodesia3.pdf) (consulté le 6 septembre 2006).
- LORENZ K. & POPPER K. (1990). *L'avenir est ouvert*. Paris : Flammarion.
- LATOUR B. (1995). *La science en action*. Paris : Gallimard.
- MARTINAND J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In G.-L. Baron & A. Durey. *Les technologies de l'information et de la communication et l'actualisation des enseignements scientifiques et technologiques au lycée d'enseignement général et au collège – université d'été*. Paris : INRP – ENS Cachan, 12 p., disponible sur Internet : <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf> (consulté le 6 septembre 2006).
- NEURATH, O. (1983). *Philosophical papers 1913-46*. Dordrecht : Reidel.
- NORMAN D.A. (1988). *The psychology of everyday things*. New York, NY : Basic Books.
- ORANGE C. (2000). La construction du concept de milieu intérieur par C. Bernard. (Essai d'analyse du point de vue de la construction du problème et de la modélisation). In Orange C. (dir.). *Changer ses connaissances sur le milieu intérieur*. Rapport de recherche INRP, IUFM des Pays de la Loire (coordination nationale, G. Rumelhard).
- ORANGE C. (2002). L'expérimentation n'est pas la science. *Cahiers Pédagogiques*, n° 409, p. 19-20.
- POPPER K. (1973). *La logique de la découverte scientifique*. Paris : Payot.
- POPPER K. (1985). *Conjectures et réfutations*. Paris : Payot.
- PUTNAM H. (1999). *The threefold cord. Mind, body, and world*. New York : Columbia University Press.
- RYLE G. (1949). *The concept of mind*. London : Barnes and Noble.
- SENSEVY G. (2002). Représentations et action didactique. *L'année des sciences de l'éducation, 2002*, p. 67-90.

- TIBERGHIEU A., BUTY C. & LE MARÉCHAL J.-F. (2005). Physics teaching sequences and students' learning. In D. Koliopoulos & A. Vavouraki (Eds.). *Science and technology Education at cross roads: meeting the challenges of the 21st century. The second conference of edife and the second ioste symposium in southern europe*. Athènes: Association for Science Education (edife), p. 25-55.
- TIBERGHIEU A. & VINCE J. (2005). Étude de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du français contemporain*, n° 10, p. 153-176.
- WITTGENSTEIN L. (1953/2004). *Recherches philosophiques*. Paris : Gallimard.



# Résumés

Traduction anglaise : **Wayne Iwamoto**

Traduction espagnole : **Elvire Torguet**

Traduction allemande : **Andrea Joannin**

---

## Abstracts

### ***Can Young Children Acquire Knowledge of the Physical World Through Simulation? (François-Xavier Bernard, Annick Weil-Barais & Michel Caillot)***

In an exhibition for young children at the *Cité des Sciences et de l'Industrie* in Paris two studies sought to evaluate whether the use of multimedia equipment which simulate the mixing of colours helped the children later put together the mixtures necessary to obtain certain colours. The first study, which was to determine the pivotal age for positive results, concerned 20 children aged two and a half to five and a half who were observed whilst carrying out trial-and-error experiments under the supervision of a qualified guide. The results showed that children 4 and over had acquired the transfer knowledge necessary from the simulator and guide to obtain the desired results. The second study concerned children aged 4 and over (25 in all) who were observed under normal conditions and who were accompanied either by a parent or a guide. The results of their work in a pre- and post-test (i.e. colouring work with material objects) exposed the influence of the simulator. The results show that simulators allow children to acquire knowledge of the physical world but that the role of the adult guides responsible for the visits remains crucial for children under the age of 5.

### **Simulating Biological Phenomena (Bektan Bodur & Jack Guichard)**

The study of various biological phenomena, especially those concerning bodily functions, is difficult to carry out through direct experiments. Thus, it is often

---

necessary to use models. Multimedia equipment is now able to generate virtual and realistic diagrams which simulate the phenomenon studied. Such is the case of the position and role of muscles involved in the bending and extending processes of the human arm.

This research project consisted in carrying out simulations using various visual support documents (i.e. drawings, diagrams, and video) and in using them with 8 to 10-year-olds in different Parisian elementary schools. The results determined the simulation types which best facilitate the understanding of the various phenomena and the retaining of the knowledge in time.

### **An Integrated Approach to Scientific Modelling Using Computers (Martin Riopel, Gilles Raïche, Patrice Potvin, Frédéric Fournier & Pierre Nonnon)**

This article deals with the theoretical, didactic and technological problems associated with developing a computer-aided learning environment for scientific modelling through the fusion of a computer-aided experiment system and a computer-aided simulation system. The most innovative aspect of this new environment resides in the possibility of comparing animated simulation and a video sequence through the direct layering of images.

The main conclusions concern the use of this environment in the teaching of traditional mechanics in post-secondary education as well as the possibility of automated modelling of the learning process of students. Results show that the characteristics of this new software should be further studied especially as regards the time required to learn how to use modelling equipment, the improved thinking processes of students and the ability to induce and deduce.

### **Chemistry Simulation and the Micromega® Project (Jean-François Le Maréchal & Karine Bécu-Robinault)**

This article takes a look at, from a modelling standpoint, the research and development project which was carried out, studied and perfected for various chemical simulations. It was compared to both taught and untaught models from which a classification was born based upon perceptible, re-built and theoretical knowledge objects. Simulators of the three types are described, analysed and discussed as concerns modelling and how knowledge is grasped. This article will interest researchers envisaging simulation in teaching, especially on a secondary level, and those educating future teachers so that the latter may learn how to use simulators in chemistry class.

## **Reality and Virtuality in the Teaching of Earth Sciences (Béatrice Desbeaux-Salviat & Dominique Rojat)**

Science is a mental activity which attempts to comprehend and explain facts using theoretical models that mimic reality. It studies facts, generates ideas and thus positions itself at that vital crossroads between what is real and what is virtual, lending itself naturally to didactics especially as regards the use of virtual teaching materials.

Models in their various forms are central to the teaching of the sciences and raise the question as to the role of facts and ideas and their interaction. The teacher-pupil pairing, a moment of exchange, relies upon the use of different media to present facts and ideas. These means fall into a grouping called documents. Determining whether a document represents an idea or a fact and in what manner and to what degree of accuracy remains a key question that is difficult to answer.

This problem must nevertheless be solved or at least recognized before looking at the teaching of the sciences especially when complex tools used for the presentation of virtuality (be they on-site or off-site) render the limits between reality and virtuality more and more vague.

## **Biology and Classifying Formal Models Based Upon the Way They Work (Muriel Ney)**

A classification based upon the way models function was carried out based on theory (Nifle) and defined the link between models and experience. Modelling methods used by researchers and experts share common ground with the way students learn how to create and use models and this common ground is based upon the model-experience pairing. This classification was construed for the specific case of formal models using mathematical, statistical and computer forms. For the various model types a teaching option was proposed especially as concerns the use of simulations. For a given working-model, which was used as an indicator, the authors have prepared some experience-based teaching methods. Modelling in the teaching of biology at university is also highlighted as well as examples of models.

## **An Epistemological Approach to Modelling (Gérard Sensevy & Jérôme Santini)**

This article relates work by two teachers from Stanford, Cartwright and Hacking School who have taken a scientific approach to modelling and who worked together through Fleck. It is based upon the idea of undoing the traditional idea

---

of models as being none other than the basic application or representation of scientific laws. The study seeks to show why models are intrinsically dependent on the context in which they are used and more linked to the user's abilities than to pure laws. Furthermore, it examines how these models link experience-related reality and the abstract of theory and how they are the result of various in-put. This innovative epistemological approach gives rise to some of the basic principles concerning the teaching and learning of the sciences.

## Sumarios

### **¿Pueden los niños pequeños adquirir conocimientos sobre el mundo físico utilizando un simulador ?**

**(François-Xavier Bernard, Annick Weil-Barais & Michel Caillot)**

En el contexto de una exposición destinada a los niños pequeños en la Ciudad de las Ciencias y de la Industria de París se llevaron a cabo dos estudios con el objetivo de estimar si la utilización de un dispositivo multimedia que simulaba mezclas de colores, les permitía más tarde realizar las mezclas adecuadas para obtener colores determinados. El primer estudio se realizó con veinte niños de edad de 2 años y medio a 5 años y medio, observados en un contexto experimental de manipulación bajo la conducta de un tutor experto. Los análisis llevados a cabo, que tenían como meta determinar la edad a partir de la cual los niños son capaces de ejecutar los procedimientos adquiridos gracias a un simulador en condiciones favorables de acompañamiento, pusieron en evidencia que, en lo que se refiere al sector del conocimiento considerado, la edad de 4 años parecía constituir un mínimo.

El segundo estudio incumbió pues a niños de al menos 4 años (25 en total) observados en el contexto habitual de utilización, o acompañados, sea de un padre, sea de un monitor. La comparación de sus reacciones con un pre-test y un pos-test (mancha de color con objetos materiales) permitió evaluar la contribución del uso del simulador. Los resultados muestran que este último puede permitir la adquisición de conocimientos sobre el mundo físico pero el papel del adulto que ejerce el tutorado sigue siendo determinante para los niños de menos de 5 años.



### **Simular un fenómeno biológico caso de la flexión-extensión del brazo (Bektan Bodur & Jack Guichard)**

El estudio de numerosos fenómenos biológicos, en particular los que se relacionan con el funcionamiento del cuerpo humano es difícilmente realizable con un recurso a la experimentación directa. Es necesario muy a menudo utilizar modelizaciones. La tecnología multimedia puede permitir la creación de objetos virtuales esquemáticos o realistas que simulan el fenómeno estudiado. Este es el caso de la posición y del papel de los músculos que intervienen en el movimiento de flexión-extensión del brazo en el ser humano.

Esta investigación consistió en elaborar simulaciones que utilizaban soportes visuales diferentes (dibujo, esquema, y foto animada) y en experimentarlas en alumnos de ciclo 3 de varias escuelas elementarias de París (alumnos de 8 a 10 años). Permitió determinar los tipos de simulación más favorables a la comprensión del fenómeno y su memorización a medio plazo.

### **Un acercamiento integrado de modelización científica asistida por ordenador (Martin Riopel, Gilles Raïche, Patrice Potvin, Frédéric Fournier & Pierre Nonnon)**

Este artículo presenta las consideraciones teóricas, didácticas y tecnológicas que nos han llevado a emprender una investigación relativa al desarrollo de un entorno informatizado de aprendizaje de la modelización científica que combina un sistema de experimentación asistida por ordenador y un sistema de simulación asistida por ordenador. La funcionalidad más original de dicho entorno permite comparar una simulación animada y una secuencia de vídeo por medio de la superposición directa de las imágenes. Los principales resultados de esta investigación atañen a la utilización del contorno desarrollado en el contexto de la formación en mecánica clásica, al nivel de la enseñanza universitaria y a la posibilidad de modelización automática de los razonamientos de aprendizaje de los estudiantes. Las propiedades de este nuevo tipo de software, puestas en evidencia por nuestra investigación, merecerían ser estudiadas más profundamente, sobre todo en lo relativo a la rapidez de aprendizaje de la modelización, al enriquecimiento del razonamiento del estudiante y a las solicitaciones entre inducción y deducción.

### **La simulación en química en el ámbito del proyecto Micromega® (Jean-François Le Maréchal & Karine Bécu-Robinault)**

Este artículo analiza del punto de vista de la modelización, un proyecto de investigación y de desarrollo, que ha puesto a punto, ha realizado y evaluado un

---

gran número de simuladores en ciencias químicas. Comentamos la relación con los modelos enseñados y no enseñados, y proponemos una clasificación en términos de categorías de objetos de saber perceptibles, reconstruidos y teóricos. Cada tipo de simulador es descrito, analizado y puesto en tela de juicio del punto de vista de la modelización y de la representación de los conocimientos. Este artículo se dirige a investigadores interesados en la simulación con fines pedagógicos, especialmente a nivel de instituto y a formadores de docentes para que hallen en él, una manera de apropiarse y de utilizar simuladores en la enseñanza de las ciencias químicas.

### **Lo real y lo virtual en la enseñanza de las ciencias de la naturaleza. (Béatrice Desbeaux-Salviat & Dominique Rojat)**

La ciencia es una actividad intelectual que intenta entender y explicar los hechos proponiendo un modelo teórico que se comporta como la realidad. Al estudiar los hechos, y al producir ideas, la ciencia se sitúa pues a la exacta frontera entre lo virtual y lo real, lo que no puede dejar de tener consecuencias didácticas en particular en lo que se refiere a la utilización de los recursos virtuales.

El concepto de modelo, bajo sus diferentes aspectos ocupa una posición central y permite abordar, en la enseñanza de las ciencias, el puesto de los hechos, de las ideas y sobre todo de su confrontación. La relación entre profesor y alumnos, fenómeno de comunicación, descansa sobre la utilización de instrumentos (los medios) de presentación de hechos y de ideas. Dichos instrumentos pueden ser reunidos bajo el término de documentos. Distinguir si un documento representa un hecho o una idea, de qué manera y con qué grado de fidelidad, es una cuestión a la vez central y difícil de resolver.

Sin embargo es preciso resolver esta dificultad, o al menos tomar conciencia de su existencia, para poder abordar la didáctica de las ciencias en particular cuando los instrumentos complejos de presentación virtual (presencial o distante) desdibujan poco a poco los contornos de la realidad.

### **Una tipología de las funciones de los modelos formalistas : el ejemplo de la biología (Muriel Ney)**

Una tipología de las funciones de los modelos se construye a partir de un marco teórico (Niflé) que permite definir la relación entre modelo y experimentación. Se admite que existe un vínculo entre la manera con la que se modeliza como experto o investigador, y la manera con la que se aprende a modelizar como estudiante y que este vínculo descansa sobre la relación experimentación/modelo. La tipología está construida para el caso particular de los modelos formalistas (que

utilizan un formalismo matemático, estadístico o informático). Para cada tipo de modelo, proponemos una opción pedagógica, en particular sobre el uso de las simulaciones. Obtenemos así una función del modelo, para « indicar », para la cual proponemos una pedagogía experimental. Presentamos igualmente una constatación del estado actual de la enseñanza de la modelización en biología en la universidad así como ejemplos de modelos.

### **Modelización : un acercamiento epistemológico (Gérard Sensevy & Jérôme Santini)**

Desarrollaremos en este artículo un acercamiento epistemológico de la modelización a partir de los estudios de dos autores de la escuela de Stanford, Cartwright y Hacking y de su referencia común a Fleck. En este acercamiento se trata de deshacerse de la idea clásica del modelo como sencilla aplicación o representación de leyes científicas. Con los autores citados deseamos mostrar por qué los modelos son intrínsecamente contextuales y son asunto de capacidades más que de leyes, cómo dichos modelos realizan la articulación entre lo concreto de la experimentación y lo abstracto de la teoría y por fin, por qué son la expresión de un pensamiento colectivo. De esta epistemología innovadora sacamos las primeras implicaciones didácticas para la enseñanza y el aprendizaje de las ciencias.

## **Zusammenfassungen**

### **Können Kleinkinder Kenntnisse über die Welt der Physik mit Hilfe eines Simulators erwerben? (François-Xavier Bernard, Annick Weil-Barais & Michel Caillot)**

Im Rahmen einer Ausstellung für Kleinkinder in der *Cité des Sciences et de l'Industrie* (Paris) sind zwei Forschungsarbeiten durchgeführt worden, die zum Ziel hatten, einzuschätzen, ob der Einsatz eines Multimediasdispositivs zur Simulierung von Farbmischungen es diesen Kindern später erlauben würde, die passenden Mischungen anzufertigen, um bestimmte Farbtöne zu erhalten. Die erste Studie wurde an zwanzig Kindern im Alter zwischen zwei Jahren und sechs Monaten und 5 Jahren und sechs Monaten durchgeführt, die in einem experimentellen Manipulationsrahmen unter der Leitung eines erfahrenen Tutors beobachtet wurden.

---

In den durchgeführten Analysen, die zeigen sollten, von welchem Alter an die Kinder fähig sind, die mit Hilfe des Simulators unter günstigen Begleitumständen erlernten Verfahren zu bewerkstelligen, stellt sich heraus, dass das Alter von vier Jahren für das betrachtete Wissensgebiet eine Etappe darstellt. Die zweite Studie betraf daher Kinder von mindestens vier Jahren (25 insgesamt), die im üblichen Kontext, begleitet von einem Elternteil oder einem Tutor, beobachtet wurden. Der Vergleich ihres Verhaltens bei einem Vor- und einem Nachtest (Ausmalen mit konkretem Material) hat es ermöglicht, den Beitrag des Simulatorgebrauchs auszuwerten. Die Ergebnisse zeigen, dass dieser es erlauben kann, sich Physikkenntnisse anzueignen, aber dass die Rolle des Erwachsenen, der als Tutor fungiert, entscheidend für Kinder unter 5 Jahren ist.

### **Das Simulieren eines biologischen Phänomens (Bektan Bodur & Jack Guichard)**

Die Untersuchung zahlreicher biologischer Phänomene, insbesondere derer, die das Funktionieren des menschlichen Körpers betreffen, ist schwerlich durch ein direktes Experiment durchzuführen. Es ist oft notwendig, es über eine Modellisierung zu tun. Die Zuhilfenahme eines Multimediadispositivs kann es erlauben, virtuelle schematische oder realistische Objekte zu schaffen, in denen das untersuchte Phänomen simuliert wird. Das ist der Fall bei der Positionierung und der Rolle der Muskeln, die beim Ausstrecken und Anwinkeln des Armes beim Menschen eingesetzt werden.

Diese Forschungsarbeit bestand darin, Simulationen zu erarbeiten, bei denen man verschiedene visuelle Träger einsetzt (Zeichnung, Schema, Trickaufnahme) und sie dann an Schülern des Cycle 3 (entspricht der 3., 4. und 5. Grundschulklasse) in Paris zu testen. Diese Arbeiten haben es gestattet, die günstigsten Simulationsarten für das Verständnis dieses Phänomens und seines mittelfristigen Memorierens ausfindig zu machen.

Eine integrierte Vorgehensweise der wissenschaftlichen Modellisierung unter Zuhilfenahme von Computern (Martin Riopel, Gilles Raïche, Patrice Potvin, Frédéric Fournier & Pierre Nonnon)

Dieser Artikel stellt theoretische, didaktische und technologische Betrachtungen dar, die uns dazu gebracht haben, eine Forschungsarbeit hinsichtlich der Entwicklung eines computergestützten Lehrumfelds zur wissenschaftlichen Modellisierung durchzuführen, indem wir ein Experimentiersystem mit Computern kombiniert haben. Die originellste Variante dieses computergestützten Umfelds erlaubt es, eine animierte Simulation mit einer Videosequenz durch direkte Überlagerung der Bilder zu vergleichen.

Die Hauptresultate dieser Forschung betreffen den Einsatz eines erweiterten Lehrumfelds im Ausbildungskontext für klassische Mechanik im Hochschulunterricht und die Möglichkeit der automatischen Modellisierung der studentischen Lernprozesse. Die Eigenschaften dieser neuen Softwareart, die durch unsere Forschungsarbeit sichtbar geworden ist, müssten eingehender untersucht werden, vor allem in Hinsicht auf das Lerntempo bei der Modellisierung, die intellektuelle Bereicherung des Studenten und die Anforderungen zwischen Induktion und Deduktion.

### **Simulierung im Chemieunterricht im Rahmen des Projektes Micromega® (Jean-François Le Maréchal & Karine Bécu-Robinault)**

Dieser Artikel untersucht unter dem Gesichtspunkt der Modellisierung ein Forschungs- und Entwicklungsprojekt, durch das eine große Anzahl von Chemiesimulatoren erarbeitet, hergestellt und beurteilt werden konnte. Die Beziehung zu im Unterricht eingesetzten und nicht eingesetzten Modellen wird erörtert und eine Klassifizierung in begrifflich festgelegte Kategorien, wie erkennbare, nachgebaute und theoretische Wissensobjekte wird vorgeschlagen. Jede Art von Simulator wird beschrieben, analysiert und erörtert in Hinsicht auf die Modellisierung und Darstellung von Kenntnissen. Dieser Artikel richtet sich an Forscher, die an Simulatoren zu pädagogischen Zwecken interessiert sind, ganz speziell in der gymnasialen Oberstufe, sowie an Leiter der Lehrerfortbildung, damit sie darin eine Möglichkeit finden, den Umgang mit Simulatoren zu erlernen und diese im Chemieunterricht zu benutzen.

### **Realität und Virtualität im Fach SVT (sciences de la vie et de la Terre) (Béatrice Desbeaux-Salviat & Dominique Rojat)**

Wissenschaft ist eine intellektuelle Tätigkeit, die versucht Tatsachen zu verstehen und zu erklären, indem sie ein theoretisches Modell anbietet, das sich wie die Wirklichkeit verhält.

Indem sie Tatsachen untersucht und Ideen hervorbringt, positioniert sich die Wissenschaft genau zwischen Virtualität und Realität, was nur didaktische Konsequenzen nach sich ziehen kann, besonders im Hinblick auf die Anwendung virtueller Ressourcen.

Der Begriff des Modells mit seinen unterschiedlichen Aspekten nimmt eine zentrale Stellung ein und erlaubt es, den Platz der Fakten, der Ideen und vor allem deren Gegenüberstellung im wissenschaftlichen Unterricht anzusprechen. Die Beziehung zwischen Lehrer und Schüler, ein Kommunikationsphänomen, beruht auf der

---

Benutzung von Werkzeugen (von Medien) für die Darstellung von Fakten und Ideen. Diese Werkzeuge kann man unter dem Begriff der « Dokumente » zusammenfassen. Zu unterscheiden, ob es sich bei diesem oder jenem « Dokument » um Fakten oder Ideen handelt und in welcher Hinsicht und mit welchem Zuverlässigkeitsgrad, das ist eine zentrale und zugleich schwer zu beantwortende Frage.

Man muss dieses Schwierigkeitsproblem jedoch lösen oder sich wenigstens bewußt sein, dass es existiert, um über die wissenschaftliche Didaktik sprechen zu können, besonders wenn komplexe Werkzeuge der virtuellen Darstellung (ob nun direkt präsent oder auf Distanz) nach und nach die Konturen der Realität verwischen.

### **Eine Typologie der formalen Modellfunktionen (Muriel Ney)**

Eine Typologie der Modellfunktionen wird ausgehend von einem theoretischen Rahmen (NIFLE) erstellt, der es erlaubt, das Verhältnis zwischen Modell und Experiment zu definieren.

Es ist bekannt, dass eine Verbindung zwischen der Art und Weise besteht, in der man ein Modell als Experte oder Forscher schafft und der, wie man als Student lernt zu modellieren, und dass diese Verbindung auf dem Verhältnis « Experiment/Modell » beruht.

Die Typologie wird für den besonderen Fall der formalen Modelle erstellt, indem man einen mathematischen, statistischen oder informatischen Formalismus einsetzt.

Für jede Art Modell wird eine pädagogische Alternative vorgeschlagen, insbesondere bei der Benutzung von Simulationen.

Wir erhalten eine Modellfunktion, um etwas « aufzuzeigen » und für die wir einen experimentellen pädagogischen Vorgang vorschlagen. Eine Bestandsaufnahme hinsichtlich des Modellierungsunterrichts in Biologie an der Universität wird ebenso dargestellt wie Modellbeispiele.

### **Modellierung: eine erkenntnistheoretische Vorgehensweise (Gérard Sensevy & Jérôme Santini)**

Wir legen in diesem Artikel eine epistemologische Vorgehensweise der Modellherstellung dar, ausgehend von Arbeiten zweier Autoren aus Stanford, nämlich Cartwright und Hacking und ihren gemeinsamen Bezug auf Fleck.

Bei dieser Vorgehensweise sollte man sich von der klassischen Vorstellung des Modells als einfache Anwendung oder Darstellung wissenschaftlicher Gesetze lösen.

Anhand der hier zitierten Autoren möchten wir zeigen, warum Modelle an sich vom Kontext abhängen und mehr eine Sache der Fähigkeiten als der Gesetze sind und inwiefern diese Modelle die Artikulierung konkreter Erfahrung und theoretischer Abstraktheit realisieren und letztendlich der Ausdruck eines gedanklichen Kollektivs sind. Aus dieser innovativen Epistemologie erarbeiten wir erste didaktische Implikationen in Bezug auf Unterricht und Lehre der Wissenschaften.





# aster

recherches en didactique des sciences expérimentales

2 numéros par an

à retourner à : **INRP • Service des publications • Abonnements**

**19, allée de Fontenay • BP 17424 • F-69347 LYON CEDEX 07**

Tél. +33 (0)4 72 76 61 66/63 • abonn@inrp.fr • www.inrp.fr

Nom .....

ou établissement .....

Adresse .....

Localité ..... Code postal .....

Téléphone ..... e-Mail ..... Pays .....

Date ..... Signature ou cachet .....

..... abonnement(s) x ..... prix unitaire = ..... euros TTC

Demande d'attestation de paiement :  oui  non

**Abonnement en ligne sur [www.inrp.fr/publications/catalogue/web/](http://www.inrp.fr/publications/catalogue/web/)**

Tarif abonnement 1 an	
France métropolitaine (sauf Corse)	28,00 € TTC
Corse + Dom (sauf Guyane)	27,10 € TTC
Guyane + Tom	26,54 € TTC
Étranger	34,00 € TTC
Le numéro (France métropolitaine sauf Corse)	17,00 € TTC

**Tout bulletin d'abonnement doit être accompagné d'un titre de paiement libellé à l'ordre du régisseur des recettes de l'INRP.** Cette condition s'applique également aux commandes émanant de services de l'État, des collectivités territoriales et des établissements publics nationaux et locaux (texte de référence : décret du 29 décembre 1962, instruction M9.1, article 169, relatif au paiement d'abonnements à des revues et périodiques). Une facture pro forma sera émise sur demande. Seul, le paiement préalable de son montant entraînera l'exécution de la commande.

**Ne pas utiliser ce bon pour un réabonnement, une facture pro forma vous sera adressée à l'échéance.**



## aster

recherches en didactique des sciences expérimentales

## DiDASKALIA

Recherches sur la communication  
et l'apprentissage des sciences et des techniques

**2 numéros par an**

**+ 2 numéros par an**

à retourner à : **INRP • Service des publications • Abonnements**  
**19, allée de Fontenay • BP 17424 • F-69347 LYON CEDEX 07**  
Tél. +33 (0)4 72 76 61 66/63 • abonn@inrp.fr • www.inrp.fr

Nom .....

ou établissement .....

Adresse .....

Localité ..... Code postal .....

Téléphone ..... e-Mail ..... Pays .....

Date ..... Signature ou cachet .....

..... abonnement(s) groupé(s) x ..... prix unitaire = ..... euros TTC

Demande d'attestation de paiement :  oui  non

**Abonnement en ligne sur [www.inrp.fr/publications/catalogue/web/](http://www.inrp.fr/publications/catalogue/web/)**

Tarif abonnement groupé Aster + Didaskalia 1 an	
France métropolitaine (sauf Corse)	52,20 € TTC
Corse + Dom (sauf Guyane)	50,53 € TTC
Guyane + Tom	49,48 € TTC
Étranger	62,10 € TTC

**Tout bulletin d'abonnement doit être accompagné d'un titre de paiement libellé à l'ordre du régisseur des recettes de l'INRP.** Cette condition s'applique également aux commandes émanant de services de l'État, des collectivités territoriales et des établissements publics nationaux et locaux (texte de référence : décret du 29 décembre 1962, instruction M9.1, article 169, relatif au paiement d'abonnements à des revues et périodiques). Une facture pro forma sera émise sur demande. Seul, le paiement préalable de son montant entraînera l'exécution de la commande.

**Ne pas utiliser ce bon pour un réabonnement, une facture pro forma vous sera adressée à l'échéance.**



# aster

recherches en didactique des sciences expérimentales

2 numéros par an

à retourner à : **INRP • Service des publications • Vente à distance**  
**19, allée de Fontenay • BP 17424 • F-69347 LYON CEDEX 07**

Tél. +33 (0)4 72 76 61 64 • pubvad@inrp.fr • www.inrp.fr

Nom .....

ou établissement .....

Adresse .....

Localité ..... Code postal .....

Téléphone ..... e-Mail ..... Pays .....

Date ..... Signature ou cachet .....

Numéro(s) commandé(s) .....

..... numéro(s) x ..... prix unitaire = ..... euros TTC

Demande d'attestation de paiement :  oui  non

**Vente en ligne au numéro sur [www.inrp.fr/publications/catalogue/web/](http://www.inrp.fr/publications/catalogue/web/)**

Prix du numéro • Tarif en vigueur	
Le numéro, France métropolitaine (sauf Corse)	17,00 € TTC

**Toute commande doit être accompagné d'un titre de paiement libellé à l'ordre du régisseur des recettes de l'INRP.** Cette condition s'applique également aux commandes émanant de services de l'État, des collectivités territoriales et des établissements publics nationaux et locaux (texte de référence : ministère de l'Économie, des Finances et du Budget, direction de la comptabilité publique, instruction n° 90-122-B1-M0-M9 du 7 novembre 1990, relative au paiement à la commande pour l'achat d'ouvrages par les organismes publics). Une facture pro forma sera émise sur demande. Seul, le paiement préalable de son montant entraînera l'exécution de la commande.



# aster

recherches en didactique des sciences expérimentales

## **Liste des numéros disponibles**

---

- |              |  |              |   |
|--------------|--|--------------|---|
| N° 2 (1986)  | Éclairages sur l'énergie                 | N° 25 (1997) | Enseignants et élèves face aux obstacles                          |
| N° 4 (1987)  | Communiquer les sciences                 | N° 26 (1998) | L'enseignement scientifique vu par les enseignants                |
| N° 5 (1987)  | Didactique et histoire des sciences      | N° 27 (1998) | Thèmes, thèses, tendances   |
| N° 6 (1988)  | Les élèves et l'écriture en sciences     | N° 28 (1999) | L'expérimental dans la classe                                     |
| N° 7 (1988)  | Modèles et modélisation                  | N° 29 (1999) | L'école et ses partenaires scientifiques                          |
| N° 8 (1989)  | Expérimenter, modéliser                  | N° 30 (2000) | Rencontres entre les disciplines                                  |
| N° 9 (1989)  | Les sciences hors de l'école             | N° 31 (2000) | Les sciences de 2 à 10 ans  |
| N° 11 (1990) | Informatique, regards didactiques        | N° 32 (2001) | Didactique et formation des enseignants                           |
| N° 12 (1991) | L'élève épistémologue                    | N° 33 (2001) | Écrire pour comprendre les sciences                               |
| N° 13 (1991) | Respirer, digérer : assimilent-ils ?     | N° 34 (2002) | Sciences, techniques et pratiques professionnelles                |
| N° 14 (1992) | Raisonner en sciences                    | N° 35 (2002) | Hétérogénéité et différenciation                                  |
| N° 16 (1993) | Modèles pédagogiques 1                   | N° 36 (2003) | L'enseignement de l'astronomie                                    |
| N° 17 (1993) | Modèles pédagogiques 2                   | N° 37 (2003) | Interactions langagières 1  |
| N° 18 (1994) | La réaction chimique                     | N° 38 (2004) | Interactions langagières 2  |
| N° 19 (1994) | La didactique des sciences en Europe     | N° 39 (2004) | Nouveaux dispositifs, nouvelles rencontres avec les connaissances |
| N° 20 (1995) | Représentations et obstacles en géologie | N° 40 (2005) | Problème et problématisation                                      |
| N° 21 (1995) | Enseignement de la géologie              | N° 41 (2005) | Produire, agir, comprendre  |
| N° 22 (1996) | Images et activités scientifiques        | N° 42 (2006) | Le corps humain dans l'éducation scientifique                     |
| N° 23 (1996) | Enseignement de la technologie           | N° 43 (2006) | Modélisation et simulation  |
| N° 24 (1997) | Obstacles : travail didactique           |              |   |

