

Un schéma théorique pour situer les activités avec des logiciels de simulation dans l'enseignement de la physique

A theoretical diagram for scientific activities with simulation software in physics learning

Daniel BEAUFILS

Université Paris-Sud, centre scientifique d'Orsay
DidaScO, bâtiment 333, 91405 Orsay cedex, France.

Bernard RICHOUX

INRP-TECNE
91, rue Gabriel-Péri, 92160 Montrouge, France.

Résumé

Les logiciels de simulation sont considérés a priori comme des outils privilégiés pour l'étude des théories et modèles dans le cadre de l'enseignement secondaire et supérieur. Mais la diversité des logiciels est grande et les indications sur leur utilisation pédagogique sont souvent absentes. Sur la base d'études exploratoires, nous proposons un schéma théorique qui permet d'explicitier les spécificités de la simulation numérique et de ses utili-

sations pour l'apprentissage des modèles en sciences. Il permet, en retour, d'interpréter les difficultés rencontrées par les élèves et les étudiants, et de guider l'enseignant dans l'élaboration d'activités en cohérence avec les logiciels.

Mots clés : *simulation, modélisation, didactique, physique, registres sémiotiques.*

Abstract

Simulation software can be considered as suited tools for learning theories and models in science at secondary or upper level. But there is a wide range of simulation software, and information on how to use it in science teaching/learning is often missing. Starting from exploratory studies, we present a theoretical diagram, related to other didactical schemata for modelling, which makes explicit numerical simulation features and clarifies uses for scientific models learning. It allows interpreting students' difficulties and can be a guideline for teachers to design activities based on « manipulating models ».

Key words : *simulation, modelling, didactics, physics, semiotics.*

L'utilisation des technologies de l'information et de la communication pour l'enseignement (TICE) dans l'enseignement français des sciences physiques est aujourd'hui marquée par l'introduction de la simulation. De nombreuses communications, lors des huitièmes journées *Informatique et pédagogie des sciences physiques* (Institut national de recherche pédagogique & Union des physiciens, 1998 ; Union des physiciens, 1998) alimentaient déjà cet axe de réflexion et, très récemment, le dossier consacré à ce thème par le site francophone de la formation à distance Thot montrait l'extension internationale du développement logiciel et l'émergence d'un questionnement fondamental sur l'introduction du « virtuel dans l'enseignement de sciences expérimentales ». Notre point de vue est que, parallèlement aux travaux spécifiques portant sur le rôle de la simulation dans les apprentissages, il convient de travailler la question de la caractérisation des logiciels et des usages potentiels, pour apporter des éléments de réponse aux questions que pose – de fait – l'utilisation pédagogique des logiciels dits de « simulation ». Le schéma théorique présenté ici vise à répondre à cette préoccupation sur les « simulations numériques » en l'inscrivant dans une problématique plus générale de la modélisation (relation monde théorique et monde réel, registres de représentations, etc.) Il permet en retour de clarifier la nature et la place de la simulation sur ordinateur, d'interpréter les points d'achoppement pour les élèves et les étudiants, et vise à donner un cadre

pour des études futures et des repères pour guider l'enseignant dans l'élaboration d'activités.

1. CONTEXTE

Les recherches didactiques sur l'utilisation de la simulation, pour l'enseignement de la physique notamment, datent de l'apparition des micro-ordinateurs. Dès le début des années quatre-vingts, Moore & Thomas (1983) proposaient une analyse des possibles en matière de simulation d'expériences, Osborne & Gilbert (1980) pointaient les potentialités de la simulation et de la manipulation de modèles pour l'avenir du « computer assisted learning » en sciences, Bork & Peckham (1979), Ogborn (1983), Robson & Wong (1985) proposaient l'utilisation de programmes simples pour l'étude des modèles, Hewson (1985) mettant l'accent sur les effets en termes de changement conceptuel. En France, un travail de conception de logiciels a été effectué à l'Institut national de recherche pédagogique (INRP) (Blondel & Schwob, 1985) et les travaux à visée didactique ont été initiés par A. Durey (Durey *et al.*, 1983 ; Beaufils *et al.*, 1987a, 1987b ; Durey, 1989). Si, dans différents pays, les travaux ont continué sur l'intégration de la simulation dans l'enseignement ou sur l'effet sur le plan des apprentissages (Hennessy *et al.*, 1995a, 1995b ; Niedderer *et al.*, 1991 ; Njoo & de Jong, 1993 ; Schecker, 1993a, 1993b), ce n'est que plus tardivement que les études sur les potentialités didactiques de la simulation ont été reprises en France. Des travaux ont alors porté sur la mise en place de séquences d'enseignement visant des apprentissages conceptuels et ont été menés sur différents domaines tels que l'électricité (Venturini, 1997), les propriétés des gaz (Méheut, 1996), la mécanique newtonienne (Joubert *et al.*, 2000), l'optique (Joubert & Rebmann, 1998 ; Rebmann, 2000 ; Buty, 2000). Récemment, l'accent a été porté sur l'importance des registres sémiotiques à propos de l'enseignement du son par exemple (Vince, 2000 ; Séjourné & Tiberghien, 2001) ou de façon plus générale (Beaufils, 2000).

Si l'activité de recherche dans ce domaine est aujourd'hui particulièrement importante, allant d'études visant à comparer l'efficacité des activités expérimentales et du travail sur environnement de simulation (Hucke & Fisher, 2002 ; Sander *et al.*, 2002 ; Millar *et al.*, 1999 ; Ronen & Eliahu, 2000) à l'élaboration et la validation d'environnements de modélisation (de Jong & van Joolingen, 1998 ; Komis *et al.*, 1998, Vosniadou *et al.*, 2001 ; Jimoyiannis & Komis, 2001 ; Guéraud *et al.*, 1999), les approches sont principalement celles d'études ou d'expérimentation dans des contextes et des environnements spécifiques. Or, du point de vue de l'enseignement effectivement dispensé par les enseignants dans leurs classes, la marge paraît grande, et

si l'intégration des TICE est marquée par une part grandissante donnée à la simulation numérique (Ministère de l'éducation nationale de la recherche et de la technologie, 1998), cette évolution se traduit par un foisonnement de ressources mises à disposition des enseignants (logiciels de simulation, environnements multimédias, appliqueuses disponibles sur la Toile) et par des innovations spontanées, le tout sans indications ni repères pour une intégration réfléchie dans les pratiques pédagogiques ou les programmes scolaires ou universitaires¹.

L'étude exploratoire que nous avons menée depuis plusieurs années en association avec l'INRP² a permis de mesurer la diversité des logiciels rassemblés sous l'étiquette « simulation », la difficulté de situer certaines activités sur le plan des objectifs d'apprentissage et les obstacles rencontrés par les élèves et étudiants dans leur compréhension même des actions qui leur sont proposées. Le type d'obstacles repérés, ainsi que le foisonnement de « solutions » techniques mises à disposition des enseignants, entrent en résonance avec les travaux menés antérieurement sur les utilisations de l'ordinateur « instrument de laboratoire » (Beaufils, 1993 ; Brénasin & Weil-Barais, 1994). Il convient donc, à notre sens, de travailler également sur la réalité de l'environnement sur lequel est fondé le milieu didactique que l'enseignant construit pour ses élèves ou étudiants et de fournir des repères pour la conception et l'analyse des activités. Ceci nous a conduits à examiner plus finement les environnements informatiques et les conditions d'élaboration d'activités cohérentes avec ces environnements. C'est cette analyse, replacée dans un cadre théorique visant à les situer dans un ensemble de questions plus générales concernant les modèles et la modélisation et, ainsi problématisée, d'envisager des expérimentations ciblées, que nous présentons ici.

2. POSITIONNEMENT DIDACTIQUE ET ÉPISTÉMOLOGIQUE

2.1. Un plan entre réalité et modèles

Dans le milieu éducatif, le débat sur la simulation est souvent centré sur la confusion réel-virtuel, sur la place pouvant être « accordée » à la simulation en regard des activités expérimentales et sur l'opposition théorie-expérience, sans que les choix épistémologiques sous-jacents, ou les enjeux didactiques attendus, soient explicités. Une première clarification peut être faite en adoptant la présentation de C. Buty (*Op. cit.*) où la simulation apparaît comme plan intermédiaire entre le monde réel (que nous préférons dénommer ici le monde matériel³ et le monde des théories et modèles. Sur

le plan didactique, ceci correspond à l'hypothèse qu'un tel intermédiaire favorise une mise en relation des événements et phénomènes du monde réel et l'interprétation du physicien en termes de théories et modèles.

Cette première schématisation permet de servir de référence à ce que peut être un logiciel de simulation, explicitant les pôles d'ancrage que sont le référent empirique et les modèles tout en traduisant les sources d'ambiguïté. Le schéma qui en résulte permet en effet de situer un premier jeu de relations possibles pouvant s'établir entre les différents plans (figure 1). Ainsi, pour ce qui concerne le logiciel, on peut distinguer deux possibilités :

– 1 le logiciel prend comme référence la phénoménologie : les objets et instruments sont représentés (de façon plus ou moins réalistes) et la phénoménologie est représentée (aspects visibles, ou rendus visibles, des phénomènes) ;

– 2 le logiciel prend comme référence le modèle : les objets réels sont représentés de façon symbolique, les instruments sont en principe absents (ou représentés de façon très symbolique).

Pour ce qui concerne les activités, deux orientations peuvent également être considérées :

– 3 l'activité vise à renforcer des connaissances relatives au modèle et/ou à la théorie ;

– 4 l'activité vise à renforcer des connaissances factuelles et des aptitudes à la reconnaissance de phénomènes.

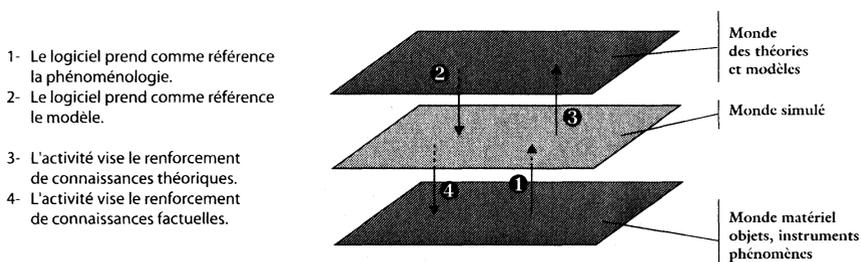


Figure 1 • La simulation entre monde matériel et théorie

À ce niveau de généralité, ce schéma peut donc convenir à de nombreux exemples de disciplines expérimentales différentes (physique, chimie, biologie, géologie). Dans le cas de la physique, le lien constitutif de la simulation est, de façon privilégiée, celui avec la théorie et les modèles (Richoux *et al.*, 2002), l'apparence n'étant pas nécessairement la référence.

2.2. « Monde des signes » et registres sémiotiques

Nous revenons ici sur la question des « mondes » pour préciser le sens que nous donnons à ces termes. En effet, différents travaux didactiques ont porté sur la modélisation des relations entre ce type de « mondes », soit d'un point de vue épistémologique soit d'un point de vue opératoire pour appréhender les processus cognitifs, et ont utilisé des termes voisins dans des modélisations différentes. Nous tentons, dans ce paragraphe, de resituer les différentes propositions, puis de montrer comment la prise en compte de la simulation peut amener à considérer l'existence d'un « monde des signes ».

Dans l'articulation du champ empirique et du champ théorique (Martinand *et al.*, 1992 ; Martinand, 1998), le processus dynamique de la connaissance est un va-et-vient entre les deux : un sens est celui de la modélisation, l'autre celui de l'application de la théorie et des modèles qui, « en retour », viennent modifier la perception des objets et phénomènes, conduisant ainsi à de nouvelles phénoménologies. La simulation peut alors apparaître au niveau des chemins de retour (Beaufils, 1999), cette place de la simulation dans le fonctionnement de la science ayant d'ailleurs été considérée comme une des démarches du physicien pouvant être prise en référence (Guillon, 1995). L'articulation « monde des objets et événements » / « monde des théories et modèles » utilisée dans d'autres travaux (Tiberghien, 1999 ; Millar *et al.*, 1999) vise à penser les activités expérimentales du point de vue de la mise en relation de ces deux mondes, considérant cette dernière comme l'activité cognitive centrale de l'élève. Les « mondes » sont donc moins des désignations de mondes « extérieurs à l'apprenant » que leurs représentations cognitives. Si vivre dans le monde implique que les événements soient intelligibles, l'individu va construire des « modèles » ou des « théories » en relation directe avec ses perceptions ; l'objectif de l'enseignement de la physique est alors de faire accéder l'élève au type de représentations qui rendent le monde intelligible aux yeux des physiciens. On retrouve cette partition dans le schéma de Malafosse *et al.* (2000, 2001) dont la position épistémologique repose sur l'affirmation d'un « espace de réalité » hors de tout « espace psychique », et dont le positionnement didactique se caractérise par la mise en relation de « cadres de rationalité » et de registres sémiotiques (Duval, 1995).

Or, parce qu'avec des logiciels de simulation l'activité de l'élève ou de l'étudiant s'appuie naturellement sur l'obtention ou la manipulation de représentations sémiotiques [courbes, valeurs numériques, expression mathématique, schéma, dessin (Beaufils, 2000b)], celui-ci est amené à travailler dans le monde des modèles et théories physiques comme indiqué précédemment, et ainsi, très concrètement, à manipuler un « monde des signes ». À ce

propos, notre point de vue, bien que proche des schémas évoqués, s'en distingue en ce que la remarque précédente affirme implicitement l'idée d'une existence en quelque sorte ontologique d'un « monde de signes » à l'instar du monde matériel (Beaufils, 2000a). Cette position comporte une part épistémologique et une part didactique : nous n'argumenterons pas ici la première qui renverrait à des considérations philosophiques⁴, pour insister sur la seconde, d'un point de vue opératoire. Cette position est en effet à même de rendre compte de la situation de l'élève ou de l'étudiant qui se trouve, de fait, confronté à deux mondes : celui des objets, des observations, des instruments, etc., et celui des *énoncés* de lois, des *expressions* mathématiques de théorèmes, de *courbes* calculées ou représentatives de données expérimentales, etc., qui existent hors de tout espace psychique de l'élève ou de l'étudiant. Leurs manuels scolaires ou leurs ouvrages universitaires contiennent en effet le savoir⁵, transcrit sous forme de formules, courbes, schémas, etc., qu'il leur faut apprendre. Si l'on peut être d'accord avec un « cadre de rationalité » scientifique (Malafosse *et al.*, 2001), constitué de concepts et de règles de raisonnement, faisant implicitement référence au cadre personnel du professeur ou du physicien, il nous semble donc que « l'espace de réalité » de l'élève n'est pas limité aux objets et aux événements, mais doit inclure un « monde des signes ». Cela dit, pour ne pas multiplier les acceptions terminologiques et pour renforcer l'explicitation de notre point de vue, nous avons, dans le schéma ci-dessous (figure 2), séparé ce qui relève de l'espace de réalité au sens de Malafosse, et ce que nous avons appelé « l'espace des signes » (ce choix est aussi en cohérence avec les utilisations des logiciels de simulation : si les traces produites sur les écrans ont une « réalité renforcée », ce n'est pas pour leur appartenance à l'espace de réalité de Malafosse que les enseignants les emploient). Ce faisant, conformément à notre point de vue, nous les avons placés sur le même niveau (figure 2).

La tâche de l'élève ou de l'étudiant, la tâche qui lui est *in fine* dévolue, est bien, à notre sens, de mettre ces deux « mondes » en relation : faire le « lien » entre la courbe et le phénomène, entre l'expression du modèle et le dispositif expérimental, entre les valeurs théoriques et les mesures. Nous avons ainsi représenté la sphère « cognitive » des représentations mentales, des connaissances et plus généralement des idées, propre au sujet pensant (scientifique ou élève), pouvant évidemment concerner aussi des connaissances factuelles (relatives à des objets ou des phénomènes) que des éléments théoriques. Ceci est évidemment à rapprocher de la « lunette cognitive » de P. Nonnon (1986), image métaphorique de la mise en relation de ces deux « mondes » et de l'apprentissage de l'abstraction et de la modélisation fondé sur la contiguïté d'une représentation dans un langage graphique et du phénomène qui l'a générée (figure 3).

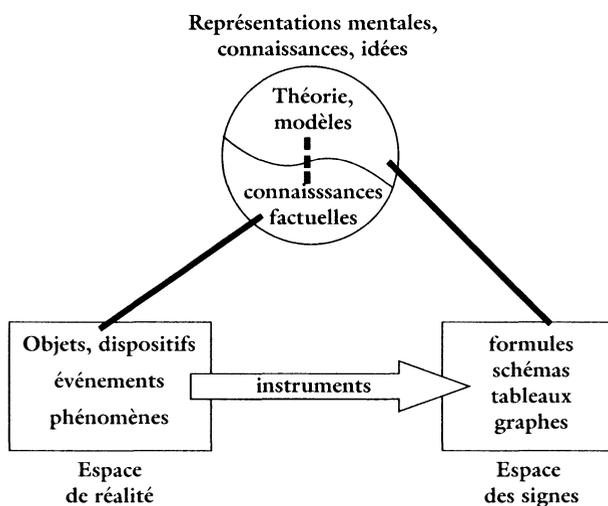


Figure 2 • Un espace des signes qui fait partie du « réel » de l'élève en classe de physique

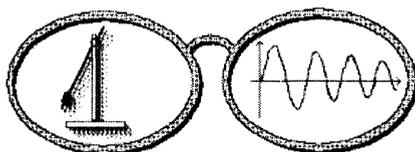


Figure 3 • La lunette cognitive ; P. Nonnon (logo de l'association EVARISTE⁶)

Nous avons fait également apparaître une flèche associée au rôle des instruments. Ce schéma a en effet été élaboré conjointement dans le cadre d'un autre travail sur les activités de travaux pratiques, où l'attention a été attirée sur l'utilisation d'instruments inscripteurs et imageurs. Ces dispositifs permettent en effet le passage direct « réel-signes », c'est-à-dire du phénomène à sa représentation (graphique, par exemple). Ils peuvent donc court-circuiter le passage par le monde des idées, soit parce que, représentation et phénoménologie n'étant pas congruentes (au sens de Duval), la contiguïté n'est alors pas nécessairement signifiante, soit parce que l'absence de guidages didactiques spécifiques laisse l'élève simple contemplateur d'indices de surface. En d'autres termes, il est bien clair que la possibilité technique de voir à la fois le phénomène et sa représentation graphique sur l'écran d'un ordinateur, ne doit pas laisser oublier celui qui porte la lunette : l'apprenant...

2.3. À propos des activités

Comme nous l'avons évoqué précédemment, la question de la légitimation des utilisations de la simulation dans l'enseignement de sciences expérimentales est source de débat. La référence aux utilisations scientifiques ou professionnelles de la simulation (astrophysique, fluide, électro-rique, etc.) peut aider à l'introduction de ces possibles dans les programmes, mais ne suffit pas car l'argumentation est aussi à trouver au sein même des activités didactiques que l'on peut proposer aux élèves ou étudiants⁷.

Une telle argumentation peut s'appuyer sur la structure présentée précédemment, mais cette fois du point de vue de l'élève et des activités effectives. Ainsi, si l'on admet que l'objectif est d'amener l'élève ou l'étudiant à mettre en relation le monde matériel et les théories, alors, de la même façon que l'acquisition de connaissances factuelles et de savoir-faire peut s'appuyer sur la manipulation d'objets et d'instruments, l'acquisition de connaissances théoriques peut s'appuyer sur la manipulation des modèles. La simulation est alors là un moyen *a priori* essentiel, puisqu'elle permet une activité qui n'est pas limitée à la manipulation de formules simples et permet un jeu étendu sur les registres sémiotiques. L'activité sur environnements de simulation apparaît ainsi dans le lien entre l'espace des signes et celui des idées (figure 4).

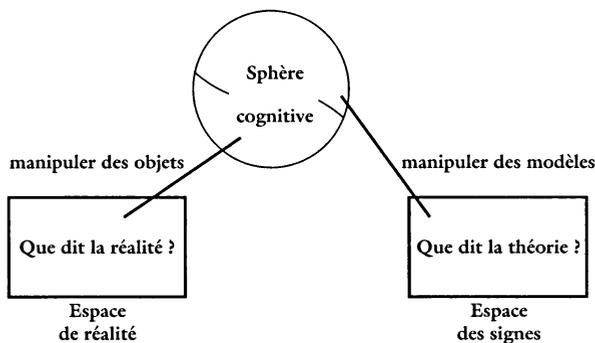


Figure 4 • La simulation pour manipuler des modèles

Notre point de vue didactique est que, en premier lieu, si l'on veut pouvoir mettre en relation le monde matériel et la théorie, la première étape est bien de *différencier* ces deux « mondes ». En second lieu, nous visons la possibilité d'un fonctionnement indépendant : de la même façon que l'on peut questionner le réel par des expériences et des instruments, on doit *pouvoir questionner la théorie ou des modèles par la simulation*. Notre idée est donc de présenter des activités comme explicitement liées au « monde des

théories et modèles », faisant l'hypothèse que celles-ci seront plus favorables à l'acquisition de connaissances théoriques. Nous reviendrons sur ces aspects dans la suite.

Parmi les activités de « manipulation de modèles », nous proposons de distinguer **trois grands types** que nous présentons rapidement ci-dessous.

La modélisation : nous désignons ici l'activité d'élaboration-construction d'un modèle physique. Avec de nombreux logiciels il est possible de construire un système mécanique, un modèle de dispositif optique ou de circuit électronique. La caractéristique de l'activité réside dans les questions de choix des propriétés des « objets »⁸ et de leurs relations : choix d'un pendule simple et des forces de frottement, choix de modèles de lentilles, choix de modéliser un circuit par des composants idéaux, etc. Cette activité est générale, mais un logiciel de simulation peut contribuer à la faciliter, à ouvrir le champ des possibles : l'environnement peut reposer sur les principes de la théorie dans laquelle le modèle sera élaboré (*Interactive Physique* en est l'exemple-type), ou être plus général et permettre la programmation des différentes relations représentatives du modèle (cas du logiciel *Stella*, par exemple).

La manipulation de modèles : nous désignons par cette expression l'activité sans doute la plus courante. Le modèle est explicité, sa mise en fonctionnement est programmée, et l'activité vise l'obtention de résultats (numériques ou graphiques) fournis par le modèle avec lequel il convient de se familiariser. Ainsi, par exemple, la modélisation des interférences à l'infini par N sources conduit à une expression mathématique explicite qui peut être manipulée pour voir l'effet de la valeur de N ; de même l'association de résistances en réseau R - $2R$ peut-elle être étudiée au niveau du modèle. La « simulation » (dans ce que nous appellerons son sens « faible ») permet de concrétiser le modèle par le jeu des essais multiples possibles, par les possibilités de changement de représentation, etc.

L'investigation de modèles, ou l'expérimentation sur modèles : il s'agit là de l'activité caractéristique de la simulation. On peut en effet aller au-delà de la situation décrite précédemment : la mise en fonctionnement du modèle *via* le logiciel permet d'en explorer les propriétés, non seulement celles « préprogrammées » mais aussi *celles qui en découlent*. La programmation d'un modèle microscopique (automate cellulaire, modèle particulaire, etc.) permet l'étude de propriétés macroscopiques (pression, volume et température). De même, la programmation d'une simulation reposant sur les équations différentielles de la mécanique (équations locales) conduit à des résultats qui peuvent être analysés pour vérifier la loi des aires. Il s'agit donc là d'une activité scientifique conduisant éventuellement à des « mesures sur modèle » et calculs à l'instar des activités dites expérimentales.

À partir de ces types d'activités, il est possible de revenir sur le sens que l'on peut attribuer au mot « simulation ». Dans de précédents travaux, notre position était fondée sur une caractéristique partagée par des scientifiques (Kowalski, 1985) : il y a simulation lorsqu'on utilise des méthodes numériques de traitement d'équations n'ayant pas de solution analytique. Étendue à l'enseignement, nous avons alors proposé d'associer la simulation à l'utilisation de méthodes numériques de « résolution » d'équations différentielles lorsque leur résolution analytique était hors de portée des élèves (Beaufils, 1992b). Dans le même esprit, il nous semble cependant devoir être aujourd'hui moins restrictif et dire qu'il y a simulation dès lors que l'activité, fondée sur la connaissance explicite des équations de la théorie ou du modèle⁹ vise la découverte ou la production d'un résultat non évident. Suivant le niveau des élèves ou des étudiants, les modèles seront alors évidemment plus ou moins complexes (la recherche de la portée maximale ou des deux angles de tir possibles pour atteindre une cible dans le modèle d'une trajectoire parabolique, par exemple, peut relever de la simulation en classe de seconde ou première), mais il est essentiel d'y voir un travail d'*investigation du modèle physico-mathématique*.

3. SCHÉMA THÉORIQUE POUR LES ENVIRONNEMENTS DE SIMULATION

La « réalité des signes » décrite précédemment devient indéniable dès lors que l'on s'intéresse à la simulation et aux « traces » que les logiciels produisent sur les écrans. La crainte parfois suscitée par des environnements qui permettent la manipulation directe des « objets simulés » vient d'ailleurs en partie de la possibilité de travailler uniquement sur le plan des représentations figuratives d'un monde matériel (figuration d'objets ou d'instruments voire, dans certains logiciels, de protocoles expérimentaux et de mesures) sans faire de liens avec la théorie ou les modèles sous-jacents du logiciel. Dans le même ordre d'idées, si la simulation sur ordinateur favorise, comme nous l'avons évoqué précédemment, le jeu sur les registres sémiotiques, il est clair que celui-ci peut n'être que source de confusions si l'activité ne comporte pas les guidages nécessaires et si le logiciel « entretient » la confusion des signifiés. Ce peut être le cas, par exemple, à l'occasion des utilisations du logiciel *Interactive Physique* qui permet de manipuler directement la représentation de masses, ressorts, etc., et d'obtenir des visualisations sans en percevoir leur nature de modèles. Nous avons ainsi été conduits à étudier la structure de principe d'environnements de simulation fondés sur la mise en œuvre des modèles.

3.1. Une structure fine pour le niveau de la simulation

Par rapport au plan de la simulation de la figure 1, la structure fine que nous proposons (figure 5) comporte trois plans (ou « feuillets »). Il convient de distinguer :

– le plan de la « mise en programme » (implémentation du modèle) où apparaissent les calculs qui sont effectués : équations de base de la théorie ou du modèle, méthode de résolution numérique pas à pas d'une équation différentielle, tirage aléatoire, etc. Ce plan est le cœur du logiciel et les méthodes numériques peuvent être sources d'artefacts qu'il faut savoir repérer et éliminer ;

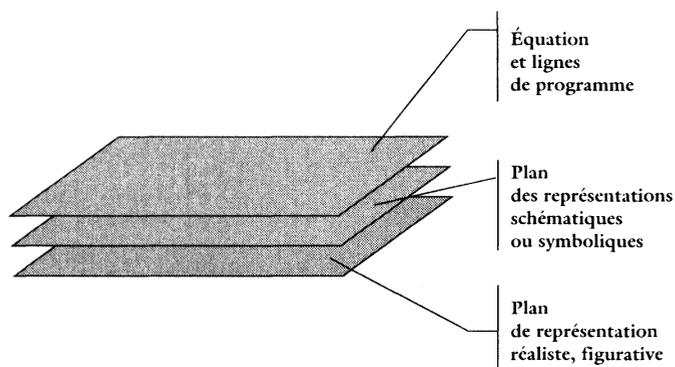


Figure 5 • Une structure feuilletée pour les environnements de simulation

– celui de la représentation schématique ou symbolique du modèle : celui où des objets « élémentaires » munis de propriétés (objets massiques, composants électroniques, lentilles minces, etc.) sont mis en relation pour modéliser un système plus complexe dont on étudie le comportement. C'est dans ce plan également qu'apparaissent les courbes issues des calculs ;

– celui de la représentation figurative ou imagée : plan où l'on peut mettre en scène le modèle de façon à évoquer la « réalité ». Ce plan doit en effet être distingué du précédent, car à ce niveau il peut ne plus y avoir aucun lien entre la représentation et les *propriétés* du modèle¹⁰.

Entre ces trois plans, existent évidemment des liens constitutifs de la simulation : l'action sur les représentations symboliques ou figuratives (modification de forme, affectation de propriétés, création de liens) se traduit automatiquement par une modification correspondante dans le programme qui, alors, pilote les tracés et représentations. Un tel logiciel, qui se caractérise par cet ensemble de propriétés de calcul et de représentation, plus ou

moins spécifiques d'un domaine, est à distinguer d'un logiciel de calcul (type tableur) ou d'un langage de programmation. C'est pourquoi nous utilisons le terme de « logiciel-environnement ».

3.2. Simulation, modélisation et logiciel-environnement

Si l'on veut ici re-situer les activités, la modélisation qui est l'activité correspondant à l'élaboration d'un modèle, apparaît donc en amont de la simulation qui, elle, correspond à la mise en fonctionnement du modèle (figure 6).

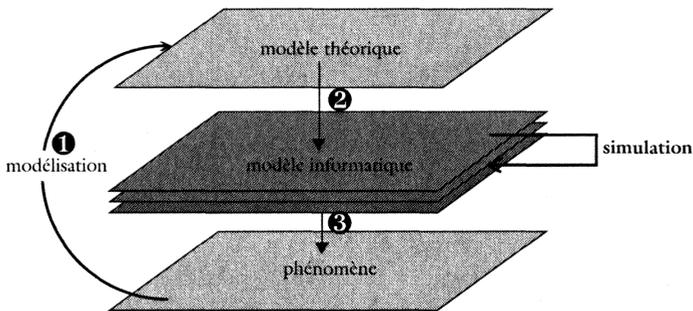


Figure 6 • Modélisation et simulation

Une activité de modélisation complète est d'abord l'élaboration d'un modèle en référence à un phénomène ou un système du monde réel (figure 6, flèche n° 1), traduit en un ensemble de relations physico-mathématiques (représentation formelle du modèle). Ces équations sont ensuite transformées en un code informatique (représentation informatisée du modèle, figure 6, flèche n° 2), dont la mise en fonctionnement produit des résultats numériques et/ou graphiques, pouvant alors être confrontés à des mesures (figure 6, flèche n° 3). Ce type d'activité correspond à différents exemples d'utilisation de logiciels généraux (tableurs) ou d'activités de programmation dans un langage spécifique. En termes de démarche scientifique, l'ensemble correspond à ce que Guillon a présenté comme l'une des quatre démarches expérimentales de base du physicien : la démarche de simulation (Guillon, 1995).

S'il est évident que la modélisation, dans son étape de mise au point d'un modèle, peut nécessiter le recours à la simulation, l'utilisation pédagogique de la simulation repose en réalité souvent sur un modèle préétabli. Et, de ce point de vue, l'utilisation d'un logiciel-environnement correspond à une modification importante du « chemin de modélisation » : la flèche n°2 du

schéma précédent est préprogrammée et l'ergonomie du logiciel est telle que l'activité de modélisation peut s'effectuer sans le passage par l'explicitation du modèle ni de sa représentation informatique, et viser directement le plan intermédiaire des représentations graphiques.

L'exemple représenté figure 7 est celui d'une activité permettant de simuler le montage d'un circuit électrique et d'étudier, par exemple, l'effet de la valeur de la résistance sur la décharge oscillante d'un condensateur.

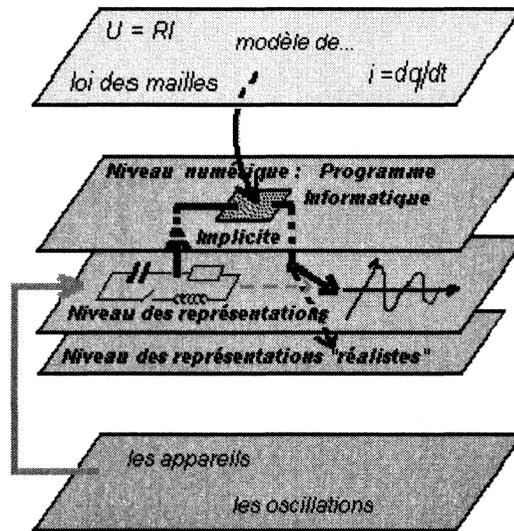


Figure 7 • Actions dans un environnement de simulation : les flèches en gras indiquent un chemin d'actions qui court-circuite le modèle

Le logiciel est fondé sur les lois de l'électrocinétique : loi des mailles et des nœuds, relations tension-intensité des dipôles, etc. Ces lois sont traduites en code informatique qui met en jeu des méthodes numériques de résolution par approximations successives. Mais l'ergonomie du logiciel permet de manipuler directement les schémas des composants, et d'obtenir dans le même plan (celui de l'écran de l'ordinateur) les courbes représentatives du phénomène.

Dans certains logiciels, la représentation est figurative, allant jusqu'à représenter les éléments par les images des composantes et indiquer, par exemple, la variation de l'intensité par la variation de l'éclairement d'une « ampoule ».

On voit alors que la différence de « parcours » peut se traduire en

risque pédagogique : l'utilisation peut se faire, pour l'élève, sans aucune référence au modèle, ni même d'ailleurs, au fait que celui-ci passe par une forme « informatique ».

4. QUELQUES ÉLÉMENTS DE PREMIÈRE ANALYSE

Les éléments théoriques que nous avons présentés ci-dessus ont été évidemment nourris par différentes innovations que nous avons pu suivre (telle l'option « Physique en ligne » en premier cycle universitaire de sciences de la matière au centre scientifique d'Orsay) ou auxquelles nous avons participé [réalisation d'un ensemble de neuf séances couvrant le programme d'optique de la spécialité de terminale avec le logiciel *RayTrace* (Richoux *et al.*, 2002)], mais permettent en retour de mieux cibler les points d'observation et les analyses. Nous présentons ci-dessous quelques éléments d'analyse de nos études de logiciels et de nos premières expérimentations.

4.1. À propos des logiciels et de leurs utilisations *a priori*

Une première analyse des logiciels dits « de simulation » peut être faite sur la base des éléments de caractérisation présentés ci-dessus. On peut ainsi regarder si le logiciel prend en référence une phénoménologie ou un modèle puis, dans le second cas examiner les points suivants :

- le modèle est-il explicité ?
- quels sont (nombre et nature) les degrés de liberté du modèle (c'est-à-dire, les « paramètres » qui sont donnés à manipuler) ?
- quels sont les différents registres sémiotiques mis en jeu ?
- les modes d'action sur le modèle se font-ils dans un registre numérique, formel, graphique ?
- les informations relatives aux calculs effectués par le logiciel sont-elles données ? (principe d'application du modèle, méthodes numériques spécifiques) ; y a-t-il accès à des paramètres associés ?
- les plans de représentation figurative et symbolique sont-ils clairement distingués ?

Ce premier niveau d'analyse a été appliqué à un ensemble de logiciels rassemblés sous l'étiquette « simulation », allant des appliquettes jusqu'à des logiciels semi-professionnels tels que *Electronics Workbench*, en passant par des applications multimédias pour l'autoformation¹¹ ou des logiciels diffusés à l'occasion des nouveaux programmes des classes de lycée. Le premier constat est évidemment leur grande variété, allant de ceux

offrant quelques possibilités de jeu sur un graphique ou de modification d'une valeur numérique, à des environnements très ouverts permettant à l'utilisateur de créer le système dont il explorera ensuite le comportement. Au-delà de cette simple constatation il nous est apparu que l'articulation des différents feuillets de la structure fine semble liée à la discipline. Ainsi, en mécanique newtonienne, l'existence d'une loi d'interaction et d'une relation différentielle locale permet de réaliser des simulations « explicatives » des phénomènes macroscopiques et il est possible de générer des représentations figuratives des objets et des phénomènes. En électronique, les manipulations sont celles de symboles, et les résultats sont des valeurs numériques relatives aux tensions et aux intensités (donc de façon proche de la réalité des boîtes « noires » et des instruments de mesure). Entre ces deux cas, celui de l'optique géométrique est singulier puisqu'il porte sur la manipulation d'un « objet » purement théorique : le rayon lumineux.

Le logiciel *Stella* que nous avons précédemment cité, ainsi que le logiciel voisin *Ithink*, constituent à ce titre des exemples particulièrement intéressants. Leur structure fait en effet apparaître explicitement trois fenêtres proches des feuillets ci-dessus, entre lesquelles l'utilisateur peut passer, associant ainsi telle relation entre grandeurs à une ligne de programme, et tel paramètre à une représentation figurative¹². Par ailleurs, ces logiciels invitent l'utilisateur à travailler dans un registre purement symbolique : la métaphore pompe-réservoir, traduite en icônes, permet de modéliser tout phénomène descriptible par des équations différentielles du premier ordre. La figure 8 illustre le type de représentation symbolique utilisée : dans cet exemple le « débit de la pompe » dépend de la valeur « stockée dans le réservoir ». L'équation différentielle qui traduit cette propriété est ici appliquée à l'électricité, dans le cas où l'intensité i , taux de variation de la charge q , peut aussi en dépendre.

Cet exemple nous amène à ajouter que ce plan des représentations est, suivant les logiciels, plus ou moins proche du plan des calculs ou du plan de la figuration : ainsi pour *Stella* la représentation est très proche de l'expression physico-mathématique du modèle¹³, tandis que pour *Interactive Physique*, la représentation est très proche du figuratif. Cette proximité des expressions mathématiques, ainsi que le caractère non figuratif, sont d'ailleurs sources de difficultés chez les élèves de lycée.

Pour ce qui concerne les modes d'action sur le modèle, si une tendance à offrir des possibilités combinées dans les registres numérique et graphique est notable, là encore, les différences sont importantes d'un logiciel à l'autre (les « points d'entrée » n'appartiennent pas toujours au même plan) et les possibilités sont souvent « incomplètes » (possibilité de modifier une valeur pour modifier un graphique, mais sans la possibilité

inverse de modifier le graphique pour jouer sur la valeur, par exemple).

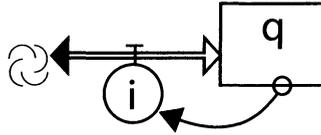


Figure 8 • Symbolisme dans *Stella/IThink*

Enfin, notre premier examen a montré également que, dans la plupart des cas, les informations sur le modèle utilisé ne sont pas données et qu'il est rare de trouver celle sur le principe de la programmation des calculs sous-jacents. De même, l'examen des « documents d'accompagnement » (quand ils existent) proposés par les auteurs de logiciels montre bien que la situation est problématique : dans de nombreux cas, hormis l'indication des éléments « cliquables » et la possibilité de faire telle ou telle action, il n'y a souvent pas d'activité pédagogique prévue.

Ces aspects, notamment le dernier point, sont évidemment directement reliés aux questions didactiques portant sur l'utilisation de ces logiciels : quel sens peut-on donner à une activité si l'on ne sait pas ce que l'on manipule ? Cette question n'est pas anodine, car il est possible de trouver des exemples ambigus : logiciel qui simule simplement des phénomènes mais que l'on pourrait observer facilement par l'expérience, logiciel fondé sur un modèle mais ce dernier n'est pas explicité, activité de recherche de propriétés d'un système mais proposée sur une simulation qui est précisément fondée sur la dite propriété, etc. Ce dernier point nous paraît intéressant parce qu'il soulève des questions mettant en jeu l'articulation entre le « scientifique » et le « didactique » : quel sens – scientifique ou didactique – y a-t-il à « découvrir », par exemple, les lois de Descartes en « mesurant » des angles de réfraction calculés sur ladite loi ?

4.2. À propos des activités d'élèves et d'étudiants

Les éléments que nous rapportons ci-dessous proviennent d'une part du suivi des innovations évoquées précédemment et d'autre part d'expérimentations spécifiquement montées pour étudier les possibilités d'utilisation de tel ou tel environnement de simulation.

Par « suivi » des innovations, nous entendons l'observation du déroulement des séances par un chercheur en vue du repérage des difficultés rencontrées en situation par les étudiants, suivie d'entretiens semi-directifs de quelques étudiants. Au cours des entretiens un retour est effectué sur leur travail (reprise d'une « expérience » avec le logiciel utilisé avec discussion sur

l'articulation entre contenu théorique et manipulations, par exemple) pour connaître leur perception de la cohérence de l'activité et de la démarche qu'ils ont suivie. Dans le cas du suivi de l'option « Physique en ligne », citée précédemment, les échanges d'un binôme ont été enregistrés au magnétophone à chaque séance. Les dialogues ont été retranscrits pour y repérer la part « technique » ou « conceptuelle » des questions ou remarques.

Sous le terme « expérimentation » nous indiquons le montage de situations visant l'observation de points spécifiques. Ainsi, par exemple, une séance d'option IESP (Informatique et électronique pour les sciences physiques)¹⁴ de classe de seconde générale des lycées a été réalisée sur l'association de résistors. Le travail a porté sur la construction de la séance (fondée sur l'utilisation du logiciel *CrocoClip*) devant amener les élèves à un travail de réflexion sur le plan des théories et modèles par confrontation de leurs connaissances de la loi d'Ohm et de leurs représentations de la « résistance électrique », le repérage des différentes activités ainsi planifiées, l'analyse des comptes rendus des élèves et celle de l'enregistrement vidéo du travail d'un binôme. Ont été également élaborées des séances de simulations avec le logiciel *Interactive Physique* en classes préparatoires scientifiques : séance portant sur la résolution numérique des équations différentielles, suivie de travaux dirigés sur les trajectoires, référentiels, oscillateurs en mécanique du point et du solide. L'expérimentation était construite dans le cadre de la recherche « Outils d'assistance et de coopération pour des formations en autonomie » du département Technologies nouvelles de l'INRP et visait le test de guides et d'aides mis à disposition des étudiants : aides sur le logiciel, sur les méthodes de résolution et sur les contenus de physique impliqués. Dans ce cadre, outre l'observation en séance des activités, les traces des appels d'aides informatiques ont été relevées grâce à un traceur *ad hoc* intégré au navigateur, ainsi que les comptes rendus des élèves. Enfin, deux séances ponctuelles ont été proposées à des étudiants volontaires inscrits en préparation au certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement secondaire (CAPES) de physique et chimie, pour évaluer l'intérêt et la faisabilité d'activités sur modèle avec les logiciels *Interactive physique*, *RayTrace* et *Electronics WorkBench*. L'élaboration d'exercices sous forme de questions de physique précises dont la résolution passait par la manipulation des logiciels ayant été effectuée *a priori*, l'expérimentation a consisté à noter, lors des séances en autonomie, les questions des étudiants en distinguant celles relatives à la physique générale, à la modélisation sur laquelle ils travaillaient, sur le logiciel spécifique utilisé et celles portant sur l'environnement bureautique. À l'issue des deux séances, un commentaire libre (oral) était demandé aux étudiants (futurs enseignants) quant à l'intérêt qu'ils avaient trouvé aux différents exercices.

En termes d'attitude, on a pu détecter une certaine réserve vis à vis

des activités qui étaient proposées. Chez certains étudiants interrogés, les activités n'avaient donné lieu à aucune représentation claire, ni de la tâche, ni du logiciel. Si la simulation n'est évidemment pas « la réalité » à leurs yeux, il ne s'agit pas non plus de « théorie », ce dernier terme renvoie, semble-t-il, plus aux équations et aux résolutions analytiques. Ceci est en cohérence avec l'observation faite régulièrement dans les séances de travail, où certains étudiants se placent dans « le faire » et « sur la surface », c'est-à-dire suivent au mieux les indications fournies et ne s'engagent pas dans une activité autonome nécessitant réflexion et prise de recul. Si nous voulons utiliser une formulation qui fait écho à l'utilisation croissante mais discutable de l'adjectif « virtuel » dans les propositions innovantes, nous dirions ici que « le virtuel prend malheureusement toute sa dimension ».

Sans doute en liaison avec le point précédent, les réponses aux questions posées aux élèves ou étudiants (en séance ou lors des entretiens) sur l'idée qu'ils ont du fonctionnement du logiciel montrent qu'ils pensent majoritairement que la solution de la question qui leur est posée est déjà programmée et donc que le modèle explicite est dans le logiciel (alors même qu'une séance de travaux dirigés avait été explicitement consacrée à une méthode numérique utilisée dans le logiciel). L'activité est donc d'abord perçue à l'image des activités de résolution d'exercices classiques (la solution est connue de l'auteur, les données sont « prévues pour », et il s'agit donc pour l'étudiant de montrer qu'il parvient à (re)trouver le résultat). Une activité d'investigation reposant sur la simulation de l'effet de forces (à partir de l'équation différentielle de la mécanique) peut ainsi n'avoir en réalité aucun sens particulier pour l'étudiant qui pense simplement que le logiciel fournit « la » solution. Ceci montre, d'une part, la nécessité de faire connaître le principe du logiciel utilisé (et plus généralement de la simulation) et, d'autre part, la difficulté d'une tâche « ouverte ». Notons que cette attitude par défaut des étudiants est également celle qui prévaut lors d'activités expérimentales où ceux-ci, contrairement à ce qui est parfois annoncé comme objectif, ne vérifient (évidemment) pas telle ou telle loi (du point de vue scientifique), mais « vérifient » tout au plus qu'ils arrivent à faire correctement la manipulation requise (Beney, 1998 ; Beney & Séré, 2001). Pour ce qui concerne plus spécifiquement la question des équations différentielles, des travaux antérieurs avaient montré la difficulté conceptuelle de la « résolution numérique » (Beaufils, 1992a) : la prégnance de l'analytique induit une association forte entre l'idée de « solution » et l'obtention d'une fonction explicite, et la présentation d'une méthode itérative sur des différences finies est considérée comme un « bricolage » non scientifique. Plus généralement, en l'absence d'information sur ce que fait le logiciel, les élèves et les étudiants s'en construisent une représentation, plus ou moins explicite, pour conduire leur tâche. Cette représentation peut être évidemment très sommaire voire

erronée. Ces éléments invitent très clairement à un travail spécifique sur ce que l'on pourrait dénommer les « conceptions initiales des étudiants sur les logiciels et leurs usages ».

Ajoutons ici pour terminer que, conséquence évidente des limites présentées ci-dessus, lorsque des élèves ou étudiants rencontrent une difficulté, un résultat imprévu, ils ne savent (peuvent) pas distinguer ce qui peut provenir d'un résultat logique du logiciel suite à une option mal choisie, d'une fausse manipulation, etc., ou d'un artefact lié à la résolution numérique (trajectoire elliptique qui ne se referme pas, droite qui s'incurve, énergie mécanique d'un système isolé qui augmente, etc.)

5. CONCLUSION : ENJEUX DIDACTIQUES ET CONDITIONS PÉDAGOGIQUES

L'intérêt des activités de simulation souvent présenté en premier est de même nature que celui des activités expérimentales sur paillasse : les élèves sont actifs, intellectuellement impliqués et, de ce fait, seraient mieux à même de mémoriser l'ensemble des informations qu'ils rencontrent. Si l'on adhère à cette hypothèse, il ne faut pas oublier que l'activité cognitive de mémorisation et de compréhension n'est pas pour autant automatique : en simulation, comme « sur paillasse », l'activité de l'élève ou de l'étudiant peut se trouver limitée au « faire », et l'implication intellectuelle doit être suscitée par une planification et un guidage spécifiques.

L'intérêt, selon nous, réside dans la possibilité de proposer des activités clairement centrées sur le monde des théories et des modèles. Mais nous avons montré que ceci impose une vigilance sur la construction des logiciels et des activités. Du point de vue de la conception d'activités didactiques, on peut schématiser la perspective en reprenant les trois plans de la simulation (figure 7) replacés sur l'arrière plan des théories et modèles (figure 9).

Ceci vise à indiquer qu'il faut veiller en particulier à concrétiser le lien constitutif de la simulation par l'explicitation du modèle utilisé et s'assurer que les étudiants en ont bien compris la nature et le mode de prise en compte dans le logiciel. Ceci rappelle également la nécessité d'explicitier le « plan du modèle informatisé », c'est-à-dire celui de la « mise en calculs » du modèle (à l'instar du « *glass-box model* » de Muray *et al.* (2001). Et si le jeu sur les représentations et les registres sémiotiques constitue également un enjeu didactique, il appartient aux concepteurs de logiciels de ne pas confondre des plans de représentation différents (ni de les multiplier sans discernement) et aux enseignants de travailler le jeu de cadres – au sens de la

didactique des mathématiques – qui seul peut contribuer à une meilleure compréhension des connaissances mise en jeu¹⁵. Rappelons à ce sujet la nécessité d'éviter l'écueil de la multiplicité des représentations graphiques : de nombreuses études touchant à l'ergonomie cognitive des environnements informatiques, ou portant sur des questions plus générales de mise en œuvre de registres sémiotiques, montrent que le jeu des représentations multiples (*multiple external representations, MERs*) ne permet pas, loin de là, une amélioration des apprentissages chez les élèves et les étudiants (Duval, 1995 ; Ainsworth, 1999).

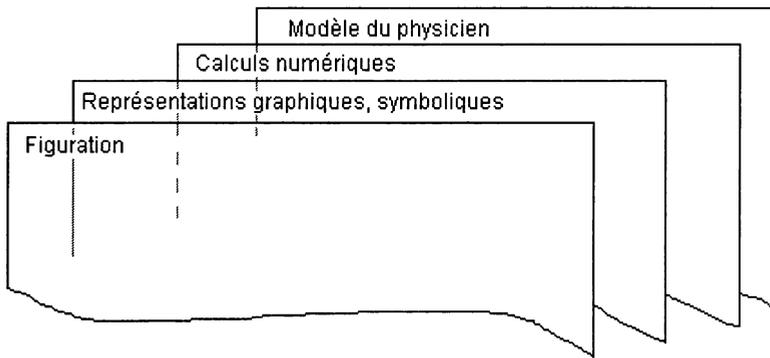


Figure 9 • Jeu de perspective des différents plans, le passage de l'un à l'autre, voire leur « transparence » ne doit pas amener à les confondre. Et suivant le logiciel, les points d'entrée et d'action sur le simulateur ne seront pas situés sur le même plan

Enfin, nos premiers constats tendent à montrer que l'effet de la simulation sur les apprentissages notionnels n'est positif que si l'élève ou l'étudiant possède déjà un jeu de connaissances scientifiques suffisant. Un tel jeu de connaissances constitue les prérequis habituels à toute activité, y compris expérimentale, mais s'étend dans le cas de la simulation jusqu'à une première connaissance du modèle à la base du simulateur : on ne comprend bien les actions et leurs effets que si l'on a déjà construit une représentation du modèle en jeu. Ce dernier point est essentiel dans la conception des activités et du guidage associé, point qui fait l'objet de la suite de notre travail de recherche.

NOTES

1. Un texte a toutefois été rédigé en 2002 par le groupe d'experts des programmes scolaires comme document d'accompagnement des programmes de la classe de terminale S.

2. <http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimpl/Introsim.htm>

3. Sachant que le monde « réel » du physicien est dépendant de ses connaissances théoriques.

4. L'existence d'un « savoir sans sujet connaissant » et donc d'un « troisième monde » a été affirmée par Frege et par Popper, par exemple (Clavier, 2000, pp. 147-157).

5. Nous distinguons « le savoir » de « connaissance » : le premier désigne un contenu public et objectif, le second ce qui est attaché à l'individu. Cette distinction et ces valeurs sémantiques diffèrent suivant les auteurs ; M. Linard (2001) distingue, par exemple, information, savoirs, savoir et connaissance.

6. <http://www.cnam.fr/instituts/evariste/>

7. Différents travaux ont montré la difficulté d'une transposition externe prenant en références les pratiques scientifiques (Durey, 1989 ; Beaufils, 1993 ; Guillon, 1995 ; Ayçaguer-Richoux, 2000).

8. Nous jouons ici sur le terme objet qui désigne tout à la fois l'objet réel pris en référence (le condensateur par exemple) et l'objet informatique (logiciels orientés objets). Nous pourrions également lever chaque fois l'ambiguïté en ajoutant l'adjectif « virtuel » ; mais le terme ne nous semble pas mieux défini.

9. Nous distinguons « théorie » et « modèle » : le second désigne la représentation ou l'interprétation du comportement d'un système précis et ce dans le champ du premier (« modèle du pendule simple » et « théorie newtonienne »).

10. Une image colorée de ballon de football peut être utilisée alors que le modèle ne repose que sur le modèle du point matériel.

11. « L'université en ligne » comporte ainsi un mode d'activité « simulation ».

12. Ceci est à rapprocher de la représentation en quatre couches dans la séquence de modélisation selon Fuchs (1997, consultation 2003).

13. Pour d'autres logiciels la proximité des deux plans est encore plus grande puisque la symbolique utilisée est explicitement celle des opérations de calcul à effectuer (multiplicateur, dérivateur, intégrateur, sommateur, etc.).

14. Désormais remplacée par MPI (Mesures Physiques et Informatique).

15. Nous retrouvons ici la remarque correspondante sur la question de « l'étanchéité » des espaces « modèle » et « représentation » soulignée par Guéraud *et al.* (1999).

BIBLIOGRAPHIE

AINSWORTH S. (1999). The functions of multiple representations. *Computers and Education*, vol. 33, n° 2/3, pp. 131-152.

AYÇAGUER-RICHOUX H. (2000). *Rôles des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au lycée*. Thèse, université Paris 7.

BEAUFILS D. (1992a). Construction d'activités scientifiques en classe de lycée : à propos de l'ordinateur outil de laboratoire. In *Actes du colloque Recherches en didactique des disciplines : contribution à la formation des maîtres*. Paris, INRP, pp. 183-199.

BEAUFILS D. (1992b). La simulation numérique comme élément d'une démarche expérimentale. In G.-L. Baron & J. Baudé (Éds), *L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*. Paris, INRP-EPI, pp. 100-103.

BEAUFILS D. (1993). L'ordinateur outil d'investigation scientifique au lycée : propositions et implications didactiques. *Didaskalia*, n° 1, pp. 123-130.

BEAUFILS D. (1999). Quelques éléments de réflexion à propos des exercices à caractère expérimental. In *Diversification de l'évaluation en sciences expérimentales*. Caen, CRDP de Basse-Normandie, pp. 101-116.

BEAUFILS D. (2000a). Les logiciels de simulation comme supports de registres de représentation pour les apprentissages en physique. In *L'apprentissage : une approche transdisciplinaire, Actes des Journées internationales d'Orsay sur les sciences cognitives (JIOSC)*. Orsay, université Paris-Sud – ISCC, pp. 101-104.

BEAUFILS D. (2000b). Des logiciels de simulation pour modéliser et expérimenter sur modèle : quels enjeux pour les apprentissages ? In *Premier séminaire national TICE et Sciences physiques*. Fichier : <http://www.aquitaine.iufm.fr/fr/14-actualite/01-seminaires/03-scphy/>.

BEAUFILS D., DUREY A. & JOURNEAUX R. (1987a). La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : quelles simulations ? In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éds), *Modèles et simulation, Actes des 9^e journées sur l'éducation scientifique*. Paris, université Paris 7, pp. 321-328.

BEAUFILS D., DUREY A. & JOURNEAUX R. (1987b). La simulation sur ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques ; quelques aspects didactiques. In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éds), *Modèles et simulation, Actes des 9^e journées sur l'éducation scientifique*. Paris, université Paris 7, pp. 507-514.

BENEY M. (1998). *Contribution à l'analyse des phases manipulatoires des travaux pratiques de physique en premier cycle universitaire. Les apprentissages possibles à travers la conduite de l'action*. Thèse, université Paris 11.

BENEY M. & SÉRÉ M.-G. (2001). Entre réussir et comprendre ou de l'effet des consignes opératoires sur la compréhension des procédures de mesurage en TP de physique de premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 19, pp. 9-37.

- BLONDEL F.-M. & SCHWOB M. (1985). Étude des utilisations de l'informatique dans l'enseignement des sciences physiques. *Revue française de pédagogie*, n° 72, pp. 5-11.
- BORK A. & PECKHAM H. (1979). Computer applications in mechanics. *Computer & Education*, vol. 3, pp. 145-157.
- BRENASIN J. & WEIL-BARAIS A. (1994). *Étude de l'impact de l'utilisation d'outils informatiques par les élèves en sciences physiques*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- BUTY C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, université Lyon 2 (<http://theses.univ-lyon2.fr/Theses2000/buty-c/these-front.html>).
- CLAVIER P. (2000). *Le concept de monde*. Paris, PUF.
- DE JONG T. & VAN JOOLINGEN W.R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, vol. 68, n° 2, pp. 179-201.
- DUREY A. (1989). Vers des activités didactiques de mise au point de modèles de physique avec des micro-ordinateurs. *Aster*, n° 8, pp. 161-185.
- DUREY A., LAURENT M. & JOURNEAUX R. (1983). Avec des micro-ordinateurs faire de la physique d'abord. *Bulletin de l'Union des physiciens*, n° 652, pp. 757-780.
- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Paris, Peter Lang.
- FUCHS H. (1997). *The continuum Physics Paradigm in physics instruction II. System dynamics modeling of physical processes*. Fichier (consultation 2003) : <http://home.zhwin.ch/~fuh/MATERIALS/PPP-II.pdf>
- GUÉRAUD V., PERNIN J.-P., CAGNAT J.-M. & CORTÈS G. (1999). Environnements d'apprentissage basés sur la simulation. *Sciences et Techniques Éducatives*, vol. 6, n° 1, pp. 98-141.
- GUILLON A. (1995). Démarches scientifiques en travaux pratiques de physique de DEUG à l'université Cergy-Pontoise. *Didaskalia*, n° 7, pp. 113-127.
- HENNESSY S., TWIGGER D., DRIVER R., O'SHEA T., O'MALLEY C.-E., BYARD M., DRAPER S.-W., HARTLEY R., MALLEEN C., MOHAMED R. & SCANLON E. (1995 a). Design of a computer-augmented curriculum for mechanics. *International journal of science education*, vol. 17, n° 1, pp. 75-92.
- HENNESSY S., TWIGGER D., DRIVER R., O'SHEA T., O'MALLEY C.-E., BYARD M., DRAPER S.-W., HARTLEY R., MALLEEN C., MOHAMED R. & SCANLON E. (1995b). A classroom intervention using a computer-augmented curriculum for mechanics. *International journal of science education*, vol. 17, n° 2, pp. 189-206.
- HEWSON P. (1985). Diagnosis and remediation of an alternative conception of velocity using a microcomputer program. *American journal of physics*, vol. 53, n° 7, pp. 684-690.
- HUCKE L. & FISHER H. (2002). The link of theory and practice in traditional and in computer-based university laboratory experiments. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching and learning in the science laboratory*. Dordrecht, Kluwer, pp. 205-218.
- INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE PÉDAGOGIQUE (1983). *Impact de l'introduction de l'informatique sur les disciplines scientifiques dans l'enseignement secondaire en France*. Paris, INRP.
- INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE PÉDAGOGIQUE & UNION DES PHYSICIENS (1998). *Actes des 8^e Journées nationales informatique et pédagogie des sciences physiques*. Paris. Udp-INRP.
- JIMOYIANNIS A. & KOMIS V. (2001). Computer simulations in physics teaching and learning : a case study on students' understanding of trajectory motion. *Computers & Education*, n° 36, pp. 183-204.

- JOUBERT R. & REBMANN G. (1998). L'atelier-schéma d'optique géométrique : un micro-monde et son environnement d'apprentissage. In *Actes des 8^e Journées nationales informatiques et pédagogie des sciences physiques*. Paris, UdP-INRP, pp. 183-186.
- JOUBERT R., REBMANN G. & DESMOND P. (2000). Integration of computer simulation programs in teaching sequences of Newtonian mechanics for freshmen at university. In R. Pinto & S. Surinach (Éds), *Actes International Conference, Physics Teacher Education beyond 2000-PHYTEB*. Barcelone, UAB, Cd Production.
- KOMIS V., DIMITRACOPOULOU A. & POLITIS P. (1998). Contribution à la conception et au développement d'un environnement informatique de modélisation. In J.-F. Rouet & B. De La Passardiere (Éds), *Quatrième colloque Hypermédiat et Apprentissage*. Paris, EPI-INRP, pp. 263-267.
- KOWALSKI L. (1985). A comment about the definition of simulation. *Journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, pp. 50-51.
- LINARD M. (2001). Concevoir des environnements pour apprendre : l'activité humaine, cadre organisateur de l'interactivité technique. *Science et techniques éducatives, interaction homme-machine pour la formation et l'apprentissage humain*, vol. 8, n° 3-4, pp. 211-238.
- MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (2000). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : espace de réalité. *Didaskalia*, n° 16, pp. 81-106.
- MALAFOSSE D., LEROUGE A. & DUSSEAU J.-M. (2001). Étude en inter-didactique des mathématiques et de la physique de l'acquisition de la loi d'Ohm au collège : changement de cadre de rationalité. *Didaskalia*, n° 18, pp. 61-98.
- MARTINAND J.-L. (Éd.) (1992). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- MARTINAND J.-L. (1998). Introduction à la modélisation. In *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, actes de l'université d'été*, Cachan, INRP-ENS Cachan, <http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Univete/Tic/Pdf/Modelisa.pdf>.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE (1998). *Physique chimie : intégration d'outils informatiques dans l'enseignement des disciplines*. Caen, CRDP de Basse-Normandie.
- MÉHEUT M., (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège, Questionnement et simulation. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- MILLAR R., LE MARÉCHAL J.-F. & TIBERGHEN A. (1999). Mapping the domain – variety of practical work. In J. Leach & A. Paulsen (Éds), *Practical work in science education – recent research studies*. Denmark, Roskilde University Press, pp. 33-59.
- MOORE J.L. & THOMAS H. (1983). Computer simulation of experiments : a valuable alternative to traditional laboratory work for secondary school science teaching. *School Science Review*, vol. 64, n° 229, pp. 641-655.
- MURRAY T., WINSHIP L., BELLIN R. & CORNELL M. (2001). Toward Glass Box Educational Simulations : Reifying Models for Inspection and Design. In *AI-ED 2001 Workshop, External Representations in AIED : Multiple Forms and Multiple Roles, San Antonio, Texas*. Fichier <http://www.psychology.nottingham.ac.uk/research/credit/AIED-ER/murray.pdf>.
- NIEDDERER H., SCHECKER H. & BETHGE T. (1991). The role of computer aided modelling in learning physics. *Journal of Computer assisted learning*, n° 7, pp. 84-95.
- NJOO M. & DE JONG T. (1993). Exploratory learning with a computer simulation for control theory : learning process and instructional support. *Journal of Research in Science Teaching*, vol. 30, n° 8, pp. 821-844.

- NONNON P. (1986). *Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur*. Montréal, université de Montréal.
- OSBORNE R.J. & GILBERT J.K. (1980). The Use of Models in Science Teaching. *The School and Science Review*, n° 62, pp. 57-67.
- OGBORN J. (1983). A microcomputer modelling system and the teaching of problem structure. In *Actes du premier atelier international de recherche en didactique de la physique, La Londe Les Maures*. Paris, CNRS, pp. 441-444.
- REBMANN G. (2000). Intégration de simulations dans l'enseignement de la physique en première année de DEUG. In *Journée de rencontre « Recherches sur l'enseignement scientifique supérieur et TICE »*. Orsay, université Paris 11. Fichier : <http://www.u-psud.fr/sitesiecle.nsf/res24!OpenPage#>.
- RICHOUX B., SALVETAT C. & BEAUFILS D. (2002). Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 842, pp. 497-522.
- ROBSON K. & WONG D. (1985). Teaching and learning with the Dynamical Modelling System. *School Science Review*, June 85, pp. 682-695.
- RONEN M. & ELIAHU M. (2000). Simulation – a bridge between theory and reality : the case of electric circuits. *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 16, n° 1, pp.14-26.
- SANDER F., SCHECKER H. & NIEDDERER H. (2002). Computer tools in the Lab – their effect on linking theory and experiment. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching and learning in the science laboratory*. Dordrecht, Kluwer, pp. 219-230.
- SCHECKER H. (1993a). Learning physics by making models. *Physics Education*, vol. 28, n° 2, pp. 102-106.
- SCHECKER H. (1993b). The didactic potential of computer aided modeling for physics education. In D.L. Ferguson (Éd.), *Advanced educational technologies for mathematics and science*. Berlin, Springer, pp. 165-208.
- SÉJOURNÉ A. & TIBERGHEN A. (2001). Conception d'un hypermédia en physique et étude des activités des élèves du point de vue de l'apprentissage. In E. de Vries, J.-P. Pernin & J.-P. Peyrin (Éds), *Actes du 5^e colloque Hypermédiat et apprentissages*. Paris, INRP et IHSA, pp. 103-118.
- TIBERGHEN A. (1999). Labwork activity and learning physics – an approach based on modelling. In J. Leach & A. Paulsen (Éds), *Practical Work in Science Education*. Denmark, Roskilde University Press, pp. 176-194.
- UNION DES PHYSICIENS (1998). *De nouveaux outils supports de modélisation et de simulation : Interactive Physique et Stella, brochure UdP, Journées Informatique et pédagogie des sciences physiques*. Paris, UDP.
- VENTURINI P. (1997). *Conception et évaluation d'une base de données hypermédia. Révision du programme de la classe de Seconde*. Thèse, université de Toulouse III.
- VINCE J. (2000). *Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de Seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse, université Lyon 2.
- VOSNIADOU S., IOANNIDES C., DIMITRAKOPOULOU A. & PAPADEMETRIOU E. (2001). Designing learning environments to promote conceptual change in science. *Learning and Instruction*, vol. 11, n° 4-5, pp. 381- 419.

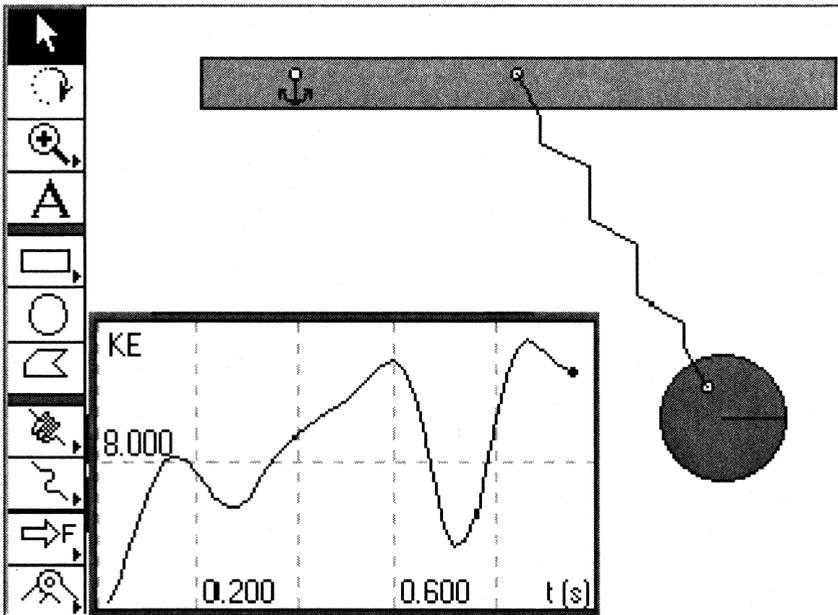
ANNEXE

Présentation de quatre logiciels cités

Interactive Physique

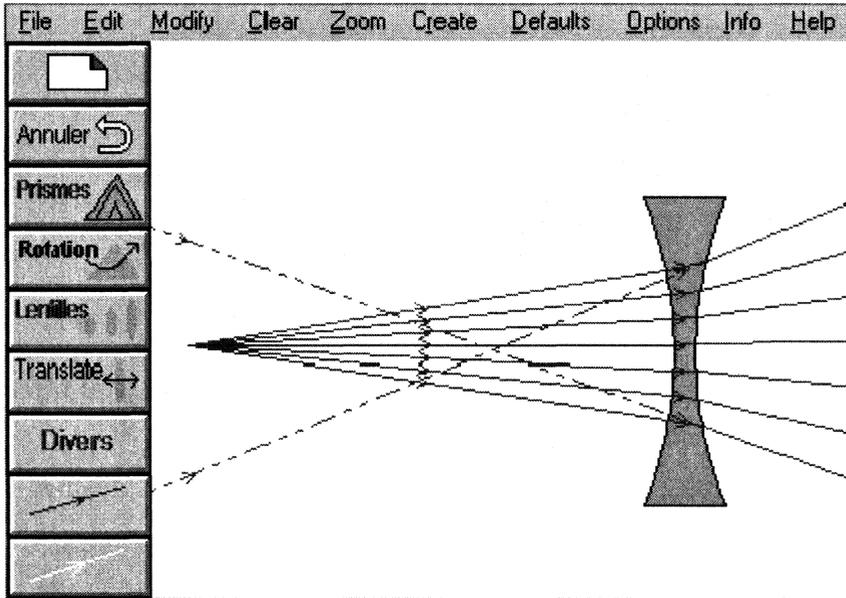
Logiciel de simulation de mécanique newtonienne fondé sur l'assemblage de représentations figuratives d'objets physiques (masse, ressort, liaison, etc.) affectés de propriétés.

L'évolution du système peut être suivie par chronophotographies, par les flèches représentatives de vecteurs ou par le graphique des variations de grandeurs physiques.

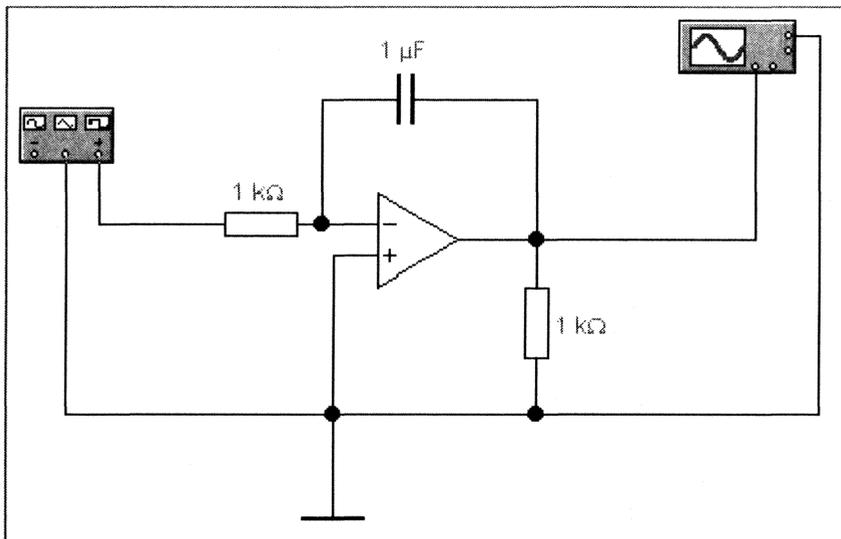


Ray Trace

Ray Trace est un logiciel de simulation d'optique géométrique fondé sur le tracé automatique de rayons (*ray tracing*). On peut y placer des sources, des dioptries, des lentilles, des miroirs, des écrans, etc.



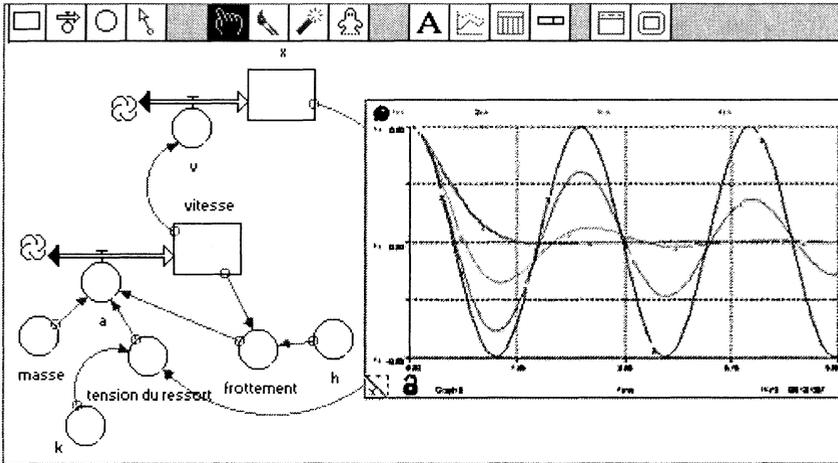
Electronics WorkBench



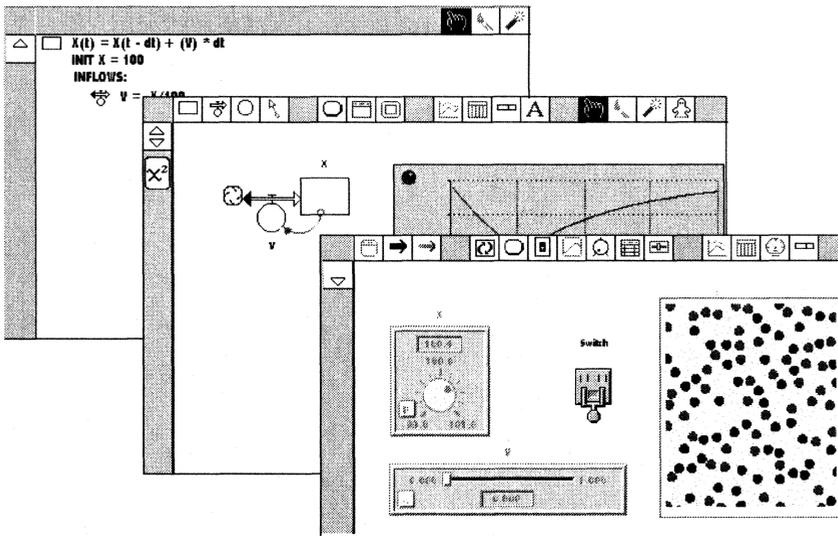
Logiciel professionnel de simulation de circuits électriques et électroniques, EWB permet de réaliser les circuits de son choix par assemblage des différents composants.

Des instruments tels que ampèremètre, voltmètre, oscilloscope et générateur de signaux (GBF) sont également utilisables.

Stella/IThink



Logiciels de simulation généraux permettant la création de modèles à partir de relations physico-mathématiques entre grandeurs. La construction des modèles se fait par manipulation de représentations symboliques génériques.



IThink : Les 3 « niveaux » du logiciel

Fonctionnant à un niveau abstrait, ils permettent de traiter de façon équivalente des systèmes mécaniques, électriques, etc.

RayTrace :

<http://www.ozemail.com.au/~imesoft/index.html>
et <http://www.ibv-thinfilms.de/imindexe.htm> ;
<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Acts simul/RT2.htm>

Stella/IThink : logiciels distribués par KBS (Paris). Voir aussi :

http://www.hps-inc.com/Education/new_Stella.htm,
<http://mapage.noos.fr/kbs/stella.htm>,
<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Acts simul/Stella2.htm>,
<http://mapage.noos.fr/kbs/ithink.htm>,
http://www.hps-inc.com/Business/New_ithink.htm

Interactive Physique : distribué par Biolab-Phylab (Paris). De nombreux sites académiques présentent des utilisations du logiciel, voir par exemple : <http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/ip/ip.html>. Voir également : <http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Acts simul/IP2.htm>.

Electronic WorkBench (EWB) : logiciel de Interactive Image Technologies (<http://www.interactiv.com>), distribué par Isti (France : <http://www.istica.com/workb.htm>).

Cet article a été reçu le 17 juillet 2001 et accepté le 11 février 2002.

Richesses et limites d'un « modèle matérialisé » informatisé en optique géométrique

Wealth and limits of a computer-based « materialised model » in geometrical optics

Christian BUTY

UMR ICAR – équipe COAST, CNRS-INRP-Université Lyon II
ENS LSH
15, parvis René-Descartes
69342 Lyon cedex 07, France.

Résumé

D'une part l'article décrit l'incorporation d'un modèle matérialisé informatisé dans une séquence d'enseignement en optique géométrique, et les hypothèses d'apprentissage qui le fondent, d'autre part il rend compte de l'analyse de l'activité des élèves utilisant ce modèle dans une classe réelle de Terminale. Il en ressort indubitablement que cet outil favorise la construction de sens et les processus de modélisation, et que ces effets positifs sont liés à ses conditions d'utilisation et notamment à l'intervention de l'enseignant.

Mots clés : *modélisation, TICE, activités prédictives, optique géométrique, milieu didactique.*

Abstract

The paper shows first how a computer-based materialised model can be implemented in a teaching-learning sequence in geometrical optics. Then it gives results from the analysis of the students activity when using this materialised model in a real class in the last level of upper secondary school. The conclusion is certainly that this tool facilitates the meaning construction and modeling processes, but that this positive effect is related to its conditions of use and in particular to the teacher intervention.

Key words : modeling, ICT, predictions, geometrical optics, learning environment.

Le développement et la banalisation dans les classes des Technologies de l'Information et de la Communication appliquées à l'Enseignement (TICE) exigent des didacticiens, en particulier de la physique, de produire un cadre théorique pour appréhender et conduire les phénomènes didactiques qui accompagnent cet usage des TICE. Le travail réalisé a pour objectif, dans un contexte particulier et limité, de fournir des éléments pour la construction de ce cadre et pour l'analyse des activités des élèves lorsqu'ils se servent de telles technologies. L'article se base sur l'analyse du déroulement d'une séquence d'enseignement en optique géométrique, en classe de Terminale (enseignement de spécialité Sciences Physiques¹), où intervenaient des simulations informatiques. Cette séquence, construite *ad hoc* dans une collaboration entre des enseignants du secondaire et le chercheur, comprend quinze « situations », et s'étend sur huit séances de deux heures de cours-TP, à raison d'une séance par semaine.

1. NOTRE CADRE THÉORIQUE : DEUX MONDES POUR ENSEIGNER ET APPRENDRE LA PHYSIQUE

1.1. Les processus de modélisation en didactique des sciences

Sinaceur décrit bien la suite de sens différents qu'a pris le mot « modèle » au cours de l'histoire des sciences : depuis le sens originel et très concret de *maquette* architecturale, un modèle a toujours assumé « *une fonction heuristique dans le processus de connaissance théorique ou technique* » (Sinaceur, 1999, p. 649). Par conséquent, qu'il soit « matérialisé » ou non, le modèle n'est pas censé « *reproduire fidèlement un*

phénomène, mais au contraire le simplifié[r] suffisamment pour pouvoir l'analyser, l'expliquer... et en prédire... la répétition » (*ibid.*, p. 649). Un modèle présente inévitablement une « *double face abstraite-concrète [qui] le rend apte à remplir le double rôle d'illustration et de support de preuve d'une part, de paradigme et de support d'analogies d'autre part* » (*ibid.*, p. 651).

Il serait surprenant que l'usage du terme modèle dans l'étude de l'enseignement scientifique diminue sa polysémie intrinsèque : au contraire on doit intégrer de nouvelles significations, issues des points de vue différents des personnages de la scène éducative. Ainsi Gobert & Buckley (2000), comme Gilbert & Boulter (1998), distinguent-elles les *modèles mentaux*, représentations internes et individuelles du système ou du phénomène modélisé, et les *modèles exprimés*, figurations externes dudit système par un moyen quelconque, dessin, discours ou maquette ; parmi les modèles exprimés, les *modèles-consensus* font l'objet d'un accord dans un groupe donné de scientifiques ou d'apprenants, et les *modèles d'enseignement* sont destinés à faire comprendre, dans un contexte scolaire, tel ou tel phénomène ou théorie scientifique.

Parmi ces modèles d'enseignement, Harrison & Treagust (2000) distinguent plusieurs catégories, et pointent deux problèmes importants :

- beaucoup de concepts scientifiques mettent en jeu des processus et non des objets ; l'exemple que prennent les auteurs est l'équilibre chimique, mais on peut en dire autant de la formation des images optiques. C'est une source de difficultés pour les apprenants, si l'explicitation de ce caractère de processus n'est pas prise en compte dans l'enseignement ;

- les simulations dynamiques (notamment informatisées), qui peuvent articuler plusieurs types de modèles, permettent de modéliser des phénomènes aussi complexes que le réchauffement de la planète ou les fluctuations d'une population d'insectes ; mais le revers de la médaille est qu'elles peuvent très facilement être confondues avec la réalité par l'utilisateur.

Il reste que, selon les termes de Harrison & Treagust, « *la modélisation est l'essence de la pensée et du travail scientifique* » (*ibid.*, p. 1011).

1.2. Le cadre théorique des deux mondes

Notre cadre théorique général, qui déborde largement le cas des simulations informatiques, résulte de trois choix fondamentaux :

- 1 Désigner les processus de modélisation comme moteur principal du fonctionnement de la physique comme discipline d'enseignement ;

– 2 Donner la priorité au point de vue de l'apprenant dans l'analyse des phénomènes didactiques ;

– 3 Assumer l'hypothèse que le fonctionnement cognitif de l'apprenant peut s'apprécier en termes de processus de modélisation.

Autrement dit, l'objectif de ce cadre théorique (que l'on appellera « des deux mondes », ou « des niveaux de savoir ») est de donner des outils d'analyse à la fois du fonctionnement de la physique enseignée (le contenu des séquences d'enseignement entre autres) et de l'activité cognitive des élèves quand ils sont en classe de physique, par le biais, entre autres, de leurs verbalisations.

Mettre en application ce cadre théorique consiste à classer les connaissances contenues dans un texte, ou les productions langagières des acteurs, en deux catégories : celles qui réfèrent au monde des théories et des modèles, celles qui réfèrent au monde des objets et des événements.

Depuis l'article *princeps* de Tiberghien (1994), ces choix fondamentaux ont nourri un certain nombre de travaux de recherche dans des domaines divers de la physique ou de la chimie : Bécu-Robinault, 1997a ; Guillaud, 1998 ; Quintana-Robles, 1997 ; Séjourné, 2001 ; Vince, 2000.

1.2.1. Le monde des théories et des modèles

Une théorie physique est une totalité articulée de concepts ; chaque concept est défini (Vergnaud, 1990) par ses relations avec les autres concepts de son champ, par un ensemble de situations de références où il s'applique, par un signifiant distinctif, par un ensemble de situations de validation (Balacheff, 1987). Un aspect important d'une théorie, qui lui assure sa cohérence interne, est d'être produite par un débat scientifique collectif et public.

En ce qui concerne les élèves, le terme « théorie-modèle » ne se réduit évidemment pas à des connaissances ni à des relations entre elles, compatibles avec les théories de la physique. Le cadre théorique des deux mondes (c'est la conséquence du troisième choix ci-dessus) considère en effet que les élèves fonctionnent, en classe de physique, en utilisant des éléments de nature théorique, c'est-à-dire possédant une certaine généralité et un pouvoir explicatif ; ces éléments sont souvent issus de la vie quotidienne du sujet. Les conceptions classiquement répertoriées par la didactique de la physique font partie de ces éléments « théoriques ». Autre différence importante avec les théories physiques : le caractère le plus souvent individuel de la théorie employée par l'élève, qui n'assure pas que les outils explicatifs que celui-ci utilisera dans deux situations différentes seront cohérents entre eux ; un travail récent (Redfors & Ryder, 2001) montre

au contraire comment les modèles utilisés par l'élève peuvent varier d'une situation à l'autre.

1.2.2. Le monde des objets et des événements

L'autre pôle de l'analyse est l'ensemble des connaissances ou énoncés qui réfèrent aux objets du monde réel et aux événements qui s'y déroulent. Bien entendu ces connaissances, ces énoncés, sont produits par une théorie (le sens commun dans le cas d'un individu, en général) sous-jacente et souvent implicite : la simple dénomination d'un objet lui assigne une place dans une théorie, si peu élaborée soit-elle ; Chalmers (1982) explicite la théorie cachée derrière un énoncé du type « *le vent pousse le landau vers la falaise* ».

L'histoire de la physique fourmille de tels exemples : Aristote ne voit pas le monde comme Galilée, lequel ne voit pas le monde comme Newton, parce qu'ils n'ont pas les mêmes systèmes explicatifs du mouvement et de ce qui le cause (Kuhn, 1970).

Du côté de l'individu apprenant un phénomène analogue se produit. Dans un dispositif expérimental, l'élève ne voit pas les mêmes éléments que l'enseignant, et ne fait pas les mêmes relations événementielles entre eux, parce qu'il ne les interprète pas avec la même théorie. Pour reprendre et extrapoler un autre exemple de Chalmers (1982), alors que l'enseignant décrit une expérience donnée par l'énoncé « *le faisceau d'électrons est repoussé par le pôle magnétique de l'aimant* », l'élève pourra décrire la même expérience par l'énoncé « *quand j'approche l'aimant, la courbe bleue est déformée et une partie disparaît* ».

Le corollaire de ces considérations définissant le « monde des objets et des événements » est qu'il n'importe pas pour l'étude des phénomènes d'apprentissage que la réalité matérielle à laquelle on fait référence soit une réalité naturelle (l'arc-en-ciel) ou technologique (un appareil photographique) ou une expérience de classe (le banc d'optique). L'expert en physique verra des différences fondamentales entre ces situations, et pourra énoncer que l'expérience de cours est une théorie réifiée, et non la réalité naturelle. Mais pour l'élève en situation de classe, travailler sur un phénomène naturel, un dispositif technologique, un montage didactique, sont des situations analogues : il s'agit toujours d'une réalité perceptible, qu'il interprète en fonction de son système explicatif préexistant, et sur laquelle on lui assigne un certain nombre de tâches qui visent à lui faire produire une réponse conforme à ce que l'enseignant attend.

Par ailleurs cela signifie nécessairement que le classement d'un énoncé dans tel ou tel monde est relatif au processus d'enseignement-

apprentissage en cours, car le même mot peut jouer un rôle théorique ou un rôle de référence empirique. Par exemple, un élève en train de construire le concept de réfraction, comme classe d'événements se déroulant dans des circonstances analogues, pourra utiliser le terme « réfraction » comme référence théorique ; alors qu'on classera peut-être un énoncé d'un autre élève (qui a déjà construit le concept de réfraction) comportant ce terme, comme une référence à un événement particulier se déroulant en un endroit particulier de son dispositif expérimental. Par conséquent, pour classer de façon certaine un énoncé dans telle ou telle catégorie, une connaissance du contexte dans lequel il a été émis est nécessaire ; il faut donc prendre en considération une certaine durée des interactions.

1.2.3. Construire le sens des concepts de la physique

Nous considérons que c'est la mise en relation des deux mondes (voir figure 1) qui, pour les élèves, pose le problème essentiel de l'apprentissage de la physique : de nombreuses études ont montré que les élèves pouvaient manipuler des formules traduisant des relations entre grandeurs physiques du modèle sans leur donner aucun correspondant pratique, ou au contraire qu'ils pouvaient mener à bien des manipulations sans jamais traduire ce qu'ils faisaient en termes de théorie physique ; c'est une critique classique adressée aux activités traditionnelles de travaux pratiques (Lunetta, 1998 ; Séré & Beney, 1997). D'autres études (Bécu-Robinault, 1997a, 1997b ; Pateyron, 1997) ont montré que dans ces activités traditionnelles les élèves avaient tendance à rester dans le même monde et à éviter les mises en relation.

2. PROBLÉMATIQUE ADOPTÉE DANS L'ÉTUDE

Si l'on considère que la mise en relation des deux mondes est à la fois primordiale et difficile, il est naturel de faire porter sur elle l'effort principal de l'enseignement. Plusieurs possibilités s'offrent, qui ne sont évidemment pas exclusives. La priorité donnée aux processus de modélisation doit transparaître dans le discours de l'enseignant et dans les tâches demandées aux élèves. Elle peut aussi se traduire dans les ressources mises à disposition des élèves pour accomplir ces tâches. C'est le chemin qui a été suivi dans notre travail.

Pour faciliter aux élèves le passage entre les deux mondes, nous avons choisi de leur fournir un intermédiaire, que nous appelons « *modèle matérialisé* », qui soit à la fois :

– une figuration du *modèle* de la physique, conforme aux lois qu'on souhaite voir acquérir ;

– une figuration *matérialisée* au sens où c'est une réalité perceptible et où les élèves peuvent agir sur elle.

La double nature du modèle matérialisé peut se représenter par la figure 1 ci-dessous.

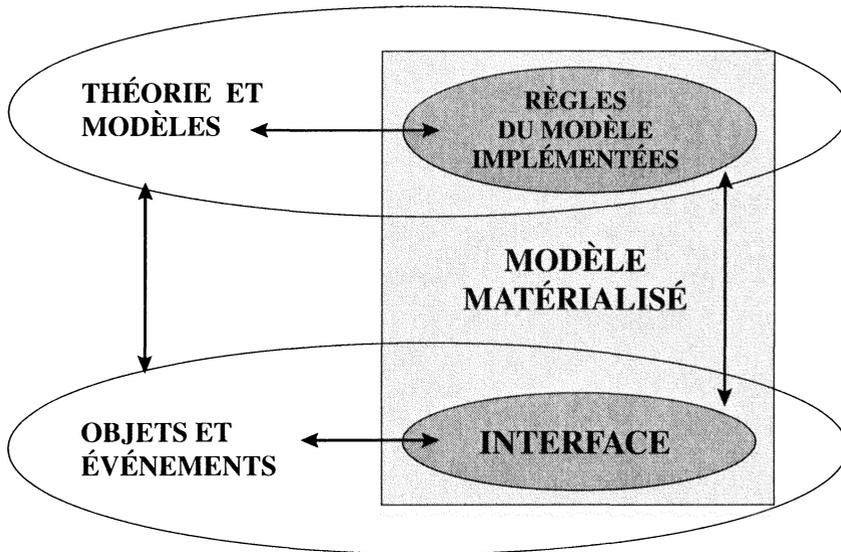


Figure 1 • L'intervention d'un modèle matérialisé

De façon générale, un modèle matérialisé doit comporter une interface qui fournit des informations à l'apprenant et est son moyen d'action sur la figuration du modèle ; il doit également fonctionner dans une certaine mesure conformément aux règles du modèle physique qu'on souhaite voir mettre en œuvre.

Fournir cette ressource à l'apprenant a pour but de lui apporter une aide sur trois plans (Mouloud, 1985) :

- sur le plan de la compréhension, grâce à la clarté de figuration qu'il peut trouver dans des schémas ou dans une maquette ;
- sur le plan de la recherche de solutions aux problèmes qu'on lui a posés, grâce à la puissance d'analogie du modèle ;
- sur le plan de la preuve qu'il apporte de ses assertions, « *qui trouve dans l'objectivité des modèles une part de ses garanties* » (Mouloud, 1985, p. 413).

Notons un effet secondaire (au sens chronologique) mais important de cet usage d'un modèle matérialisé : on peut faire l'hypothèse que les

élèves ont plus de chance de devenir conscients du statut de modèle de cette figuration parce qu'elle est incarnée dans une réalité tangible, parce qu'elle cesse de n'exister que dans leur esprit.

2.1. Des cas de modèles matérialisés dans d'autres domaines

Nous étudions ici trois travaux empiriques où le terme « modèle matérialisé » est explicitement utilisé par les auteurs pour désigner tout ou partie de leur dispositif.

Quintana-Robles (1997) analyse l'influence sur l'apprentissage réalisé par les élèves d'une simulation filmée du modèle particulaire et de la détente des gaz. Elle définit le modèle matérialisé comme

« *un groupement de correspondances analogiques entre un objet théorique et un objet fabriqué... Le modèle matérialisé est plus facilement manipulable que l'objet étudié, dans notre cas le modèle particulaire. En effet, grâce à son fonctionnement et au jeu des opérations qu'il permet, il conduit à l'obtention de résultats applicables à l'objet [théorique] étudié* » (Quintana-Robles, 1997, p. 27).

Dans ce cas, le dispositif de simulation consiste en une table à coussin d'air sur laquelle flotte une population d'aimants cylindriques représentant les particules d'un gaz. Le film présente en parallèle des expériences réalisées sur une masse de gaz (détentes, etc.) et les expériences correspondantes réalisées sur la population d'aimants. Les consignes demandent aux élèves d'interpréter ce qu'ils voient dans le film.

Robardet *et al.* (1999) ont proposé un modèle matérialisé pour l'étude, en classe de seconde de la propagation des sons. Envisageant la propagation unidirectionnelle d'une onde sonore à travers un gaz, ils ont découpé le volume de gaz en tranches d'épaisseur limitée, perpendiculaires à la direction de propagation, et associé à chaque tranche une boule indéformable de masse m ; cette boule, représentant l'inertie de la tranche d'air, est reliée à la précédente et à la suivante par des ressorts de raideur k , qui traduisent la rigidité du milieu vis à vis des perturbations de pression. Ils ont ainsi constitué ce qu'ils appellent un *modèle théorique* du milieu de propagation du son, qui est mécaniste, constitué d'une suite de boules et de ressorts.

À ce « modèle théorique » les auteurs ont associé un *modèle matérialisé*, « à visée didactique », constitué de petits chariots en Lego Techniques reliés par des ressorts identiques mobiles sur une gouttière en plastique et fixés aux deux extrémités de la chaîne qu'ils forment. La propa-

gation s'observe grâce à l'excitation par impulsions ou périodique du premier chariot. Chaque chariot est donc associé à une tranche de gaz.

Méheut (1996, 1997) a construit et utilisé avec des élèves de cinquième une simulation informatique pour une séquence d'enseignement des propriétés des gaz. Cette simulation informatique est associée à un dispositif expérimental constitué de deux pistons verticaux reliés par une canalisation horizontale dans laquelle un index de mercure peut se déplacer. L'auteur décrit finement (1996, pp. 12-15) à la fois les correspondances entre le dispositif expérimental et l'aspect de l'écran de l'ordinateur, et les relations que les élèves sont censés construire entre ce qu'ils voient sur cet écran et les grandeurs de la théorie thermoélastique des gaz. À dire vrai, la simulation n'est pas appelée par l'auteur *modèle matérialisé* mais *concrétisation* du modèle cinétique des gaz (1996, p. 12, légende de la figure 1). L'élément essentiel de ce type de modélisation est qu'il présente à l'apprenant un modèle microscopique qui sert à interpréter des événements macroscopiques qui se déroulent sur le dispositif expérimental.

2.2. Un modèle matérialisé informatisé

Dans notre étude, nous avons choisi d'implémenter le modèle matérialisé sur ordinateur. L'interface est alors constituée d'une part de l'écran de l'ordinateur, sur lequel l'élève voit apparaître un certain nombre de tracés, se dérouler un certain nombre d'événements, et d'autre part des moyens d'actions de l'élève sur l'ordinateur : clavier, souris. S'agissant du modèle de l'optique géométrique, la volonté d'incorporer des règles du modèle physique oriente le choix du logiciel.

Le logiciel Cabri-géomètre (®Texas Instruments) convient à cet objectif, pour plusieurs raisons :

- on connaît des constructions géométriques traduisant les lois physiques de l'optique géométrique, par exemple la construction de Snell pour la loi de la réfraction ;
- or Cabri-géomètre fonctionne par tracés d'objets géométriques directement sur l'écran, et ces tracés peuvent être montrés ou cachés à volonté ; cela permet aux élèves d'avoir accès aux constructions géométriques qui traduisent les lois physiques ;
- Cabri-géomètre appartient à la catégorie des micromondes ; il est donc susceptible *a priori* d'offrir une grande liberté de création à ses utilisateurs, en particulier aux élèves ;
- il a déjà été étudié en didactique des mathématiques comme constituant potentiel d'un milieu didactique (par exemple Laborde & Capponi, 1994).

Si on compare ce type de modèle matérialisé avec les exemples cités précédemment on constate un certain nombre de différences marquantes :

– les élèves peuvent effectivement manipuler sur leur ordinateur la figure qui leur est fournie, à la différence de la simulation des gaz par des aimants cylindriques de Quintana-Robles (1997), où les élèves ne peuvent que voir sur la vidéo les transformations qu'un intervenant filmé fait subir au simulateur ; le simulateur de Méheut (1996, 1997) fonctionne de façon analogue à notre dispositif quoiqu'un peu différemment, puisque les utilisateurs peuvent modifier des paramètres numériques de la simulation ou ses modalités de fonctionnement (la paroi est-elle fixe ou libre, par exemple) par des codes du clavier et non à la souris ;

– à la différence de l'étude de Quintana-Robles (1997) et de celle de Robardet *et al.* (1999), les principes de construction et de fonctionnement du modèle matérialisé informatisé sous Cabri-géomètre sont la traduction exacte des lois physiques régissant le domaine phénoménologique considéré ; en effet, dans ces deux études, le modèle matérialisé obéit à des lois *différentes* des lois physiques qu'on veut enseigner, mais qui produisent un fonctionnement *analogue* : la population d'aimants cylindriques a un comportement analogue aux molécules d'un gaz, le petit train a un comportement analogue aux molécules de l'air où le son se propage. Là encore, le simulateur de Méheut se distingue : l'apparence de l'écran résulte d'un calcul effectué par l'ordinateur, conformément aux lois de la théorie cinétique des gaz, donc celles du domaine phénoménologique considéré ; mais ce calcul reste invisible à l'élève qui ne voit que son résultat.

2.3. Un exemple de situation d'enseignement

Nous donnons ici un exemple, tiré de la séquence d'enseignement de terminale S, montrant comment une modélisation d'une expérience bien classique d'optique géométrique peut être implémentée sous Cabri-géomètre, et comment elle donne lieu à des activités d'apprentissage dans le contexte de cette classe : un enseignement en cours-TP, des élèves travaillant par paires.

L'expérience en question est la méthode de Bessel pour mesurer la distance focale d'une lentille mince convergente. Cette expérience fait intervenir la lentille dont on veut mesurer la distance focale, un objet étendu comme source lumineuse, un écran de projection. On laisse fixes l'objet et l'écran, à une distance au moins égale à quatre fois la distance focale estimée. On déplace la lentille entre l'objet et l'écran, et on constate que, pour deux positions de la lentille, et deux seulement, une image de l'objet apparaît sur l'écran. À partir de ces deux positions, et de la distance objet-écran, une

formule permet de calculer la distance focale.

Pour chaque paire d'élèves, la situation mise en place dans notre étude à propos de cette méthode de Bessel comporte les éléments suivants :

- le banc d'optique habituel et le matériel nécessaire : source, lentille, écran ;
- un fichier réalisé sous Cabri-géomètre sur un ordinateur, modélisant l'expérience ;
- une feuille de consignes.

2.3.1. *Le fichier informatique modélisant l'expérience*

Ci-dessous on trouvera (figure 2) l'aspect de l'écran de l'ordinateur que les élèves découvrent quand ils chargent le fichier, et (figure 3) l'ensemble des tracés qu'ils peuvent observer quand ils font apparaître les constructions cachées.

Les élèves ont donc devant les yeux les symboles conventionnels de trois objets réels : l'objet, la lentille et l'écran. Objet et écran sont fixes, la lentille peut se déplacer par son centre. Ces trois symboles sont alignés sur l'axe optique de la lentille. Sont aussi représentés sur ce fichier deux objets théoriques, deux rayons issus de l'extrémité de l'objet : celui qui passe par le centre optique de la lentille, et un rayon quelconque, qui passe par un point quelconque de la lentille ; ce dernier rayon peut être modifié en déplaçant le point d'incidence sur la lentille, et balayer ainsi toutes les positions possibles pour les rayons issus du point source traversant la lentille.

La figure 3 montre comment est tracée la partie émergente du rayon quelconque : les élèves peuvent faire apparaître cette figure et reconnaître que cette construction fait appel aux propriétés du foyer secondaire objet de la lentille, propriétés qu'ils ont apprises dans des situations précédentes de la séquence.

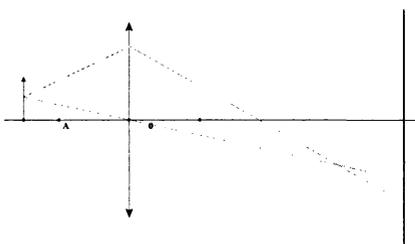


Figure 2 • Aspect de l'écran pour l'expérience de Bessel

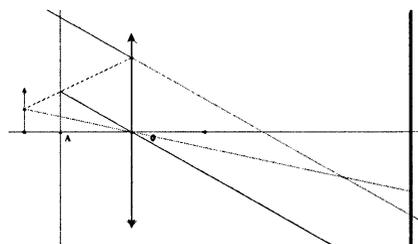


Figure 3 • La construction cachée du rayon quelconque

2.3.2. La feuille de consignes

On demandait aux élèves, dans l'ordre, de :

– montrer, en utilisant le modèle matérialisé, que, pour une distance objet-écran D suffisamment grande, il existe deux positions (OA_1 et OA_2) de la lentille donnant une image sur l'écran. La formule reliant D , OA_1 , OA_2 et la distance focale de la lentille est établie ;

– décrire comment procéder, avec le matériel de TP dont ils disposent, pour mesurer la distance focale d'une lentille en se fondant sur la formule en question ;

– faire avec ce matériel plusieurs mesures correspondant à plusieurs valeurs de la distance objet-écran et d'en déduire la distance focale de la lentille.

La première étape exige des élèves une interprétation des tracés sur l'écran en termes de formation de l'image ; il faut que les élèves identifient l'intersection des deux rayons émergents comme le point image du point source. La réussite de la première étape met en acte les connaissances fondamentales que la séquence d'enseignement voulait voir construire : un objet est une juxtaposition de sources ponctuelles ; tous les rayons émergents issus d'un point source passent par le point image. Par contre les deuxième et troisième étapes portent davantage sur la liaison que l'élève est capable de faire entre le modèle matérialisé sur l'écran et le matériel expérimental qui est mis à sa disposition.

2.4. Questions de l'étude

La double nature du modèle matérialisé conduit à un double questionnement :

– le modèle matérialisé tel qu'il a été mis en œuvre a-t-il facilité effectivement la mise en relation des deux mondes par les élèves, et quelle signification a pris cette mise en relation ? La suite de l'article sera consacrée à cette partie des résultats ;

– quel rôle ce modèle matérialisé et les situations qui ont été mises en place autour de lui ont-ils joué dans l'apprentissage réalisé du concept d'image en optique géométrique ? La réponse à cette question sera peu développée ici, on pourra se reporter à d'autres références (Buty, 2000, 2001).

3. MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES

Notre centre d'intérêt est l'activité de l'élève en situation d'apprentissage, ici en présence d'un modèle matérialisé informatisé. Nous avons filmé l'activité d'une paire d'élèves (Adeline et Emmanuel) pendant la totalité

de la séquence faisant intervenir ce modèle. Il s'agit d'une étude de cas, visant à dégager des processus ou des mécanismes. L'enregistrement vidéo nous a d'ailleurs permis de recueillir également la plupart des interventions de l'enseignant ainsi que ses discussions avec la paire d'élèves étudiée. La durée totale enregistrée est de 13 heures environ.

Nous avons traité ces données de deux façons :

- à partir d'une visualisation directe de la bande vidéo, nous avons catégorisé les productions verbales d'un des deux élèves de la paire (Emmanuel) en fonction des relations qu'elles établissent ou non entre les niveaux de modélisation ; cette catégorisation ouvre la possibilité d'un décompte, donc d'une comparaison semi-quantitative (Niedderer *et al.*, 2003 ; Buty, 2003) entre deux types d'activités, celui où les élèves utilisent le modèle informatisé, et celui où ils utilisent leur dispositif expérimental ;

- nous avons transcrit les productions verbales des élèves et de l'enseignant, et noté certains gestes et comportements : il faut insister sur le fait que seule la visualisation des gestes, notamment vers l'écran de l'ordinateur, permet une compréhension de certaines verbalisations des élèves. Nous avons organisé le corpus obtenu suivant les *situations* de la séquence d'enseignement ; puis nous avons subdivisé chacune de ces situations en *épisodes* puis en *étapes* (Buty, 1998) ; nous avons obtenu un corpus précis et organisé, susceptible de servir de base à une analyse *qualitative* fine de l'activité fonctionnelle et cognitive de l'élève étudié.

N° de la situation	Contenu d'enseignement	Nom abrégé
1	Introduction au cadre de l'optique géométrique	Introduction
2	Première condition de Gauss, foyer principal image	Foyer principal image
3	Existence et propriétés du centre optique	Centre optique
4	Seconde condition de Gauss, foyers secondaires image	Foyers secondaires image
5	Foyers objets principal et secondaires	Foyers objets
6	Image d'un point source comme intersection des rayons émergents	Point image
7	Image d'un objet comme ensemble des points images	Objet image
8	Formule de conjugaison et grandissement	Conjugaison
9	Focométrie par la méthode d'autocollimation	Autocollimation
10	Focométrie par la méthode de Bessel	Bessel
11	Focométrie par la méthode de Silbermann	Silbermann
12	Propriétés d'une lentille convergente fonctionnant en loupe : notion d'image virtuelle	Loupe
13	Propriétés d'une lentille divergente	Lentilles divergentes
14	Propriétés optiques et défauts de l'œil	Vision
15	Étude d'une lunette astronomique	Lunette astronomique

Tableau 1 • Découpage en 15 situations de la séquence d'enseignement étudiée (jusqu'à la situation 12 incluse, l'étude est restreinte aux lentilles convergentes)

Le tableau 1 ci-dessus énumère les diverses situations qui constituent la séquence d'enseignement. Dans la suite, nous ferons référence aux situations par leur numéro et leur appellation abrégée.

Comme on le constate, une situation est définie par son contenu d'enseignement. La focométrie par la méthode de Bessel par exemple, telle qu'elle a été exposée plus haut, constitue une situation.

4. RÉSULTATS

4.1. Résultats semi-quantitatifs sur les verbalisations de l'élève

Le premier constat qu'on peut faire à partir de l'analyse semi-quantitative des productions verbales des élèves est leur orientation très marquée à rester dans le monde des objets-événements quand ils manipulent le dispositif expérimental. Ceci ne constitue pas une surprise et va dans le sens des résultats des autres études brièvement rappelées plus haut.

Par comparaison à ces moments de manipulations purement expérimentales, l'usage du modèle matérialisé favorise la diversité des productions verbales des élèves, en particulier l'expression des concepts de la physique. Par contre, globalement, la relation entre le modèle physique (ici sa figuration sur l'écran de l'ordinateur) et le monde des objets et des événements n'est pas particulièrement renforcée, ce qui tendrait à faire penser que le modèle matérialisé a manqué son objectif de favoriser la liaison entre les deux mondes.

Cependant, une analyse plus fine, situation par situation, indique que les utilisations prédictives du modèle matérialisé (lorsqu'il est utilisé avant la réalisation de l'expérience, et pour en prédire le résultat) améliorent la fréquence des mises en relation entre les deux mondes, non seulement pendant l'utilisation de l'ordinateur, mais même au cours des activités de manipulations expérimentales qui la suivent.

Aussi est-il pertinent de se livrer à une analyse qualitative après l'analyse semi-quantitative, à partir du corpus de transcriptions, et de la signification des productions verbales que nous venons de caractériser, pour observer de près l'activité des élèves quand ils utilisent le modèle matérialisé. C'est ce que nous allons faire ci-dessous.

4.2. Le statut du modèle informatisé pour les élèves

La première question que nous envisageons est le statut que prend le modèle matérialisé pour les élèves. L'envisagent-ils comme une boîte noire produisant des figures de façon quelque peu magique ?

Dans notre cas, il est clair que la visibilité des traits de construction cachés aide les élèves à comprendre que le fonctionnement du modèle informatisé incorpore les lois de l'optique géométrique et par conséquent les conduit à accorder une grande confiance dans sa prédictibilité. L'explication donnée par l'enseignant dès le début de la séquence sur le principe de construction est comprise et mise en pratique. Ainsi dans la situation 9 (autocollimation), le rayon émergent n'est pas tracé lorsque l'objet est situé entre le foyer principal objet et la lentille ; sa disparition brusque surprend Emmanuel, qui, pour la comprendre, utilise spontanément la commande « montrer-cacher » (cette manœuvre, à elle seule, ne lui donne pas l'explication, mais elle en fait partie).

Cette confiance de base étant acquise, les écarts à la réalité que le modèle peut présenter ne sont pas compris par les élèves comme des échecs du modèle, mais comme une approximation normale qu'ils ont rencontrée de nombreuses fois en physique auparavant, dans l'application numérique de formules par exemple.

Cependant cette évaluation positive doit être nuancée.

Il arrive que les élèves attribuent au logiciel des potentialités qu'il ne possède pas. Par exemple, au début de la situation 6 (point image), l'enseignant montre à toute la classe comment construire, sur un fichier Cabri, l'image d'un point source à travers une lentille convergente. Pour cela il commence à tracer la parallèle à l'axe passant par le point représentant la source : elle se trace, en traversant évidemment le segment représentant la lentille ; un élève réagit aussitôt en s'exclamant « *M'sieur la lentille elle marche pas* ». Il veut dire par là que le rayon réfracté n'apparaît pas immédiatement, par l'opération du logiciel, comme c'était le cas dans les fichiers précédemment utilisés. On détecte ici, comme en d'autres occasions, une croyance selon laquelle le logiciel prend en charge la modélisation physique de systèmes optiques, alors qu'il ne peut qu'offrir des primitives géométriques au concepteur des fichiers, qui, lui, doit implémenter les lois physiques.

Autrement dit, la visibilité des constructions des fichiers que permet Cabri-géomètre est un élément essentiel pour que les élèves prennent conscience du statut de modèle de la simulation informatique. Cela ne suffit cependant pas toujours pour éviter les confusions avec la réalité, et l'enseignant doit prévoir à la fois des activités spécifiques visant à lever cette confusion et la possibilité qu'elle apparaisse au détour d'une intervention d'élève.

4.3. Le modèle matérialisé comme aide à l'exploration et à l'usage du monde théorique

Nous avons relevé, dans l'activité des élèves, trois catégories d'aides que peut apporter le modèle matérialisé pour l'exploration du modèle physique.

En premier lieu une facilité d'identification des objets pertinents du modèle ; cela vient de la nécessité où se trouve l'élève, s'il veut utiliser le modèle matérialisé, de produire une interprétation des éléments qu'il voit sur l'écran.

Un *exemple* par l'absurde est fourni par la manipulation infructueuse d'Emmanuel lors de la situation 7 (objet image). Il tente de déplacer le segment représentant l'image puis de modifier la taille de ce segment, alors que ces deux caractéristiques ne peuvent être modifiées qu'en agissant sur le segment représentant l'objet. La dépendance entre ces éléments traduit une loi physique, ce qu'Emmanuel semble ne pas avoir compris. On peut même dire qu'il n'a compris ni la loi physique, ni le concept d'image sous-jacent. La suite de l'analyse montre au contraire que son interprétation (qui conduit à un blocage de l'utilisation du modèle matérialisé) est conditionnée par sa propre « théorie » des phénomènes liés à l'image, très proche de la conception classique de l'image voyageuse, selon laquelle l'image peut se matérialiser n'importe où ; il est alors normal d'essayer de la déplacer ou de modifier sa taille. Mais le modèle matérialisé, construit conformément à la physique, résiste...

En second lieu, la mise à jour des relations fonctionnelles entre certains de ces éléments ; cela est autorisé par la variation continue des caractéristiques des objets présents sur l'écran, que permettent le logiciel et sa manipulation directe par la souris.

Par exemple au début de la situation 2 (foyer principal image) on demande aux élèves de manipuler un fichier représentant une lentille hémicylindrique traversée par un rayon incident perpendiculaire à sa face d'entrée plane (figure 4). Adeline, en répétant l'identification des angles dans plusieurs positions successives du rayon incident, établit une relation entre l'écart d'un rayon parallèle à l'axe, la position de la normale au point de sortie de la lentille, et la valeur de l'angle d'incidence, par la possibilité que lui offre l'ordinateur d'une variation continue de ces éléments. Elle énonce donc une loi de variation de l'angle en fonction de la position du rayon incident. Elle établit de même, dans l'étude du centre optique de la lentille (situation 3), une relation fonctionnelle du même type entre « angle d'incidence » et « écart entre incident et émergent » : plus l'angle d'incidence est grand, plus la

déviations entre incident et émergent est grande (« *et tu vois ça fait euh (...)* c'est dévié quand même un peu ça dépend / plus l'angle d'incidence est grand en fait et ça fait un(...) une déviation (rires) / ça fait un angle plus grand quoi enfin t'as compris », en disant cela elle montre avec son doigt le rayon intérieur à la lentille pendant que la figure se modifie).

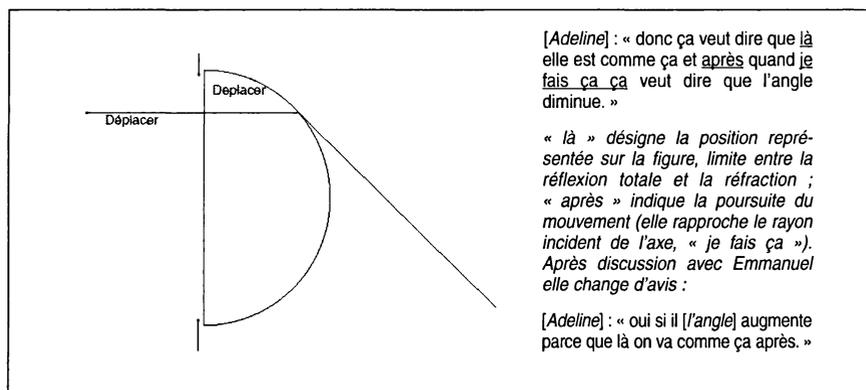


Figure 4 • Utilisation du modèle matérialisé et découverte de relations fonctionnelles

En troisième lieu la mise en place de procédures de contrôle spécifiques pour vérifier la validité de constructions ou de conjectures, ce que Rolet (1996) avait déjà montré en didactique des mathématiques.

Par exemple, une procédure de contrôle très souvent utilisée porte sur le parallélisme d'un rayon émergent à l'axe optique, représenté conventionnellement comme horizontal. En effet, la nature pixelisée de l'écran qu'observent les élèves produit, au cas où le tracé en question n'est pas horizontal, un décrochement qu'ils savent très bien repérer. Autre procédure effectivement observée, lors de la situation 6, portant sur la construction de l'image d'un point à travers une lentille convergente : on demande aux élèves de tracer les rayons émergents correspondant aux rayons spéciaux (passant par les foyers et le centre optique) et à un rayon quelconque, dont le point d'incidence sur la lentille est mobile ; Emmanuel vérifie la validité de ses constructions en déplaçant le rayon quelconque pour le faire coïncider avec les rayons spéciaux ; il s'aperçoit ainsi d'une erreur, dont il détecte l'origine, dans l'un des tracés. Il s'agit dans ces deux cas de contrôles (car l'élève exerce volontairement une action dont il perçoit et évalue le résultat) instrumentés par le logiciel Cabri-géomètre (car ce sont les propriétés du logiciel et de l'interface graphique qui permettent d'énoncer le jugement final).

Au total, la possibilité de manipuler le modèle matérialisé direc-

tement et commodément grâce à la souris facilite l'exploration du monde théorique par les élèves, de façon relativement autonome, pour identifier des éléments, chercher des explications ou des relations, autocontrôler leur activité.

4.4. Des moments privilégiés pour l'établissement de liens entre les deux mondes

L'objectif principal de l'introduction d'un modèle matérialisé est, dans notre perspective, de favoriser la construction de sens par la mise en relation des deux mondes. Il est donc essentiel de s'intéresser, dans l'activité des élèves, aux moments où, effectivement, ils se servent du modèle informatisé pour faire le rapprochement entre le modèle théorique de la physique et leur activité expérimentale.

On peut d'abord dire que la séquence a été bâtie pour que les élèves effectuent ces allers-retours entre théorie et expérience. Nous n'insisterons donc pas sur ces allers-retours quand ils consistent à suivre les consignes prévues dans le texte de la séquence. L'idée générale est qu'ils permettent des manipulations plus rapides et plus assurées. L'exemple le plus net est à cet égard la situation 10 (méthode de Bessel). Cette expérience est en général difficile à réaliser en classe, car les élèves se livrent à beaucoup de tâtonnements que ni eux ni l'enseignant ne savent interpréter. L'utilisation préalable du modèle matérialisé leur fournit le *modus operandi* le plus efficace (déplacer la lentille calmement de l'objet à l'écran), parce qu'elle leur fournit une première description de ce qu'il doit se passer : la formation de deux images, la première grande, la seconde petite. Le modèle matérialisé sert ainsi d'aide à une réalisation raisonnée des expériences.

Il n'est donc pas surprenant d'observer, après une phase de prise en main, un recours au modèle matérialisé spontané, indépendant des consignes, pendant la réalisation d'expériences. Ainsi durant la situation 9 (autocollimation), voit-on Adeline et Emmanuel se tourner vers l'écran de l'ordinateur pour chercher confirmation de l'endroit où il est raisonnable de chercher l'image (en dessous de l'axe optique qu'ils ont localisé sur leur montage).

Autre exemple : dans les situations qui terminent la séquence d'enseignement, l'enseignant a laissé aux élèves un temps pour explorer les fichiers qu'ils avaient à leur disposition, sans leur donner de consignes précises. Ce fut l'occasion pour les élèves d'effectuer un réel travail de modélisation, d'identification des éléments du modèle et de compréhension du fonctionnement de ce modèle.

Par exemple, dans la situation 12 (consacrée à la loupe), l'enseignant se borne à demander à l'ouverture du fichier « *qu'est-ce que vous pouvez faire avec ce fichier ?* » (figure 5). L'activité des élèves s'oriente vers les modifications possibles des objets du fichier, dans leurs taille et position. Il y a rapidement concentration sur la position de l'objet, ce qui donne lieu à une interprétation en termes de formation d'images par Adeline (on aura constaté sur la figure 5 que l'image ne figure pas sur le fichier) ; cela conduira, dans la suite, à une discussion entre les deux élèves sur la visibilité de l'image à travers la lentille (voir paragraphe suivant).

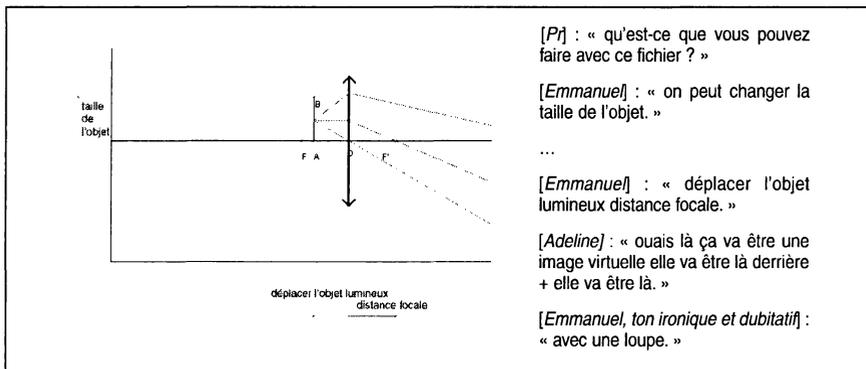


Figure 5 • Fichier loupe et verbalisation des élèves

4.5. L'utilisation prédictive du modèle dans une situation expérimentale

La situation 12 sur la loupe, abordée plus haut, est l'occasion d'une activité prédictive des élèves. Cette prédiction s'amorce spontanément dès la manipulation autonome du modèle matérialisé. Au début, la prédiction reste au niveau du modèle : les élèves font référence à l'image, désignent des parties de l'écran, parlent des événements qu'ils provoquent sur l'écran en manipulant la souris. Quand l'enseignant, quelques instants après, leur distribue une feuille sur laquelle ils doivent faire les constructions géométriques classiques des rayons, ils restent dans le modèle pendant un bon moment, vérifiant la conformité de leurs tracés aux règles connues sans chercher à leur donner sens (Emmanuel : « *normalement on présente les/ces traits en pointillés* »). Tout à coup cependant la discussion entre les deux élèves change de niveau, et porte sur ce qu'on verrait dans le monde réel si on regardait à travers la loupe :

Adeline : *faut se mettre où par rapport à la lentille pour la voir [l'image]*
Emmanuel : *on peut pas la voir*
Adeline : *là (!) si (!)*
Emmanuel : *elle est virtuelle*
Adeline : *c'est une loupe (insiste sur le mot)*
Emmanuel : *elle est vir-tu-elle (insiste sur le mot)*
Adeline : *et ben quand on voit une image virtuelle on peut la voir à travers euh quelque chose / on peut pas la voir reculer sur un écran certes et quand tu regardes dans une loupe tu vois bien c'que ... ce que tu regardes.*

À partir de ce moment, la discussion se poursuit en utilisant le modèle matérialisé pour appuyer les raisonnements de chacun ; ce recours au modèle matérialisé a deux fonctions : aider chacun des protagonistes à visualiser ce qu'il pense, mais aussi avoir une base matérielle commune pour dialoguer.

Cette phase de discussion sur le modèle matérialisé aboutira à un constat de désaccord clair, et à l'expression de deux prédictions opposées : Adeline soutient qu'on va voir l'image agrandie en regardant à travers la lentille ; Emmanuel soutient au contraire qu'on ne va rien voir, ou alors à la fois l'objet et son image, ce qui lui paraît absurde. Adeline sera particulièrement satisfaite, lors de la réalisation de l'expérience, de constater et de faire constater à Emmanuel qu'elle avait raison.

4.6. Le modèle matérialisé comme milieu didactique

La capacité du modèle matérialisé de répondre aux actions de son utilisateur, non comme celui-ci le voudrait mais conformément aux lois de l'optique géométrique, se manifeste à de nombreuses reprises. Dans plusieurs cas, Emmanuel ou Adeline manifestent qu'ils en sont conscients.

Dans la situation 5 (foyers secondaires objet), le rayon émergent auquel Emmanuel s'intéresse n'est pas parallèle à l'axe secondaire (voir figure 6) ; le point source est trop éloigné de l'axe optique, on se trouve hors des conditions de Gauss. Emmanuel considère que l'intersection de la droite qu'il veut tracer comme axe secondaire et du rayon émergent a un sens physique de foyer image, et il veut tracer le plan focal image qu'il estime être le correspondant du plan focal objet. Il utilise toutes les possibilités que lui offre le logiciel, y compris le déplacement de la partie de page visible à l'écran que l'enseignant lui a montré quelques minutes auparavant (la rapidité d'assimilation des commandes du logiciel dont les élèves font preuve est souvent surprenante). Mais son utilisation du logiciel le détrompe : il doit reconnaître

que quand on déplace A sur le segment qui représente le plan focal objet, « *t'obtiens pas un plan de l'autre côté* ». Il s'obstine, en traçant la perpendiculaire à l'axe optique passant par cette intersection d'un émergent quelconque et de l'axe secondaire. Une fois qu'il a achevé la construction, il énonce que le plan focal image doit être symétrique au plan focal objet. Il propose le déplacement du point A comme technique pour vérifier la validité de sa construction et de son raisonnement, et doit reconnaître qu'elle conduit à un échec. On voit ici qu'Emmanuel mène un ensemble de stratégies que la résistance du milieu, localement adidactique, rend toutes perdantes.

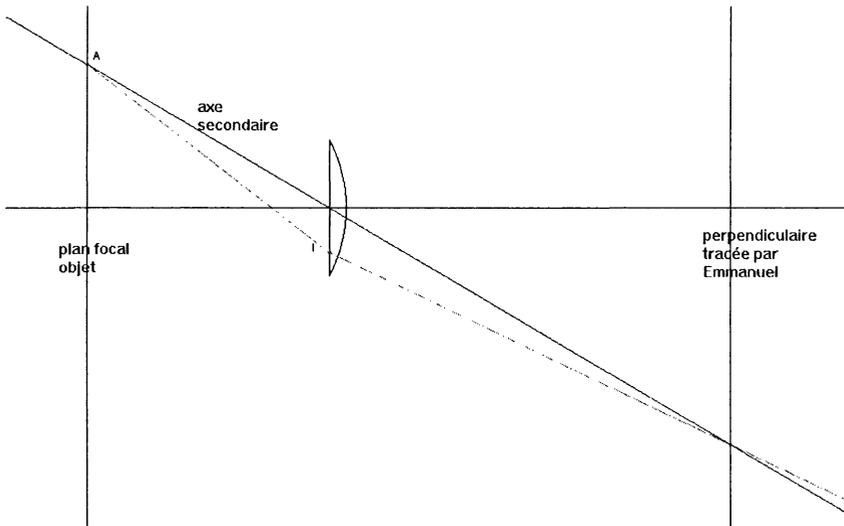


Figure 6 • **Invalidation par le milieu des conjectures de l'apprenant**

Pour autant, ces échecs ne conduisent pas forcément à une remise en cause des conceptions erronées qui les ont produits. L'utilisation du modèle matérialisé est fondée sur une interprétation par l'élève des événements qui sont perceptibles sur l'écran ; cette interprétation fait intervenir un nombre assez élevé d'hypothèses ; un échec remet en cause certaines de ces hypothèses, mais l'élève ne sait pas lesquelles ; il peut supposer que son incompréhension porte sur le fonctionnement du logiciel plutôt que sur des lois physiques. Dans les occasions où la résistance du milieu fait évoluer les positions de l'élève, un tiers est toujours impliqué (l'autre membre de la paire, ou l'enseignant), dont l'argumentation s'appuie sur le comportement du logiciel.

5. CONCLUSIONS

Ces résultats permettent de fonder une discussion pour savoir si la démarche utilisée a atteint ses objectifs, c'est-à-dire mettre à la disposition des élèves un modèle matérialisé pour leur faciliter la mise en relation des deux mondes, et ainsi la construction de sens aux concepts de la physique.

De façon générale la réponse est affirmative, mais il faut la nuancer.

L'aspect le plus positif est certainement que le modèle matérialisé a permis aux élèves une exploration et une réflexion assez avancées sur le modèle de l'optique géométrique. Un tel outil permet, non seulement de leur demander une activité prédictive assez systématique, mais surtout de fonder leurs prédictions sur des raisonnements impliquant le modèle qu'on souhaite enseigner. Le modèle matérialisé guide l'activité de prédiction.

De façon générale d'ailleurs, il ne faut pas sous-estimer le fait que mettre à disposition des élèves une ressource telle que le modèle matérialisé oriente leur activité cognitive suivant la structure de la ressource : les fichiers traduisent tous plus ou moins l'organisation du monde matériel vue par les savoirs de l'optique géométrique enseignée ; y sont représentés un objet, une lentille, une image qui a le statut de conséquence. Assigner une tâche aux élèves à partir de ces fichiers, c'est, quasi certainement, les voir prendre comme cadre de travail cette représentation du monde, c'est donc guider très fortement leur activité.

Il n'est pas moins important que les élèves soient conscients du caractère de modèle des fichiers informatiques qu'on leur fait utiliser ; leur apprendre au cours de cet enseignement d'optique qu'il faut distinguer la réalité et sa modélisation, c'est peut-être une base pour qu'ils adoptent des attitudes correctes dans d'autres domaines de la physique. On a vu cependant que se manifestait, en certaines occasions, une croyance selon laquelle le logiciel pouvait prendre en charge la modélisation physique de systèmes optiques. On retrouve ici, sous une forme adaptée, un des risques mentionnés par Harrison Treagust (2000), indiqués plus haut.

Une des caractéristiques majeures du modèle matérialisé que nous avons utilisé est la visibilité des constructions qui fondent le fonctionnement des fichiers réalisés sous Cabri-géomètre. Cette visibilité renforce nettement la crédibilité du modèle matérialisé, favorise les raisonnements des élèves et leur prise en charge des problèmes qu'on leur pose. Plus fondamentalement d'ailleurs, le simple fait que les élèves puissent modifier les figures présentes à l'écran par manipulation directe à la souris permet au logiciel de jouer pleinement le rôle de milieu didactique.

On peut pointer trois limites de nos résultats.

En premier lieu, une des conclusions du travail de Quintana-Robles (1997) est qu'effectivement le recours à un modèle matérialisé semble faciliter la mise en relation par les élèves du modèle théorique (particulière dans son cas) et du champ expérimental. Dans notre cas, la fréquence des relations entre les deux mondes n'est pas très élevée. Il s'agit sans doute là d'un facteur sur lequel une organisation différente de la séquence d'enseignement pourrait jouer, car nous avons vu que les instructions *ad hoc* de l'enseignant ou les situations de prédiction conduisent à une mise en relation plus fréquente.

En second lieu, le rôle de milieu que joue le logiciel consiste à réfuter les hypothèses de l'apprenant. Plus exactement, la réponse du logiciel est interprétée comme une réfutation par l'apprenant, qui attendait un certain événement, lequel ne se produit pas. L'apprenant en déduit qu'il a commis une erreur, mais il ne sait pas laquelle. Dans l'ensemble de connaissances que l'élève a mobilisées pour faire sa prédiction, le milieu ne l'aide pas à choisir quelle est la connaissance erronée. Le milieu (tel qu'il est organisé dans cette séquence d'enseignement autour des fichiers Cabri-géomètre) rend un oracle, sanctionne, mais ne guide pas. On peut caractériser ce milieu comme passif.

La question est ouverte de la constitution de milieux didactiques actifs, qui, non seulement invalideraient les hypothèses fausses de l'apprenant, mais, au terme d'une analyse de ses actions, seraient capables de proposer des pistes de rectification. De telles pistes de recherche ont été engagées en mathématiques, en utilisant Cabri-géomètre (Luengo, 1997) ; la transposition en physique pose sans doute des problèmes particuliers.

La dernière remarque qu'on peut faire à ce travail est qu'il prend peu en compte les actions de l'enseignant, qui introduisent évidemment des paramètres nouveaux. Préciser comment l'utilisation du modèle matérialisé peut s'articuler au mieux avec les interactions entre les apprenants et l'enseignant est notre objectif actuel de recherche.

NOTE

1. En France tout élève de terminale doit choisir un enseignement de spécialité. À raison de deux heures par semaine, cet enseignement fournit des compléments dans une discipline (mathématiques, sciences physiques, sciences de la vie et de la Terre). Il est évalué au baccalauréat.

BIBLIOGRAPHIE

- BALACHEFF N. (1987). Processus de preuves et situations de validation. *Educational Studies in Mathematics*, vol. 18, pp. 147-176.
- BÉCU-ROBINAULT K. (1997a). *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- BÉCU-ROBINAULT K. (1997b). Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction expérimentale du concept de puissance. *Didaskalia* n° 11, pp. 7-37.
- BUTY C. (1998). Pour une étude de l'apprentissage dans une séquence d'enseignement utilisant une modélisation informatique, en classe de terminale. In F. Langlois & V. Maffeo, *Actes du sixième séminaire national de didactique des sciences physiques et de la technologie, Lyon octobre 97*, pp. 152-158.
- BUTY C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, université Lumière-Lyon II.
- BUTY C. (2001). A case of learning process in a computer-based modelling environment. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselves, G. Bisdikian, G. Fassoulopoulos, E. Hatzikraniotis & M. Kallery (Éds), *Proceedings of the third international conference of ESERA, Thessaloniki*, pp. 328-330.
- BUTY C. (2003). Modelling In Geometrical Optics Using A Microcomputer. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching And Learning In The Science Laboratory*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 231-242.
- CHALMERS A.F. (1997). *Qu'est-ce que la science ?* Paris, Le Livre de Poche.
- GILBERT J.K. & BOULTER C.J. (1998). Learning Science through models and modelling. In B.J. Fraser & K.G. Tobin (Éds), *International Handbook of Science Education*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 53-66.
- GOBERT J.D. & BUCKLEY B.C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, vol. 22, n° 9, pp. 891-894.
- GUILLAUD J.-C. (1998). *Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième*. Thèse, université Joseph Fourier-Grenoble I.
- HARRISON A.G. & TREAGUST D.F. (2000). A typology of science school models. *International Journal of Science Education*, vol. 22, n° 9, pp. 1011-1026.
- KUHN T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.
- LABORDE C. & CAPPONI B. (1994). Cabri-géomètre constituant d'un milieu pour l'apprentissage de la notion de figure géométrique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 14, n° 12, pp. 165-210.
- LUENGO V. (1997). Un micromonde de preuve intégrant la réfutation. In M. Baron, P. Mendelsohn & J.-F. Nicaud (Éds), *Actes des cinquièmes journées EIAO de Cachan*. Paris, Hermès, pp. 85-97.
- LUNETTA V. N. (1998). The school science laboratory : historical perspectives and contexts for contemporary teaching. In K. Tobin & B. Fraser (Éds), *International Handbook of Science Education*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 249-262.
- MÉHEUT M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- MÉHEUT M. (1997). Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases : the parts played by questions and by a computer-simulation. *International Journal of Science Education*, vol. 19, n° 6, pp. 647-660.

- MOULOUD N. (1985). Perspectives épistémologiques. In *Encyclopedia Universalis*, article « Modèle », vol. 12, pp. 412-415.
- NIEDERRER H., BUTY C., HALLER K., HUCKE L., SANDER F., AUFSCHEITER S. V., FISCHER H. & TIBERGHEN A. (2003). Talking Physics in Labwork Contexts – A Category Based Analysis of Videotapes. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching And Learning In The Science Laboratory*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 31-41.
- PATEYRON B. (1997). *Mobilisation des savoirs dans la formation professionnelle*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- QUINTANA-ROBLES M. (1997). *Étude didactique de films comme aide pour l'enseignement de la physique. Cas de l'expansion des gaz*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- REDFORS A. & RYDER J. (2001). University physics students' use of models in explanations of phenomena involving interaction between metals and electromagnetic radiation. *International Journal of Science Education*, vol. 23, n° 12, pp. 1283-1301.
- ROBARDET G., ORAND N. & PLUVINAGE C. (1999). Un modèle de la propagation des sons. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 815, pp. 951-964.
- ROLET C. (1996). *Dessin et figure en géométrie : analyse des conceptions de futurs enseignants dans le contexte Cabri-géomètre*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- SÉJOURNÉ A. (2001). *Conception d'un hypermédia et analyses de l'influence de l'organisation des contenus sur l'activité des élèves : le cas de « Labdoc Son et Vibrations »*. Thèse, université Lumière Lyon 2.
- SÉRÉ M.-G. & BENEY M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 11, pp. 73-102.
- SINACEUR H. (1999). Modèle. In D. Lecourt (Dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris, PUF, pp. 649-651.
- TIBERGHEN A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp. 71-87.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 10, n° 3, pp. 133-170
- VINCE J. (2000). *Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et à l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse, université Lumière Lyon 2.

Cet article a été reçu le 30 avril 2002 et accepté le 14 janvier 2003.



Éléments théoriques pour la conception d'un hypermédia en sciences physiques et pour l'analyse de l'activité des élèves : le cas des phénomènes sonores

**Theoretical elements to design a hyper-
media in physics and to analyse student's
activity : the case of sound phenomena**

Arnaud SÉJOURNÉ

UMR GRIC-COAST, université Lumière Lyon 2
5, avenue Pierre-Mendès-France, 69676 Bron cedex 11, France.
arnauld.sejourne@univ-lyon2.fr

Résumé

Ce texte présente une recherche en didactique de la physique dont l'une des finalités est de concevoir un hypermédia dédié à l'enseignement des sciences à partir d'hypothèses d'apprentissage liées au fonctionnement du savoir. L'avantage de telles hypothèses est de permettre à la fois de concevoir l'hypermédia « Labdoc Son et Vibrations » et d'analyser l'activité des élèves en situation de classe. Nous décrivons d'abord le cadre théorique de référence qui introduit les hypothèses d'apprentissage liées au savoir enseigné lesquelles deviennent des contraintes pour la conception. La méthode de la conception est ensuite présentée et illustrée à partir de

plusieurs exemples. Enfin, nous présentons un exemple d'analyse de l'activité des élèves à partir de ce même cadre théorique afin de voir si l'environnement créé va favoriser l'activité des élèves telle que nous l'avons prévue dans notre analyse a priori.

Mots clés : *nouvelles technologies, représentation multiple, activité de modélisation, situation d'apprentissage, physique.*

Abstract

This text presents a research in physics didactics whose main aim is to design a hypermedia dedicated to science teaching on the basis of learning hypotheses related to how knowledge functions. As shown in this text, those learning hypotheses underlie both the design of the hypermedia « Labdoc Son and Vibration » and the analysis of students' activity in classroom situation. First, is described the theoretical framework that introduces the learning hypotheses related to knowledge that is to be taught. The learning hypotheses become constraints for the conception. The method of the conception is then presented and illustrated from several examples. Finally, we present an example of analysis of the student's activity with the same theoretical framework in order to see if the computer environment favours the types of student activity we have provided for in our a priori analysis.

Key words : *new technologies, multiple representation, modelling activity, Learning situation, physics.*

1. INTRODUCTION

La recherche présentée porte sur la conception d'un environnement d'apprentissage dans le domaine de la physique. Elle s'inscrit dans le domaine de l'ingénierie didactique (Artigue, 1990). Nous avons conçu l'hypermédia « Labdoc son et vibrations » dédié à l'enseignement des phénomènes sonores (vibration, propagation du son, etc.) pour des élèves de seconde (Séjourné & Tiberghien, 2001). Cet hypermédia s'insère dans l'une des catégories d'usage proposées par Bruillard et de la Passadière (1998) qui est « *d'utiliser des environnements d'apprentissage intégrant l'hypertexte* » (Venturini & Viel, 1996 ; Paquelin, 1996). Sa conception a nécessité la mise en place d'un cadre théorique à partir de questions portant par exemple sur : l'organisation des tâches initialement scénarisées (sur le papier), la manière de réaliser des expériences à partir d'un ordinateur, la façon d'évaluer la réponse des élèves, la nature des aides à proposer, etc. Ces questionnements sont relatifs d'une part à *comment concevoir des situa-*

tions d'apprentissage présentées sur un support informatique et d'autre part à *comment véhiculer et organiser le savoir en jeu*.

Dans cet article nous présentons d'abord le cadre théorique, suivi de son application du point de vue de la conception de l'hypermédia. Nous analysons ensuite, à partir de ce même cadre théorique l'activité des élèves, en nous centrant sur la nécessité de varier les caractéristiques des situations d'enseignement mettant en jeu un même objet de savoir afin de favoriser l'apprentissage conceptuel. Cette analyse nous permettra d'apprécier si les tâches créées favorisent les activités des élèves que nous avons prévues lors de notre analyse *a priori*.

2. CADRE THÉORIQUE DE RÉFÉRENCE

Notre cadre théorique de référence sert à la fois de base pour organiser les contenus scientifiques dans l'hypermédia et pour analyser les activités des élèves.

Il comporte trois « outils » théoriques. Les deux premiers se réfèrent aux savoirs en jeu dans la situation d'enseignement et ceux (co)-construits par les élèves. Ce sont d'une part l'activité de modélisation et d'autre part ce que nous appelons « activité sémiotique » c'est-à-dire la manière dont un apprenant utilise les représentations du savoir enseigné impliqué dans l'activité de modélisation ; représentations précédemment élaborées à partir d'une analyse du savoir à enseigner. L'activité réalisée par un individu (physicien ou non) lors d'une interprétation ou lors de la prédiction d'un fait scientifique est dite de *modélisation*. Il mobilise et met en relation des éléments d'information d'ordre théorique et liés aux « objets et événements » observés. L'activité sémiotique consiste à utiliser des systèmes sémiotiques de représentations et établir des relations entre des représentations élaborées. Le troisième « outil », qui contribue aux fondements de la conception de l'hypermédia, provient de la théorie des situations de Brousseau (1998). Il permet d'organiser des situations favorables à l'apprentissage des sciences en cernant les rôles de l'enseignant et de l'enseigné vis-à-vis du savoir en jeu dans la situation d'enseignement.

Ces trois « outils » comportent des hypothèses d'apprentissage, en particulier, liées à la manière dont fonctionne le savoir et aux caractéristiques des situations d'apprentissage. Ils ont permis la transformation de séquences d'enseignement¹ sur les phénomènes sonores initialement sur format papier en celles proposées dans l'hypermédia. Ces séquences initiales ont été, au départ, produites par un groupe composé d'enseignants, de chercheurs et d'un inspecteur pédagogique régional (IPR).

2.1. L'activité de modélisation

Le choix fondé sur la modélisation permet d'analyser la diversité des savoirs en jeu dans les séquences d'enseignement et l'activité des élèves dans deux perspectives que sont l'enseignement de la physique et l'apprentissage (partie 0). Nous présentons d'abord l'intérêt de l'activité de modélisation pour organiser les contenus scientifiques, puis les hypothèses d'apprentissage associées.

2.1.1. Intérêt et présentation

Pour Tiberghien (1994), donner une explication, une interprétation ou une prédiction au sujet d'un événement du monde sensible, nécessite une activité de modélisation. Cette activité implique deux mondes, celui de la « théorie-modèle », correspondant aux systèmes explicatifs de l'apprenant, et celui des « objets et des événements » concernant les faits scientifiques et de la vie quotidienne. L'apprenant établit donc des liens entre ses propres systèmes explicatifs et les objets et/ou les événements observés. Ces systèmes explicatifs (pouvant ne pas faire sens du point de vue de la physique) sont constitués d'éléments cognitifs stables (Buty, 2000 ; Niedderer & Schecker, 1992), dont, en particulier, le raisonnement causal linéaire (Viennot, 1993). Par exemple, pour certains élèves, le son cause la vibration de la source de son et non l'inverse.

Le processus de modélisation met en jeu trois principaux niveaux² de savoir que sont la théorie, le modèle et le « champ expérimental ».

Le niveau de la théorie inclut le niveau explicatif de la modélisation. Pour la physique, nous y rencontrons les principes, les lois.

Le modèle est un intermédiaire indispensable entre le niveau de la théorie et le niveau du « champ expérimental ». Il reconstruit la situation expérimentale dans les termes de la théorie (Bachelard, 1979). Dans le cas de la physique, il consiste en des formalismes et des mises en relation entre grandeurs.

Le niveau des « objets et des événements », pour la physique, appartient au « champ expérimental » qui comprend les faits expérimentaux, les objets et les événements associés à des expériences et les prises de mesure.

À ces niveaux correspondent des descripteurs du savoir mis en jeu dans le processus de modélisation. Ces descripteurs rendent possible l'analyse des séquences d'enseignement et la comparaison des démarches de modélisation impliquées dans le savoir enseigné à celles que l'élève met

en œuvre (Tiberghien, 1999). L'analyse de l'activité des élèves revient, en partie, à réaliser cette comparaison (partie 4).

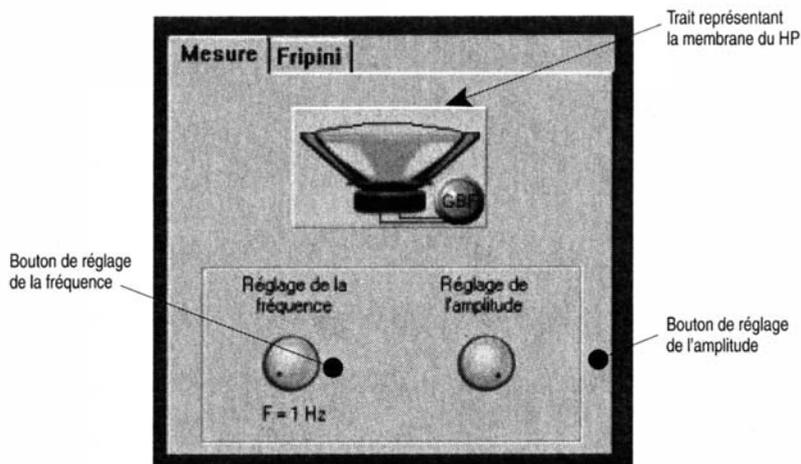


Figure 1 • Exemple du niveau des « objets/événements simulés » à partir d'une simulation présentée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

2.1.2. Le niveau des « objets et événements simulés »

La conception de situations d'enseignement utilisant les nouvelles technologies nécessite de distinguer des éléments de savoir que l'on rencontre sous la forme de simulations, de modélisations informatisées d'expériences à réaliser selon des lois de la physique, etc. Ces éléments de savoir que nous nommons « objets et événements simulés » appartiennent globalement au monde de la simulation : « Ces entités virtuelles, observables et « manipulables » (les simulations), ne sont ni des objets réels, ni des éléments du monde des théories-modèles. Ils servent d'intermédiaires, dans l'activité de résolution d'un problème entre le monde des objets/événements et le monde des modèles : nous appellerons par la suite ce qui est représenté à l'écran le monde de la simulation » (Vince, 2000, p. 315). La simulation sert donc de lien privilégié entre le théorique et l'expérimental (Beaufils *et al.*, 1987 ; Buty, 2000 ; Vince, 2000 ; Vince & Tiberghien, 2000). La figure 1, par exemple, présente la simulation du mouvement d'aller-retour d'une membrane du haut-parleur dont il est possible de faire varier les grandeurs fréquence et amplitude à partir des deux boutons. Nous constatons qu'une telle simulation se réfère :

– au « champ expérimental » *via* les objets représentés (une coupe de haut-parleur, une membrane du haut-parleur (HP) représentée par un trait),

– à une théorie et un modèle puisqu'il est possible d'agir sur les grandeurs fréquence et amplitude, qui sont des concepts du cadre théorique physique du savoir en jeu.

Cette simulation peut donner ainsi l'occasion aux élèves d'évoquer d'une part le « champ expérimental » *via* les objets composant la simulation (un haut-parleur par exemple) et les événements observés (mouvement du trait représentant la membrane du haut-parleur) et d'autre part le monde des théories-modèles, car il est possible d'agir sur les grandeurs physiques associées.

2.1.3. Hypothèse d'apprentissage et difficultés des élèves

L'hypothèse d'apprentissage associée à cette activité de modélisation pose que les concepts de physique prennent leur sens dans les mises en relation que les élèves réalisent entre les différents niveaux de savoir et au sein d'un même niveau de savoir. La verbalisation qui suit illustre le cas où un élève met en relation le niveau de la « théorie-modèle » (la fréquence) avec celui du « champ expérimental » (la perception d'un son) : « *la fréquence est faible quand un son est grave* ».

Cependant, les précédents travaux de l'équipe COAST (Bécu-Robinault, 1997 ; Tiberghien & Megalakaki, 1995) montrent que les élèves éprouvent des difficultés à réaliser cette activité de modélisation. En réponse à cette difficulté d'articuler les éléments des mondes « théories/modèles » et « objets/événements », Vince (2000) considère qu'il faut les dissocier. Cela implique alors la sélection de situations expérimentales qui doivent être cohérentes avec le modèle en jeu.

2.2. Systèmes sémiotiques et représentations sémiotiques

Nous considérons que les représentations sémiotiques produites par un enseignant ou par un élève lors d'une séquence d'enseignement ne se limitent pas à leurs esthétismes, à produire de l'émotion ou à diversifier les représentations d'un même objet. Elles nécessitent, de la part d'un sujet, des activités cognitives essentielles à leur compréhension (Duval, 1995; Ainsworth *et al*, 1996 ; Ainsworth, 1999). Nous présentons d'abord l'intérêt des représentations sémiotiques et des systèmes sémiotiques, puis les hypothèses d'apprentissage associées.

2.2.1. Intérêt et présentation

Selon Duval (1996), parler de représentation c'est prendre en compte le mode de production et la signification de la représentation. Une

représentation sémiotique est, par nature, externe, du fait qu'elle est visible et observable et qu'elle nécessite le développement et la maîtrise d'un système de représentation (la langue naturelle, l'image, l'écriture symbolique). Les représentations peuvent être converties en des représentations équivalentes dans un autre système sémiotique et prendre des significations différentes pour l'apprenant qui les utilise³ (Duval, 1995). Le concept d'amplitude, par exemple, peut être représenté à partir de trois systèmes sémiotiques que ce soient la langue naturelle (une définition), la représentation dynamique (une animation) ou le dessin légendé (tableau 1). Chacune des représentations sémiotiques apporte des informations supposées aider à la compréhension dudit concept. Par exemple, à partir de la représentation intitulée « dessin », il est possible de prendre conscience de ce que l'on entend par déplacement plus ou moins grand de la partie vibrante de la source de son (voir définition de l'amplitude) puisque c'est explicitement désigné sur le dessin. L'animation, quant à elle, présente l'amplitude de vibration en tant que grandeur mesurable avec une règle graduée.

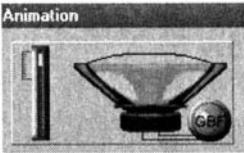
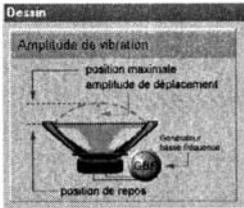
Systèmes sémiotiques	Différentes représentations de l'amplitude de vibration
Langue naturelle	Définition : L'amplitude est un déplacement plus ou moins grand de la partie vibrante de la source de son.
Représentation dynamique	 <p>Animation</p>
Dessin légendé	 <p>Dessin</p> <p>Amplitude de vibration</p> <p>position maximale</p> <p>amplitude de déplacement</p> <p>position de repos</p> <p>Générateur basse fréquence</p> <p>GBF</p>

Tableau 1 • Représentations possibles du concept d'amplitude de vibration présentée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

2.2.2. Hypothèses d'apprentissage

À la suite de Duval (1995), nous supposons que les relations construites par les élèves entre les diverses représentations favorisent la construction du sens d'un concept en jeu dans la tâche proposée. Prenons cet exemple de verbalisation d'un élève réalisant la tâche « définition de la

fréquence » (figure 2) : « Ah là la fréquence c'est un hertz et la fréquence c'est le nombre d'allers et retours effectués en une seconde par la partie vibrante de la source donc en une seconde ça fait un deux ». Nous constatons que l'élève met en relation des informations provenant de la définition de la fréquence (langue naturelle) avec celle de l'animation (représentation dynamique). Nous pouvons supposer que l'élève est en train de construire du sens au concept de fréquence en articulant ces deux représentations.

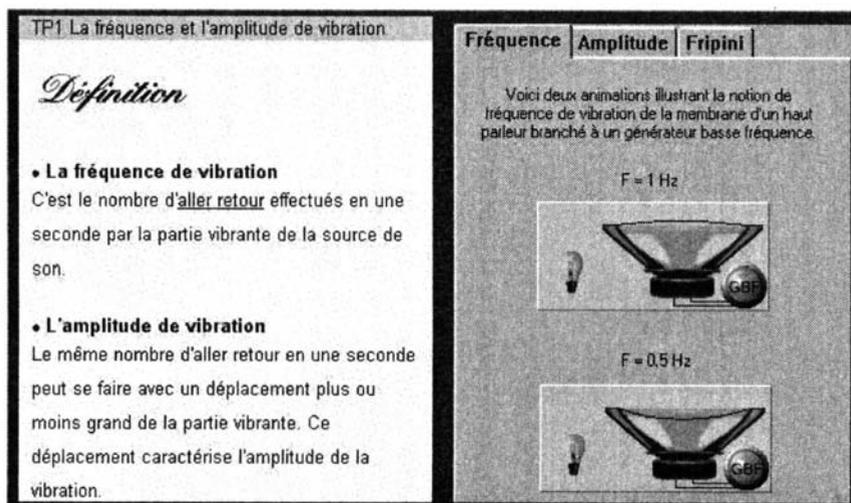


Figure 2 • Page-écran de la tâche « Définitions de la fréquence et de l'amplitude » du TP1 proposée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

2.3. Situations d'apprentissage

Il va s'agir de caractériser les situations d'apprentissage qui visent à permettre aux élèves de construire de nouveaux savoirs. La situation est définie par des éléments de nature matérielle (matériel expérimental, cahier, tableau), conceptuelle (consigne, définitions, etc.) et sociale (enseignant, élève). Le sens du savoir (enseigné et de l'élève) est « situé » par rapport aux situations proposées. La compréhension des élèves est donc dépendante de la situation. Ainsi, nous empruntons et adaptions certains aspects de la théorie des situations de Brousseau (1998) afin de spécifier certaines conditions pour créer des situations d'apprentissage favorables à la construction de connaissances par les élèves.

La prise en compte des éléments théoriques, tels que les situations adidactiques, la dévolution, l'institutionnalisation, le milieu, permet de cerner les rôles de l'enseignant et de l'élève relativement au savoir. La conception d'une situation adidactique implique de placer l'élève dans une relation privilégiée avec le savoir. L'élève devient responsable du problème à résoudre, la réponse au problème ne doit dépendre que de ses connaissances et de l'organisation de la situation constituée par exemple d'une consigne, du matériel expérimental, de ressources informationnelles (documents papier présentant le modèle scientifique à mettre en œuvre dans la tâche proposée). Ces situations organisées par l'enseignant sont donc censées « *provoquer chez l'élève les adaptations souhaitées (de ses connaissances premières ou précédemment enseignées), par un choix judicieux des problèmes* » (Brousseau, 1998, p. 58). Pour Brousseau, l'élaboration de situations d'apprentissage nécessite d'organiser un milieu qui produise des difficultés, contradictions, déséquilibres.

L'enseignant organise donc un milieu dénué d'intention didactique dans l'objectif que les rapports de l'élève avec ce dernier le conduisent à des comportements « *pertinents* » « *indices de l'appropriation du savoir* » (Brousseau, 1998, p. 93). L'élève interagit avec le milieu et l'interprétation de ses interactions influence son activité. L'apprentissage résulte donc de la qualité de l'interaction du sujet avec le milieu organisé.

De notre point de vue, le milieu correspond à l'environnement informatique médiateur de l'activité des élèves. Ce milieu dit « informatique » doit alors :

- fournir aux élèves des feed-back pertinents sur leurs actions⁴,
- fournir aux élèves les savoirs scientifiques : rôle d'institutionnalisation du milieu,
- rendre responsables les élèves de la tâche à réaliser, favoriser l'autonomie des élèves : aspect « dévolutif » du milieu.

Ainsi, nous considérons que le milieu « informatique » doit au moins jouer deux rôles :

- 1. Le milieu favorise la dévolution, le travail autonome de l'élève. Pour cela :
 - a. il encourage les élèves à réaliser la tâche,
 - b. il permet la répétition des stratégies « *ce qui le (l'élève) rend de plus en plus conscient de ce qui le pousse à agir* » (Margolinas, 1993, p. 117) et la modification des stratégies de résolution,
 - c. il fournit aux élèves un moyen de tester régulièrement leurs solutions, leurs prédictions,

- d. il propose la même situation ou une nouvelle dans le cas où la réponse de l'élève serait « erronée » : l'erreur étant considérée constitutive du processus d'apprentissage ;
- 2. Le milieu joue un rôle d'institutionnalisation :
 - a. il précise le savoir que les élèves sont censés posséder,
 - b. il donne un statut officiel aux actions des élèves, à leur réponse en relation au savoir en jeu.

Pour un même objet de savoir à enseigner, qui met en jeu différents systèmes sémiotiques, il est donc nécessaire d'organiser diverses situations. Ainsi, nous supposons qu'il faut faire varier les caractéristiques des situations pour favoriser un apprentissage conceptuel des élèves.

2.4. En conclusion

L'originalité d'un tel cadre théorique est de servir de base pour concevoir l'hypermédia et pour analyser l'activité des élèves. De plus, nous tenons à souligner que ces trois axes théoriques ne sont pas isolés les uns des autres mais imbriqués. Caractériser le « milieu » (Brousseau, 1998) va nécessiter de prendre en compte les aspects sémiotiques et le processus de modélisation. Par exemple, l'élément du milieu « énoncé du problème » est en langue naturelle (système sémiotique) et peut relever de différents niveaux de savoir. Nous considérons aussi que l'activité de modélisation de l'élève sera favorisée par son activité sémiotique et par les diverses actions qu'il effectue avec les différents éléments composant le milieu « informatique ».

Ainsi, ces « outils » théoriques permettent de concevoir des situations d'enseignement favorisant *a priori* l'activité de modélisation, l'activité sémiotique de l'apprenant et les rétroactions du milieu. Toutefois, leur conception nécessite de tenir compte de contraintes informatiques et ergonomiques lesquelles sont imbriquées avec celles issues des hypothèses d'apprentissage présentées ci-dessus. En effet, la prise en compte de résultats de recherche en ergonomie des interfaces et en psychologie de l'éducation, sur les difficultés d'un utilisateur à lire des informations à l'écran (Rouet, 1997), à naviguer et à se repérer (Conklin, 1987 ; Foss, 1998 ; Tricot, 1993), à identifier les informations sur un écran (travaux sur l'espace et la densité des informations à l'écran, Van Nes, 1986 ; Caro & Betrancourt, 1998 ; Scapin, 1986) et sur les effets de la disposition des informations à l'écran (Caro & Betrancourt, 1998) associée aux contraintes liées aux hypothèses d'apprentissage, conduisent, par exemple, à découper les séquences d'enseignement initiales (format papier) en tâches bien distinctes

(une tâche par page-écran), à élaborer de nouvelles consignes, à envisager parfois de nouvelles tâches, à envisager une navigation de l'utilisateur en relation avec l'ordre d'introduction des concepts scientifiques (voir partie 3).

3. DU CADRE THÉORIQUE À LA CONCEPTION DE L'HYPERMÉDIA

L'hypermédia « Labdoc Son et vibrations », co-élaboré avec la société Jeulin⁵, est dédié à l'enseignement du son en conformité avec les directives du bulletin officiel (BOEN, 1992) pour des élèves en classe de seconde. Il se compose de « cinq lieux » : (1) une salle de travaux pratiques (TP) comportant cinq séances de TP, (2) une salle d'expériences libres proposant une liste de protocoles en lien avec le savoir à enseigner et le logiciel « Sonorama », permettant de visualiser un signal électrique acquis par un microphone, (3) une salle de cours, (4) une salle d'exercices et (5) une bibliothèque. La familiarité des élèves avec ces lieux peut les encourager à s'y référer régulièrement (Guéraud *et al.*, 1993). Le cadre théorique de référence a été utilisé principalement pour concevoir les différentes séquences d'enseignement proposées dans la salle de travaux pratiques et certains types de ressources. De plus, l'activité expérimentale est centrale dans cet hypermédia. Nous considérons que c'est au travers de la réalisation des différentes séquences d'enseignement constitutives de la salle de TP que les élèves feront appel aux autres contenus (cours, dictionnaire, etc.) Enfin, la conception de ces séquences est issue d'un travail collectif dont l'une des productions fut un ensemble de travaux pratiques (TP SOC⁶) qui, de notre point de vue, comportent des caractéristiques essentielles pour la conception (Séjourné, 2001 ; Vince, 2000).

Dans cette partie, nous présentons les différentes contraintes de conception issues des trois « outils » théoriques pour organiser le savoir à l'écran et le milieu « informatique » : activité de modélisation, système sémiotique et certains aspects de la théorie des situations. Enfin, nous présentons notre *méthode de conception* synthétisée sous la forme d'une grille (section 3.4) permettant le passage des TP SOC (papier) à ceux qui sont présentés dans l'hypermédia.

3.1. Activité de modélisation et conception

L'hypothèse d'apprentissage en lien avec l'activité de modélisation constitue une première contrainte lors de la conception de l'hypermédia. Elle suppose que les concepts de physique prennent leur sens dans les mises en

relation réalisées par les élèves entre les différents niveaux de savoir et au sein d'un même niveau. Ceci conduit à une analyse des différentes séquences d'enseignement selon les niveaux de savoir. Ce qui nécessite de :

– C1. Vérifier la cohérence entre les niveaux de savoir présents dans la tâche et son objectif d'enseignement (décrire un événement, prédire, interpréter, réaliser une mesure, etc.) Cela permet d'éviter d'élaborer des tâches dont l'énoncé, par exemple, comporterait des éléments d'ordre théorique qui n'ont pas la nécessité d'être présents. Nous supposons que cela peut aider les élèves à mobiliser des connaissances relatives aux niveaux de savoir attendus ;

– C2. Désimbriquer et désigner les éléments d'ordre théorique (objet de l'enseignement) et ceux relatifs aux « objets événements » (Vince, 2000). Cela permet aux élèves d'apprendre à distinguer ces deux types d'information ;

– C3. Vérifier que les niveaux de savoir impliqués dans la question correspondent aussi à ceux que les élèves doivent mobiliser lors de la réalisation de la tâche (Bécu-Robinault, 1997). Par exemple, si l'on souhaite que les élèves mettent en œuvre le niveau des objets/événements, il est important que la question relève uniquement de ce niveau ;

– C4. Proposer des tâches qui encouragent les mises en relation entre les niveaux de savoir ;

– C5. Élaborer des ressources informationnelles qui peuvent favoriser les mises en relation entre les niveaux de savoir.

Nous illustrons ces diverses contraintes à partir de deux exemples. Le premier présente comment nous sommes passés des séquences d'enseignement des TP SOC (papier) aux séquences de TP dans l'hypermédia. Nous décrivons l'analyse d'une partie du contenu de la tâche « *Une condition nécessaire à l'émission d'un son* » en respectant les contraintes C1 et C3 et sa transformation en trois pages-écrans. Le second exemple fournit une analyse des cinq premières tâches de la première séquence de TP de l'hypermédia en tenant compte des contraintes C2, C3, C4.

3.1.1. Exemple 1 : analyse et transformation d'une consigne à partir des contraintes C1 et C3

Prenons la consigne suivante proposée dans la première séquence d'enseignement des TP SOC (format papier). L'objectif de cet enseignement est d'amener les élèves d'une part à prendre conscience du lien entre le phénomène sonore perçu, le son, et le phénomène physique associé : la vibration de la source de son, et d'autre part à donner sens à la vibration, terme « cache-misère » pour les élèves (Vince, 2000). Les élèves vont donc

réaliser une série d'expériences (expérience du diapason, du sifflet à papier à cigarettes, instrument à cordes, tambourin, etc.) puis décrire l'événement observé, enfin déterminer le phénomène commun à l'ensemble des sources de son. Dans notre exemple, nous nous limitons au cas de l'expérience du diapason (figure 3).

(...)

1.1. Une condition nécessaire à l'émission d'un son

Vous allez réaliser les expériences suivantes et essayer de trouver une condition nécessaire à l'émission d'un son.

Question pour chaque expérience :

Nommez la source du son et expliquez en quelques lignes et éventuellement avec un schéma le comportement de la source.

– **Diapason :** On frappe le diapason avec la baguette, on l'approche de la boule du pendule jusqu'au contact. Observer le comportement du pendule.

Remarque : On peut mettre le pendule au contact du diapason après avoir frappé celui-ci.

(...)

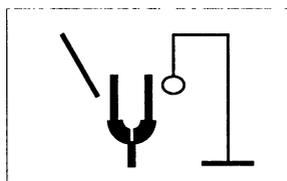
Figure 3 • Consigne de la tâche proposée par le groupe SOC

Du point de vue de la modélisation, l'analyse de la consigne de la tâche initiale en tenant compte des objectifs d'enseignement et en termes des niveaux de savoir permet de distinguer *trois tâches* à réaliser par les élèves : observations de l'expérience, désignation de la source de son et description par écrit de l'événement observé et perçu. Ces tâches relèvent uniquement du « champ expérimental ». La prise en compte de la contrainte de conception C1 couplée aux contraintes ergonomiques liées à l'espace et à la densité d'informations à l'écran et à la disposition des informations à l'écran conduit à :

– élaborer trois pages-écrans dont les informations relèvent uniquement du « champ expérimental » (texte, vidéo, image, etc.),

– créer une consigne pour chacune des tâches en vérifiant que les niveaux de savoir impliqués dans la consigne correspondent aussi à ceux que les élèves doivent mobiliser lors de la réalisation de la tâche (contrainte 3),

– donner un titre à chacune des tâches : Observation, Détermination de la source, Description.



Nous présentons ci-dessous les pages-écrans élaborées et proposées dans la première séquence d'enseignement de l'hypermédia (figures 4, 5 et 6).

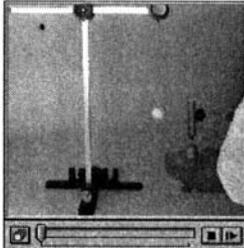
<p>TP1 Expérience du diapason</p> <p><i>Observation</i></p> <p>A partir de la vidéo ci contre, observer le comportement de la balle suspendue, au moment où elle est en contact avec le diapason préalablement frappé avec le marteau.</p> <p>N'oubliez pas de regarder l'animation en cliquant sur la tortue.</p> 	<p>Vidéo de l'expérience du diapason</p>  <p>Légende La tortue : ralenti animé de l'expérience sans perception sonore</p> <p>Matériel utilisé Diapason, pied, balle</p>
--	--

Figure 4 • Tâche 1 « Observation de l'expérience à partir d'une vidéo »

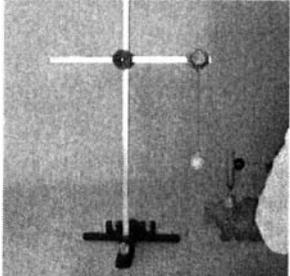
<p>TP1 Expérience du diapason</p> <p>Déterminer la source de son en cliquant sur l'image.</p> <p>La réponse est donnée dès que vous cliquez sur l'image alors concentrez vous avant de répondre !!</p> 	<p>Photo de l'expérience</p> 
--	--

Figure 5 • Tâche 2 « Désignation de la source en la sélectionnant sur l'image »

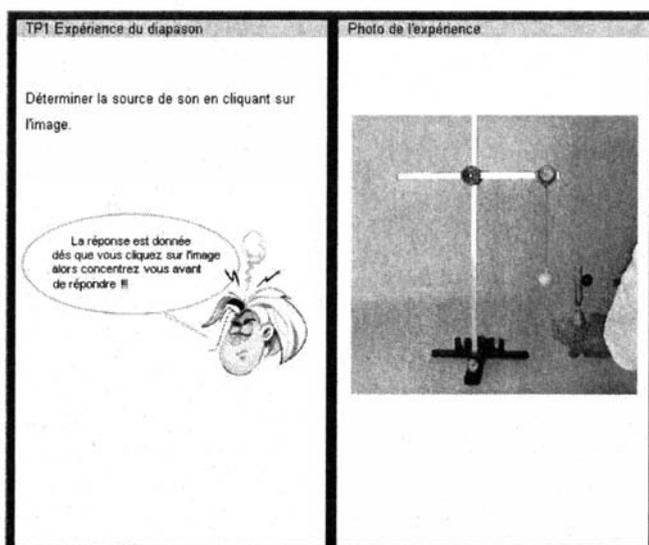


Figure 6 • Tâche 3 « Description de l'événement en rédigeant un texte »

3.1.2. Exemple 2 : organisation de cinq tâches selon les niveaux de savoir

Ce second exemple met en évidence principalement la prise en compte des deux contraintes C2 et C4. Dans le tableau 2, nous présentons l'analyse, selon les niveaux de savoir, des informations proposées dans les cinq premières tâches de la première séquence d'enseignement de l'hypermédia. Nous ajoutons aussi les niveaux de savoir que les élèves sont censés mobiliser pour réaliser la tâche afin de voir la cohérence avec la contrainte 3.

La comparaison entre les niveaux de savoir présents dans la consigne ou page-écran, les objectifs d'enseignement et les niveaux de savoir que les élèves sont censés mobiliser montrent la prise en compte des contraintes C1 et C3. De plus, nous pouvons observer la « désimbrication » des aspects théoriques (tâche « Définition de la fréquence et de l'amplitude »), objectif de l'enseignement, des aspects faisant intervenir les objets/événements. Nous répondons ainsi à la contrainte C2. Enfin, les tâches T3, T4, T5 demandent aux élèves de construire des relations entre les niveaux de savoir. Ce dernier point constitue une réponse à la contrainte C4.

Cependant, la lecture des objectifs d'enseignement montre que le savoir enseigné est introduit dans un ordre bien défini : concept de vibration, puis de fréquence et d'amplitude. De ce fait, la navigation entre les tâches est linéaire. En effet, nous considérons que l'introduction des concepts scienti-

fiques doit se faire d'une manière *séquentielle* avec des retours en arrière possibles par l'élève.

N° Tâche	Intitulé de la tâche	Objectif d'enseignement	Niveaux de savoir présents dans la consigne/page-écran	Niveaux de savoir que les élèves doivent mobiliser
T1	Activités expérimentales	Savoir que le son peut être produit par un solide dont une partie vibre à partir de l'étude de différentes sources	Champ expérimental	Champ expérimental (CE)
T2	Définition de la fréquence et de l'amplitude	Introduire les concepts de fréquence et d'amplitude	Théorie-modèle (TM) Objets et événements simulés (simulation) (OES)	Théorie-modèle (TM) Relation entre la théorie-modèle et les objets événements simulés (Re(TM-OES))
T3	Mesure de la fréquence	Réaliser une mesure de la fréquence à partir d'une simulation	TM OES (en relation avec la simulation)	TM Re(TM-OES)
T4	Mesure de l'amplitude	Réaliser une mesure de l'amplitude à partir d'une simulation	TM OES (en relation avec la simulation)	TM Re(TM-OES)
T5	Test "Fréquence et amplitude"	Comparer les grandeurs fréquence et amplitude à partir de deux simulations	TM OES (en relation avec la simulation)	TM Re(TM-OES)

Tableau 2 • Description des tâches de la première séquence d'enseignement selon les niveaux de savoir

Abréviation	Signification
TM	Théorie-modèle
OES	Objets événements simulés
Re(TM-OES)	Relation externe entre théorie-modèle et Objets événements simulés
CE	Champ expérimental

Cette séquentialisation a l'avantage de proposer une organisation progressive des savoirs relative aux difficultés des élèves, à leurs besoins, en les amenant à construire du sens dans un certain ordre à partir de mises en scène élaborées à cet effet, de tâches successives et répétitives. La navigation non-linéaire est réservée principalement à la recherche d'informations. Ainsi, la nature de la navigation est liée aux choix pédagogiques et didactiques en amont de la conception.

3.2. Systèmes sémiotiques et conception

Lors de la conception de l'hypermédia, nous utilisons six systèmes sémiotiques. Nous les présentons successivement à partir d'un exemple :

- la langue naturelle : un texte,
- l'image : une représentation de la réalité (photographie, illustration),
- la représentation symbolique : une formule mathématique, une équation,
- le dessin légendé : une représentation schématique ou graphique assortie d'un titre ou d'étiquettes,
- la représentation graphique : un graphe d'une fonction dans un repère, un oscillogramme,
- la représentation dynamique : une vidéo d'expérience, une animation, une simulation.

L'hypothèse d'apprentissage en lien avec les systèmes sémiotiques constitue une contrainte lors de la conception de l'hypermédia. Elle suppose que les relations construites par les élèves entre les diverses représentations favorisent la construction du sens d'un concept en jeu dans la tâche proposée. Cela conduit à :

- C6. Élaborer des tâches favorisant la coordination des représentations du savoir ;
- C7. Proposer diverses représentations pour un même concept ce qui peut aider à acquérir le sens dudit concept ;
- C8. Diversifier les situations expérimentales ou de la vie quotidienne ;
- C9. Diversifier les modes de production des réponses comme la langue naturelle, la représentation symbolique et la représentation graphique (exemple partie 4).

3.3. Situations d'apprentissage et conception

La conception de situations d'apprentissage va consister à élaborer un milieu « informatique » pouvant favoriser à la fois le processus de dévolution et le processus d'institutionnalisation. Lors de la conception d'un hypermédia, le milieu correspond à l'environnement informatique médiateur de l'activité des élèves. Ce milieu dit « informatique » doit alors :

- fournir aux élèves des « feed-back » pertinents sur leurs actions,
- fournir aux élèves les savoirs scientifiques : rôle d'institutionnalisation du milieu,

– rendre responsables les élèves de la tâche à réaliser, favoriser leur autonomie : aspect « dévolutif » du milieu.

Nous présentons dans le tableau 3 les éléments du milieu relatifs à la dévolution et à l’institutionnalisation.

Éléments du milieu « informatique » liés au processus de dévolution		Éléments du milieu « informatique » liés au processus d’institutionnalisation	
Ne dépendant pas des actions des élèves	Dépendant des actions des élèves	Ne dépendant pas des actions des élèves	Dépendant des actions des élèves
La consigne	Les feed-back peuvent entretenir la réalisation des tâches : Les messages suite à une demande de validation de la réponse entretiennent la réalisation de la tâche	Les tâches synthèses résumant les concepts impliqués dans la séquence d’enseignement	Les réponses du professeur désignent la connaissance que les élèves devront apprendre
La situation expérimentale proposée (chanteuse)	Le système d’évaluation qui permet d’évaluer seul les réponses en terme d’échec et de réussite	Les tâches présentant les objectifs de la séquence d’enseignement	Le système d’évaluation donne un statut officiel aux réponses des élèves
	La possibilité de donner des réponses multiples		Les ressources informationnelles
	Les interactions possibles avec les simulations permettant de vérifier certaines prédictions.		
	Les ressources informationnelles		

Tableau 3 • Élaboration des éléments du milieu « informatique » en relation avec le processus de dévolution et d’institutionnalisation

3.4. En conclusion

Nous regroupons dans la grille suivante (tableau 4) les principales contraintes de conception issues des différentes hypothèses d’apprentissage présentées précédemment.

À partir de cette grille, il est possible de diversifier les caractéristiques des situations d’enseignement/d’apprentissage et d’adapter des séquences d’enseignement traditionnelles. Nous ajoutons que c’est à partir de cette grille que nous avons conçu les diverses tâches proposées dans l’hypermédia, ainsi que les ressources informationnelles associées. Ces tâches (77 au total) sont réparties dans cinq séquences d’enseignement :

- introduction à la chaîne sonore,
- TP1 : les sources de son et leurs effets sur la perception sonore,
- TP2 : le milieu de propagation,

- TP3 : la propagation du son dans l'air,
- TP4 : deux des grandeurs caractéristiques du son (hauteur et volume).

Les hypothèses d'apprentissage conduisent à			
Analyser le savoir enseigné en relation avec l'activité de modélisation	Analyser le savoir enseigné selon des systèmes sémiotiques	Élaborer des éléments du milieu liés au processus de dévolution	Élaborer des éléments du milieu liés au processus d'institutionnalisation
- élaborer des tâches encourageant l'articulation entre les niveaux de savoir ;	- élaborer des tâches favorisant la coordination des représentations du savoir ;	- le système d'évaluation qui permet d'évaluer seul les réponses en terme d'échec et de réussite ;	- les réponses du professeur désignent la connaissance que les élèves devront apprendre ;
- « désimbriquer » les aspects théoriques enjeux de l'enseignement ;	- proposer diverses représentations pour un même concept (en plus de la langue naturelle) ;	- la possibilité de donner des réponses multiples entretenant la réalisation de la tâche ;	- le système d'évaluation donne un statut officiel aux réponses des élèves ;
- vérifier la cohérence entre les niveaux de savoir présents dans la tâche aux objectifs d'enseignement ;	- diversifier les modes de production des réponses (langue naturelle, écriture symbolique...);	- les interactions possibles avec les simulations permettant de vérifier certaines prédictions ;	- les tâches synthèses résumant les concepts impliqués dans la séquence d'enseignement ;
- vérifier que les niveaux de savoir impliqués dans la question correspondent aussi à ceux que les élèves doivent mobiliser ;	- diversifier les situations expérimentales et de la vie quotidienne.	- les feed-back qui peuvent entretenir la réalisation des tâches : les messages suite à demande de validation de la réponse ;	- les tâches présentant les objectifs de la séquence d'enseignement ;
- élaborer des ressources informationnelles en relation avec les difficultés conceptuelles des élèves.		- la consigne, les situations expérimentales ;	- les ressources informationnelles.
		- les ressources informationnelles.	

Tableau 4 • Grille de conception des situations proposées dans un hypermédia en physiques

Nous présentons dans la partie suivante un exemple d'analyse de l'activité des élèves en montrant l'importance de varier les caractéristiques des situations mettant en jeu un même objet de savoir afin de favoriser la construction de sens dudit savoir.

4. ANALYSE DE L'ACTIVITÉ DES ÉLÈVES

Nous souhaitons montrer la nécessité de varier les caractéristiques des situations d'enseignement mettant en jeu un même objet de savoir afin de favoriser l'apprentissage conceptuel. Pour cela, nous présentons tout d'abord les tâches réalisées par les élèves, puis la méthodologie d'analyse mise en œuvre, enfin, l'analyse de l'activité des élèves.

4.1. Présentation des tâches et analyse *a priori*

Les deux tâches étudiées se situent dans la cinquième séquence d'enseignement (TP4) proposée dans la salle de travaux pratiques du logiciel. Cette séquence porte sur l'étude de deux des propriétés du son, la hauteur et le volume, en relation avec les grandeurs caractéristiques de l'onde sonore : la fréquence et l'amplitude. Les tâches choisies sont les tâches T21 « Expérience 2 » et T22 « Expérience 3 » du TP4 dont l'objectif est de décrire l'évolution des grandeurs caractéristiques de l'onde sonore en termes de fréquence et d'amplitude au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la source de son. Elles sont censées conduire les élèves à mettre en relation les niveaux de la « théorie-modèle » avec le « champ expérimental » (tâche 21) ou les « objets-événements simulés » (tâche 22). Comme nous le verrons, ces deux situations diffèrent par les situations expérimentales proposées, les modalités de réponses en termes de systèmes sémiotiques à utiliser et par les ressources informationnelles proposées.

La tâche 21 (figure 8) demande d'interpréter cette évolution, à partir d'une situation de la vie quotidienne (dans un village), en utilisant la langue naturelle. Les élèves doivent déterminer les grandeurs caractéristiques du son, émis initialement par une cloche, selon la position de deux récepteurs (les deux individus Cardé et Polo) en sélectionnant l'une des solutions proposées telles que : « *l'amplitude de l'onde sonore sera plus petite chez Cardé qu'au niveau de la source de son* ». Dans cette tâche, nous souhaitons que les élèves interprètent la situation en se référant aux éléments du modèle : amplitude et fréquence. Ces éléments ont été introduits dès la première séquence d'enseignement et rappelés dans cette dernière. En fait, nous désirons que les élèves mettent en relation le niveau de la « théorie-modèle » et celui des « objets/événements ». Cela correspond à une interprétation du phénomène sonore à partir de grandeurs caractéristiques de la vibration. Il faut signaler que lors de la tâche 20 (figure 7) les élèves explicitent cette évolution à partir de la même situation de la vie quotidienne, en fonction de la hauteur et de l'intensité sonores comme par exemple « *le son de la cloche entendu chez Cardé sera plus faible que celui qui est émis* ». Dans ce cas, les élèves mobilisent des connaissances liées aux « objets/événements ».

Lors de la tâche 22 (figure 9), il s'agit d'interpréter l'évolution des grandeurs caractéristiques de l'onde sonore, à partir d'une situation expérimentale, en utilisant la représentation graphique (correspondant à un oscillogramme). Il est demandé aux élèves de déterminer la forme de la tension électrique en fonction du temps (l'oscillogramme) aux bornes de deux microphones plus ou moins distants d'un émetteur (le haut-parleur). Nous nous attendons à ce que les élèves mettent en relation les niveaux de savoir de la

« théorie-modèle » avec celui des « objets-événements simulés » (oscillogramme de l'oscilloscope). Nous soulignons que lors des tâches précédemment réalisées dans cette séquence, les élèves se sont familiarisés avec la représentation graphique.

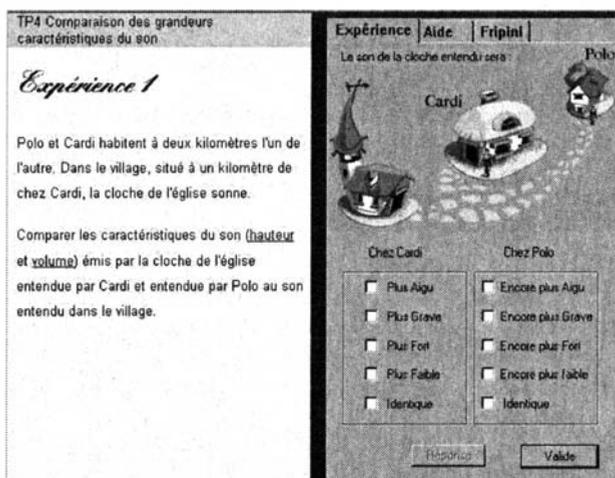


Figure 7 • Tâche 20 « Expérience 1 » du TP4 proposée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

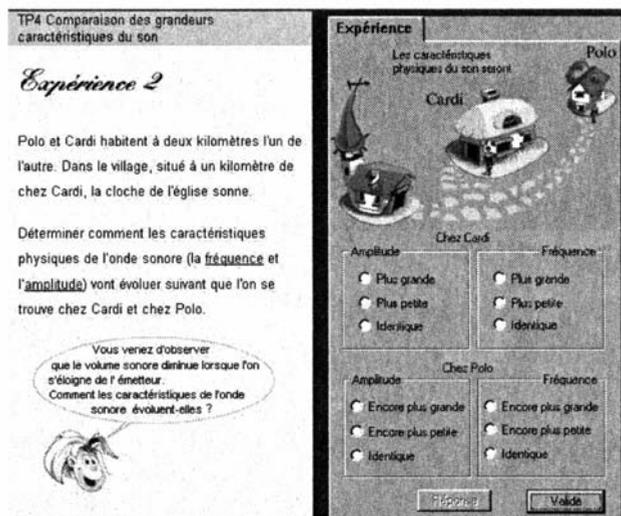


Figure 8 • Tâche 21 « Expérience 2 » du TP4 proposée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

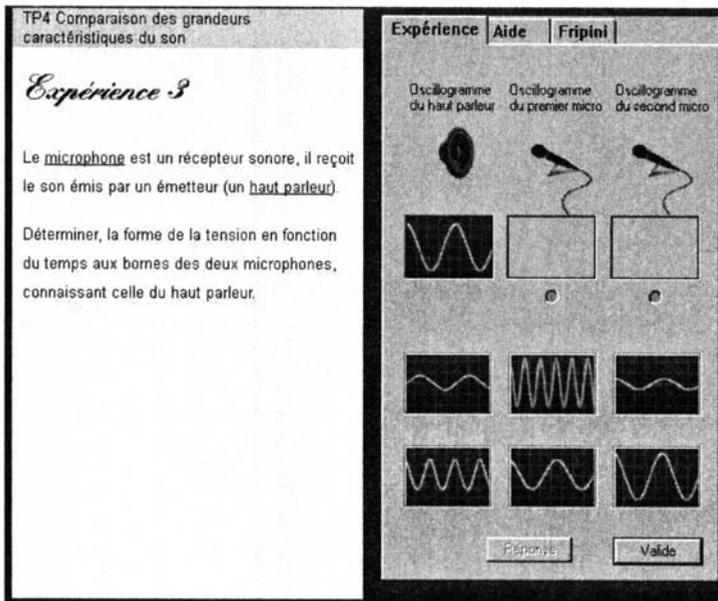


Figure 9 • Tâche 22 « Expérience 3 » du TP4 proposée dans l’hypermédia Labdoc Son et Vibrations

L’objectif commun des tâches 21 et 22 consiste à décrire l’évolution des grandeurs caractéristiques de l’onde sonore en termes de fréquence et d’amplitude au fur et à mesure que l’on s’éloigne de la source de son. L’analyse *a priori* a conduit à considérer que les élèves lors de la réalisation de ces deux tâches, mettent en relation les niveaux de savoir de la « théorie-modèle » (caractéristiques physiques de l’onde sonore) avec celui du « champ expérimental » (perception sonore liée à la position du récepteur).

Les principales différences entre ces deux tâches se situent au niveau des situations expérimentales proposées, des systèmes sémiotiques à utiliser pour répondre et des ressources informationnelles. Pour la tâche 21, la situation expérimentale relève de la vie quotidienne, les élèves répondent en sélectionnant l’une des solutions en langue naturelle et les ressources informationnelles sont principalement un mini-dictionnaire et une information placée dans la demi page-écran de gauche rappelant le résultat de la tâche précédente : « Vous venez d’observer que le volume sonore diminue lorsqu’on s’éloigne de l’émetteur. Comment les caractéristiques de l’onde sonore évoluent-elles ? » Pour la tâche 22, la situation expérimentale se réfère à une expérience de physique, les élèves répondent en sélectionnant deux oscillogrammes (la représentation graphique) et les ressources informationnelles sont le mini-dictionnaire, deux « pop up »⁷ sur les termes

« microphone » et « haut-parleur » et enfin un onglet « Aide » (une fenêtre « Windows ») présentant différentes représentations pour les termes « microphone » (définition, dessin, animation), récepteur (définition), oscilloscope (définition, dessin), voir figure 10.

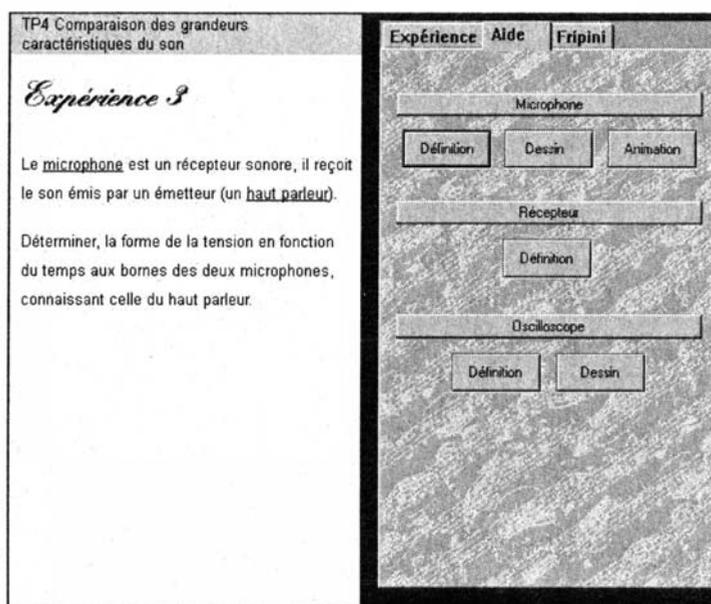


Figure 10 • Onglet « Aide » de la tâche 22 du TP4 proposée dans l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations

4.2. L'expérimentation

4.2.1. Condition de l'expérience

L'expérimentation s'est déroulée dans trois classes de Seconde de lycées différents situés dans l'agglomération lyonnaise. Les élèves (au total 40) ont été recrutés selon leur motivation pour réaliser trois séances d'enseignement avec l'hypermédia Labdoc Son et Vibrations. Ces séances ont duré environ 1 heure et demie et se sont déroulées durant la partie de l'année consacrée à l'enseignement sur le son. Les élèves étaient groupés par deux (20 dyades au total) car nous souhaitions recueillir leurs verbalisations pour les analyser, de plus les interactions verbales entre les élèves sont un support à la (co)-construction des connaissances (Baker, 1996). Ils étaient ainsi isolés des autres élèves et de leur professeur évitant tout échange verbal avec ces derniers. Pendant ce temps, les autres élèves réalisaient la

même séquence d'enseignement avec leur professeur sous forme de TP traditionnels sans l'hypermédia.

4.2.2. Les données recueillies

Lors des trois séances d'enseignement, nous avons filmé les élèves et enregistré leur dialogue. Le chercheur est toujours présent en tant qu'observateur. Les enregistrements audio sont entièrement retranscrits pour quatre dyades réalisant les trois séances. Les bandes vidéo permettent de compléter la transcription et de mettre en relation les actions des élèves avec leur discours. Notre analyse est basée principalement sur deux types de données : la transcription et la trace informatique. Notre développement informatique permet une transcription automatique au cours du temps des diverses actions d'un utilisateur au niveau de l'interface. Les actions enregistrées peuvent être la navigation, les réponses fournies, la nature des messages de validation. Nous appelons cet enregistrement automatisé, la *trace informatique*.

4.3. Méthodologie d'analyse

La méthodologie mise en œuvre consiste à comparer l'activité effective des élèves réalisant les différentes séquences proposées dans l'hypermédia à celle prévue lors de la conception et dans l'analyse *a priori*. Cette analyse permet de distinguer des « écarts » éventuels (Crozier, 1977) et de répondre à l'une de nos questions de recherche : *En quoi le fait de varier les caractéristiques des situations d'enseignement qui mettent en jeu un même objet de savoir peut-il favoriser l'apprentissage conceptuel ?* L'analyse des données issues, à la fois, de la trace informatique (transcription automatique des actions des élèves à l'écran) et des transcriptions des verbalisations des élèves issues d'enregistrements audio et vidéo conduit à l'articulation de deux niveaux d'analyse que nous nommons *global* et *local*.

4.3.1. Méthode de l'analyse globale

Cette méthodologie consiste en une analyse quantitative des données issues de la trace informatique résultant de l'activité des 20 dyades. Cette trace est ensuite transformée en base de données exploitable avec le logiciel Access. Notre objectif est de constituer des données supports de l'analyse globale. Pour cela, nous découpons la trace informatique (initialement un fichier texte) en trois catégories :

– catégorie temporelle : elle précise au cours du temps la chronologie des actions et la durée entre deux actions,

– catégorie spatiale : elle indique la tâche en cours, le lieu où elle est effectuée (salle de cours, salle de travaux pratiques, etc.) la tâche réalisée, et l'onglet utilisé,

– catégorie « diverses actions » : elle rassemble la plupart des actions effectuées lors de la réalisation d'une tâche c'est-à-dire les réponses tapées au clavier, cochées avec la souris, la sélection du bouton « demande de validation de la réponse », l'état de la réponse, etc.

Enfin, nous constituons une base de données exploitable avec le logiciel Access donnant la possibilité de comparer l'activité des 20 dyades lors de la réalisation des trois séances d'enseignement. Ainsi, en lien avec nos questions de recherche, nous élaborons quatre données : (1) *la durée de réalisation des tâches*, (2) *le nombre de réponses inexactes*, (3) *le nombre d'informations sélectionnées dans l'onglet Aide et la nature des informations sélectionnées* et (4) *les ressources informationnelles sélectionnées*. Ces données fournissent des éléments pour identifier par exemple les tâches qui posent des difficultés aux élèves, pour comprendre comment ils essayent de dépasser leurs difficultés conceptuelles, pour avoir un éclairage sur le temps d'apprentissage de certains concepts sur la globalité des trois séances d'enseignement, pour connaître les ressources informationnelles dont ils peuvent avoir besoin lors de la réalisation d'une tâche donnée.

4.3.2. Méthodologie de l'analyse locale

La méthodologie d'analyse mise en œuvre est construite à partir du cadre théorique présentée dans la première partie de l'article (partie 1). L'objectif est de décrire l'évolution de la construction du savoir par les élèves à partir de leurs verbalisations⁸. Cela consiste à identifier les connaissances mobilisées par les élèves et la manière dont ils les font fonctionner selon les caractéristiques des tâches, à expliciter de quelle manière les représentations sémiotiques présentes dans une page-écran et/ou dans les ressources informationnelles (aide, mini-dictionnaire, bibliothèque) peuvent soutenir l'activité de modélisation des élèves, à décrire comment le « milieu » informatique élaboré favorise la réalisation de la tâche en amenant les élèves à mobiliser les connaissances attendues. La réussite de la réalisation de la tâche est liée à la mobilisation de ces connaissances. Compte tenu de ces objectifs, notre méthodologie d'analyse se décompose en trois principales phases que nous présentons brièvement ci-dessous.

Σ Analyse des verbalisations des élèves selon les niveaux de savoir

Les connaissances verbalisées des élèves sont codées à partir de trois principales catégories (figure 11) qui rendent possible la comparaison des démarches de modélisation impliquées dans le savoir enseigné à celles

que l'élève met en œuvre. Le tableau 5 présente des exemples de codage des verbalisations pour un tour de parole donné (TdP) des élèves (A et B) selon les niveaux de savoir.

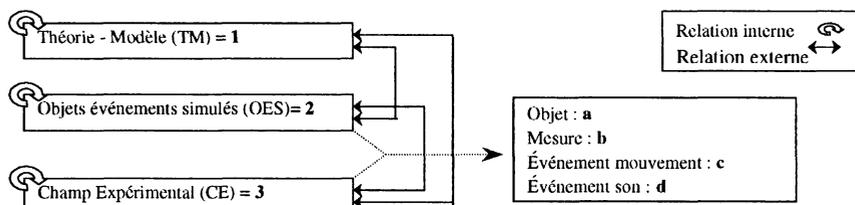


Figure 11 • Présentation schématique du codage à partir des niveaux de savoir

Niveaux de savoir	codage	Explicitation du codage	Exemple du corpus
Théorie-Modèle (TM)	1	Verbalisation se référant à la théorie-modèle : la fréquence	N°TdP 13 A « La fréquence euh l'amplitude là elle est grande là elle devient de plus en plus basse (...) »
Objets-événements simulés (OES)	2	Verbalisation se référant aux objets-événements simulés : compter le nombre d'aller-retour effectué par la membrane du haut-parleur simulé	N° TdP 69 A « En fait plus tu montes et plus ça vibre » (ils augmentent la fréquence et observe le mouvement de la membrane du haut-parleur simulé)
Re(TM-OES)	Re(1-2)	Verbalisation mettant en relation la théorie-modèle et les objets événements simulés : mise en relation entre la fréquence et le nombre d'aller retour	N° TdP 70 B « Ah ouais et à force ici ça vibre vite avec la fréquence de vibration »
Re(TM-CE)	Re(1-3c)	Verbalisation mettant en relation la théorie-modèle et le champ expérimental	N° TdP 4 B « L'amplitude de déplacement oui / c'est la différence entre le machin là et le maximal » (reformulation à partir de la schéma légendé)
Re(OES-CE)	Re(2a-3d)	Verbalisation mettant en relation les objets événements simulés et le champ expérimental	N° TdP 19 B « Eux ils disent que la particule elle a un son »
Champ expérimental (CE)	3c	Verbalisation se référant au champ expérimental	N° TdP 82 A « Tu as déjà mis / tu as déjà mis ta main sur un diapason quand il quand il sonne »

Légende du tableau 5

Abréviation	Signification
TM	Théorie-modèle
OES	Objets événements simulés
Re(TM-OES)	Relation externe entre théorie-modèle et Objets événements simulés
Re(TM-CE)	Relation externe entre théorie-modèle et champ expérimental
Re(OES-CE)	Relation externe entre les objets événements simulés et champ expérimental
CE	Champ expérimental

Tableau 5 • Exemples de codage des verbalisations des deux élèves A et B (TdP : tour de parole)

Σ Analyse des verbalisations des élèves selon les systèmes sémiotiques

À partir de notre cadre théorique, nous avons distingué six systèmes sémiotiques. Chacun de ces systèmes peut être utilisé pour exprimer des éléments de chacun des niveaux de modélisation. Les différents systèmes sémiotiques sont mis en œuvre *via* la langue naturelle.

NTdP	Locuteur	Intervention	Signification	Système sémiotique	Niveaux de savoir
27	A	Alors l'amplitude est plus petite	Lecture et sélection de l'une des réponses proposées dans le QCM	Langue naturelle (LN)	Théorie-modèle
50	A	Animation + et le deuxième micro il est plus loin en fait j'crois que j'ai compris y a un micro qui est près et un deuxième micro qui il est plus loin donc	Observation de l'animation et interprétation de la situation expérimentale proposée à partir d'une image	Représentation dynamique (RD) et image (I)	Champ expérimental

Tableau 6 • Exemples de codages des verbalisations des élèves lors de la tâche 21 et 22 (TdP : tour de parole)

Σ Analyse des verbalisations des élèves selon les éléments du milieu « informatique »

L'objectif de cette méthodologie est de décrire l'évolution des connaissances des élèves au cours de leurs interactions avec le milieu « informatique » (figure 12). Pour cela nous avons catégorisé certaines actions des élèves qui permettent de cerner leur activité lors de la réalisation d'une tâche donnée. Cela revient à identifier leur cheminement. Nous précisons que ce codage n'est pas très fin mais tient compte de la plupart des éléments de la page-écran. Ainsi, la méthode d'analyse peut, selon le cas, consister à identifier selon les tours de parole les données suivantes : l'état de la réponse des élèves (bonne réponse ou réponse erronée), la lecture de textes (consignes), la navigation des élèves (de page-écran à page-écran), l'utilisation de ressources (onglet Aide par exemple).

4.4. Analyse de l'activité des élèves

4.4.1. Analyse globale

Cette première analyse permet d'étudier comment les 20 dyades évoluent lors des tâches 20, 21, 22 du TP4 selon les trois données : « durées de réalisation de la tâche », « nombre d'informations sélectionnées dans l'aide » et « nombre de réponses erronées »⁹.

N° dyade	1	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Durée Moyenne
Tâche 20																				
Nbre de réponses erronées	2	9	17	15			2	1					3	1		5	1		1	
Nbre d'appels à l'aide			6	3			3													
Durée de réalisation	1:50	2:29	11:43	7:57	1:47	1:09	4:27	1:57	1:55	6:17	2:35	1:17	2:47	2:09	2:05	3:28	2:45	2:02	1:15	3:15
Tâche 21																				
Nbre de réponses erronées											2									
Durée de réalisation	0:48	1:22	0:58	1:22	1:17	0:56	0:54	1:08	0:37	2:57	2:47	0:46	1:28	1:23	0:46	1:02	1:26	0:59	0:49	1:15
Tâche 22																				
Nbre de réponses erronées	2	1	1	1	2	1			1	1			2	5		1	1	1	1	
Nbre d'appels à l'aide	1						5			3									1	
Durée de réalisation	5:04	3:06	1:57	2:35	1:49	1:14	3:48	1:15	3:34	2:29	3:29	1:04	2:51	7:22	2:16	4:34	2:37	1:25	2:14	2:53

Tableau 7 • Comparaison de l'activité des élèves (19 dyades) lors des tâches T20, T21 et T22 du TP4

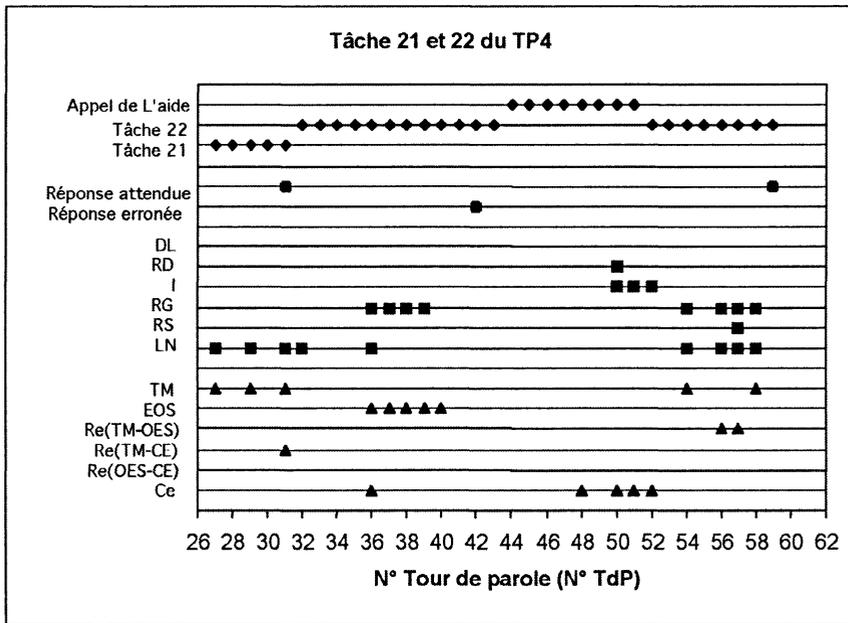
Légende : « 3 : 05 » signifie 3 minutes et cinq secondes.

À partir de ce tableau (dernière colonne du tableau 7), nous constatons d'abord que la durée moyenne mise pour réaliser la tâche 22 est supérieure à celle de la tâche 21 et est similaire à la tâche 20. Ensuite, le nombre d'élèves produisant au moins une réponse inexacte augmente de nouveau entre les tâches 21 et 22.

Ainsi, nous rappelons que la résolution successive de ces deux tâches (21 et 22) qui demandent de réinvestir un « même savoir » à partir de deux représentations différentes et dans le cadre de deux dispositifs expérimentaux, favorise l'émergence des difficultés conceptuelles des élèves. Ces dernières pourraient se situer au niveau soit du savoir en jeu soit des systèmes sémiotiques à utiliser pour donner la réponse (représentation graphique et langue naturelle) et du changement de la situation expérimentale proposée.

4.4.2. Analyse qualitative

Nous allons étudier le fonctionnement d'une dyade lors des tâches 21 et 22 du point de vue des connaissances mises en œuvre, de l'activité sémiotique et des ressources utilisées. Dans la figure 12, les élèves réalisent les tâches 21 et 22 de la façon suivante : des tours de parole 27 à 31 ils réalisent la tâche 21, des tours de parole 32 à 59 la tâche 22 au cours de laquelle ils vont dans l'onglet Aide des tours de parole 45 à 51.



Légende de la figure 12

Abréviation	Signification	Abréviation	Signification
TM	Théorie-modèle	LN	Langue naturelle
OES	Objets événements simulés	RS	Représentation symbolique
Re(TM-OES)	Relation externe entre théorie-modèle et Objets événements simulés	RG	Représentation graphique
Re(TM-CE)	Relation externe entre théorie-modèle et champ expérimental	I	Image
Re(OES-CE)	Relation externe entre les objets événements simulés et le champ expérimental	RD	Représentation dynamique
CE	Champ expérimental	DL	Dessin légendé

Figure 12 • Activité des élèves décrites à partir des niveaux de savoir, des systèmes sémiotiques, de la navigation (tâche 22, 21 et aide) et des réponses fournies au cours des tâches 21 et 22 du TP4

Ainsi, cette figure permet de visualiser le résultat de l'analyse des verbalisations des élèves selon les niveaux de savoir (de CE à TM), les systèmes sémiotiques (de LN à DL), la nature des réponses des élèves (réponse attendue et réponse erronée), la navigation des élèves (tâches 21 et 22) et l'utilisation de l'onglet Aide en fonction des tours de parole.

Au cours de la tâche 21 (figure 8), nous constatons que les élèves utilisent uniquement la langue naturelle pour élaborer leur réponse et ne se réfèrent pas à l'illustration dont ils ont déjà eu connaissance lors de la tâche 20. La modélisation de la situation en termes de fréquence et d'amplitude semble ne leur poser aucune difficulté.

N° TdP 27 A : « Alors l'amplitude est plus petite ».
28 B : « Hm hm ».

Lors de la tâche 22 (figure 9), l'activité des élèves se découpe en trois étapes liées à la navigation dans l'onglet Aide pour rechercher des informations.

Avant la navigation dans l'onglet Aide (TdP 32-44), la dyade mobilise principalement le niveau des « objets-événements simulés » et le système sémiotique la représentation graphique. En effet, les élèves sont en train de se familiariser avec cette nouvelle situation expérimentale, manipulent les oscillogrammes, semblent rechercher une relation entre les oscillogrammes et la situation expérimentale proposée.

N° TdP 33 A : « Oui j'ai pas compris faut faire quoi (?) ».
34 B : « Je sais pas / ben (... ?) enfin je sais pas t'as fais quoi (?) / non non attends ».
35 A : « (... ?) ».
36 B : « Attends le microphone +++ mais non mais faut mettre le truc il faut le coincer là non (?) » (truc = oscillogramme).
37 A : « Ben oui mais tu peux ».
38 B : « Ça se déplace » (ça = oscillogramme).
39 A : « Tu peux mettre tu peux mettre n'importe lequel » (lequel = oscillogramme).

Ainsi, ils ne réinvestissent pas les connaissances issues de la tâche précédente et donnent une première réponse inexacte (n° TdP 43).

Durant la phase de recherche d'information dans l'onglet Aide (figure 10), les élèves sélectionnent en particulier l'animation du microphone (qui montre l'évolution au cours du temps de la tension électrique aux bornes du microphone). Cette représentation conduit les élèves à mettre en relation la représentation de la situation expérimentale proposée dans la tâche avec

l'animation (TdP 50). Ils reconstruisent ainsi la situation expérimentale proposée (TdP 52) :

N° TdP 50 A : « Animation + et le deuxième micro il est plus loin en fait j' crois que j'ai compris y a un micro qui est près et un deuxième micro qui il est plus loin donc ».

51 B : « Mais on avait déjà le premier micro ».

52 A : « Oui donc d'accord alors / donc en fait c'est / entre les deux faut que se soit entre ça et ça » (ça = microphone).

En d'autres termes, dès que les élèves parviennent à se représenter le dispositif expérimental, ce que nous identifions au travers de la mise en œuvre du « champ expérimental » (n° TdP 50-52) lors de la sélection des informations dans l'onglet Aide, ils identifient le problème (n° TdP 50 A « *je crois que j'ai compris... »*).

Lorsqu'ils retournent dans la tâche, ils élaborent une solution en réinvestissant le modèle construit lors de la tâche 21 (n° TdP 54).

N° Tdp 54 A : « Faut que se soit la même fréquence / attends enlève tes doigts je vois rien ».

5. CONCLUSION

Suite à cette étude sur les quatre dyades, cette succession de tâches, où la représentation du savoir à mettre en œuvre varie ainsi que les situations expérimentales, est favorable à la construction du savoir car elle permet aux élèves :

- de se représenter un nouveau dispositif expérimental et de le mettre en relation avec celui des tâches précédentes,
- d'utiliser deux systèmes sémiotiques relatifs à un « même savoir » pour modéliser deux dispositifs expérimentaux,
- de revenir sur le modèle en jeu et de prendre conscience parfois de la difficulté de le réinvestir dans la nouvelle situation. Cela semble montrer la difficulté d'acquérir un savoir donné dans une durée assez courte.

Ainsi, dans cet article, nous venons de présenter un cadre théorique permettant l'organisation de situations d'enseignement en sciences physiques. Ce cadre théorique et en particulier les hypothèses d'apprentissage associées relatives au savoir et aux situations d'apprentissage ont conduit à la mise en place d'une méthode de conception et d'une grille

d'analyse de l'activité des élèves. Toutefois, même si nous avons seulement effleuré le sujet, l'organisation des situations sur un support informatique nécessite de prendre en compte les recommandations relatives à l'espace, à la densité informative à l'écran, au multifenêtrage, etc. Ces recommandations ont conduit par exemple à segmenter le texte initial, à élaborer de nouvelles consignes, de nouveaux titres associés à chaque activité. Nous avons pu aussi apprécier que ces contraintes sont imbriquées avec les contraintes issues des hypothèses d'apprentissage.

Enfin, suite à l'analyse de vingt dyades au cours de trois séances d'enseignement (Séjourné, 2001), nous souhaitons souligner qu'il est nécessaire pour concevoir un hypermédia éducatif de faire au préalable une analyse du savoir en jeu des points de vue de l'activité de modélisation et des systèmes sémiotiques : les systèmes sémiotiques et les représentations associées vont « médier » l'activité des élèves. Cette analyse est indispensable pour prendre en compte le fonctionnement cognitif de l'élève et l'aider ainsi à construire du sens.

NOTES

1. <http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/soc/son/son.html>

2. Le terme niveau n'introduit pas de hiérarchie dans le savoir : ce qui relève de la théorie ou du modèle n'est ni supérieur ni inférieur à ce qui relève du « champ expérimental » (Buty, 2000).

3. La production et l'utilisation d'une représentation sémiotique nécessitent l'acquisition des « règles de conformité » inhérentes à chacun des systèmes (Duval, 1995).

4. De notre point de vue, le feed-back est une rétroaction du système informatique en réponse à une action des apprenants qui peut influencer leurs actions telles que des réponses visuelles (texte, image, animation) et sonores.

5. Société de vente par correspondance de matériels expérimental en physique, chimie, biologie (www.jeuilin.fr).

6. Sept séquences de TP ont été produites par le groupe SOC, associant chercheurs et IPR, et enseignants du secondaire. Voir site de l'académie de Lyon :
<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/soc/son/son.html>

7. Pop up ou escamot : information intégrée dans une fenêtre qui n'apparaît que sous l'action de l'utilisateur.

8. Notre analyse des productions verbales des élèves ne distingue pas les productions verbales spontanées des élèves comme celles faites dans la vie quotidienne, des productions verbales plus élaborées utilisant un vocabulaire scientifique. Pour nous, les productions verbales des élèves permettent principalement d'identifier les connaissances que les élèves mobilisent durant la réalisation des différentes tâches proposées par le logiciel.

9. Dans cet exemple, la donnée « ressources informationnelles » n'apparaît pas car les élèves ne s'y réfèrent pas.

BIBLIOGRAPHIE

AINSWORTH S., WOOD D. & BIBBY P. (1996). *Co-ordinating multiple representations in computer based learning environments*. Proceedings of the European Conference on Artificial Intelligence and Education, Lisbonne.

AINSWORTH S.E. (1999). The fonction of multiple representations. *Computers & education*, n° 33, pp. 131-152.

ARTIGUE M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol. 9, n° 3, pp. 51-67.

BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éds.), *Actes du colloque « Élaboration et justification des modèles »*, vol. 1. Paris, Maloine, pp. 3-19.

BAKER M. (1996). Argumentation et co-construction des connaissances. *Interaction et cognitions*, vol. 2-3, n° 1, pp. 157-191.

BEAUFILS D., DUREY A. & JOURNAUX R. (1987). L'ordinateur en sciences physiques, quelles simulations ? In A. Giordan & J.-L. Martinand (Éds), *IX^{es} journées sur l'éducation scientifique*. Paris, université Paris VII, pp. 321-327.

BRUILLARD E. & DE LA PASSADIÈRE B. (1998). Fonctionnalités hypertextuelles dans les environnements d'apprentissage. In A. Tricot & J.-F. Rouet (Éds), *Hypertexte et hypermédia*. Paris, Éditions Hermès, pp. 95-122.

BÉCU-ROBINAULT K. (1997). *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques*. Thèse de doctorat, université Claude Bernard Lyon 1.

BROUSSEAU G. (1998). *Théorie des situations didactiques*. Textes rassemblés et préparés par N. Balacheff, M. Cooper, R. Sutherland & V. Warfield. Grenoble, La Pensée sauvage.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992). *Nouveaux programmes des Classes de seconde, première et terminale des Lycées, Tome 1 : Programmes de la classe de seconde générale et technologique. Hors-série du 24 septembre 1992*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.

BUTY C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique*. Thèse, université Lumière Lyon 2.

CARO S. & BÉTRANCOURT M. (1998). Ergonomie des documents techniques informatisés : expériences et recommandations sur l'utilisation des organisateurs para-linguistiques. In A. Tricot & J.-F. Rouet (Éds), *Hypertexte et hypermédia*. Paris, Éditions Hermès, pp. 123-138.

CONKLIN J. (1987). Hypertext : an introduction and survey. *Computer*, vol. 9, n° 20, pp. 17-41.

- CROZIER M. & FRIEDBERG E. (1977). *L'acteur et le système*. Paris, Seuil.
- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine, registres sémiotiques et apprentissages intellectuels*. Berne, Peter Lang.
- DUVAL R. (1996). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol. 16, n° 3, pp. 349-382.
- FOSS C.L. (1988). *Effective browsing in hypertext system*. Proceedings of RAIO 88. Cambridge, MA-MITT.
- GUÉRAUD V., PEYRIN J.-P., DAVID J.-P. & PERNIN J.-P. (1993). Environnements logiciels pour une intégration quotidienne de l'EAO dans l'enseignement. In B. de La Passadière & G.-L. Baron (Éds), *Hypermédiats et apprentissages 2*. Paris, INRP-EPI, pp. 85-96.
- MARGOLINAS C. (1993). *De l'importance du vrai et du faux*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- NIEDDERER H. & SCHECKER H.P. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in learning physics. In R. Duit, F. Goldberg & H. Niedderer (Éds), *Research for Physics Learning, Theoretical Issues and Empirical Studies*. Kiel, Institute for Physics Education, université de Kiel, pp. 74-98.
- PAQUELIN D. (1996). Les cartes concepts : outils pour les concepteurs et les utilisateurs d'hypermédia éducatif. In E. Bruillard, J.-M. Baldner & G.L. Baron (Éds), *Hypermédiats et Apprentissages 3*. Paris, INRP-EPI, pp. 85-96.
- ROUET J.-F. (1997). Le lecteur face à l'hypertexte. In *Apprendre avec le multimédia : où en est-on ?* Paris, Retz, pp. 165-180.
- SCAPIN D. (1986). Guide ergonomique de conception des interfaces Homme-Machine. *Rapport Technique de l'INRIA-Rocquencourt, n° 77*.
- SÉJOURNÉ A. (2001). *Conception d'un hypermédia et analyses de l'influence de l'organisation des contenus sur l'activité des élèves : le cas de « Labdoc Son et Vibrations »*. Thèse, université Lumière Lyon 2.
- SÉJOURNÉ A. & TIBERGHEN A. (2001). Conception d'un hypermédia en physique et étude des activités des élèves du point de vue de l'apprentissage. In E. de Vries, J.-P. Pernin & J.-P. Peyrin (Éds), *Hypermédiats et Apprentissages 5*. Paris, INRP-EPI, pp. 103-118.
- TIBERGHEN A. (1994). Modelling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp. 71-87.
- TIBERGHEN A. & MEGALAKAKI O. (1995). Characterization of modelling activity for a first qualitative approach to the concept of energy. *European Journal of psychology of Education*, vol. 4, pp. 369-383.
- TIBERGHEN A. (1999). *Learner's modelling activities in elementary physics learning*. Communication présentée au colloque Roles of Communication Interaction in Learning to model in Mathematics and Science, Ajaccio.
- TRICOT A. (1993). Stratégie de navigation et stratégies d'apprentissage : pour l'approche expérimentale d'un problème cognitif. In G.-L. Baron, J. Baudé & B. de La Passadière (Éds), *Hypermédiats et apprentissage 2*. Paris, INRP-EPI, pp. 21-38.
- VAN NES F.L. (1986). Space colour and typography on visual display terminals. *Behaviour and Information Technology*, vol. 5, n° 2, pp. 99-118.
- VENTURINI P. & VIEL L. (1996). Base de données hypermédia pour le programme d'électricité en seconde. In E. Bruillard, J.-M. Baldner & G.L. Baron (Éds), *Hypermédiats et Apprentissages 3*. Paris, INRP-EPI, pp. 211-224.

VIENNOT L. (1993). Temps et causalité dans les raisonnements des étudiants en physique. *Didaskalia*, n° 1, pp. 13-27.

VINCE J. (2000). *Approches phénoménologiques et linguistique des connaissances des élèves de 2^{nde} sur le son. Contribution à l'élaboration analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse, université Lumière Lyon 2.

VINCE J. & TIBERGHEN A. (2000). Simuler pour modéliser. Le cas du son. *Sciences et techniques éducatives*, vol. 7, n° 2, pp. 333-366.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier l'équipe COAST, et en particulier Andrée Tiberghien et Bernadette Pateyron pour leurs aides précieuses, les trois enseignants de sciences physiques des lycées Branly, Camus et St Exupéry sans qui les expériences ne se seraient pas réalisées. La société Jeulin pour avoir permis la réalisation du cédérom Labdoc Son et Vibrations. Enfin, je tiens à remercier Michael Baker pour toutes nos discussions.

Cet article a été reçu le 19 juillet 2002 et accepté le 17 décembre 2003.

Les connaissances professionnelles locales : le cas d'une séance sur le modèle particulaire

Local professional knowledge : the case of a session on a particule model

Ludovic MORGE

Équipe « processus d'action des enseignants »
IUFM d'Auvergne
36-38, avenue Jean-Jaurès
63400 Chamalières, France.

Résumé

Le travail présenté dans cet article contribue à une meilleure connaissance des savoirs et savoir-faire professionnels de l'enseignant en pointant l'existence de connaissances professionnelles locales spécifiques à une séance d'enseignement donnée. Pour repérer ces dernières, quatre enseignants de sciences ont mis en œuvre dans leur classe une séance identique issue de la recherche en didactique des sciences. Les séances, enregistrées et transcrites, sont ensuite analysées dans une perspective anthropologique. Ces savoirs et savoir-faire locaux ainsi repérés peuvent constituer de nouveaux contenus de formation.

Mots clés : *enseignement des sciences, connaissances professionnelles locales, phases de conclusion, formation des maîtres, simulation analysée.*

Abstract

This article contributes to a better approach of the teacher's knowledge and know-hows with a particular focus on the existence of specific knowledge and know-hows related to a given session. To find those, four science teachers have organized in their class a similar session stemming from the research on science didactics. These sessions have been recorded and transcribed then analyzed from an anthropological viewpoint. These local knowledge and know-hows once spotted may constitute new contents for teachers' training.

Key words : *science teaching, local professional knowledge, conclusion phases, teacher's training, analysed simulation of actions.*

1. INTRODUCTION

1.1. La gestion des situations d'enseignement issues de la recherche

Au cours des dernières décennies, plusieurs recherches menées dans le domaine de la didactique des sciences ont produit des séquences d'enseignement (Séré, 1985 ; Chomat *et al.*, 1988 ; Kaminski, 1989 ; Johsua & Dupin, 1989 ; Lemeignan & Weil-Barais, 1993 ; Robardet, 1997 ; Besson *et al.*, 2000 ; etc.) Étant diffusés dans les accompagnements de programmes (ministère de l'Éducation nationale, 1997), certains de ces produits de recherche deviennent des outils d'enseignement. Le professeur peut ainsi aborder certains contenus d'enseignement selon une nouvelle perspective. Mais, s'il n'est pas préparé à la gestion des séances issues de la recherche, l'enseignant risque de se tourner vers des modalités de gestion de type transmissif qui peuvent paraître plus simples parce que plus habituelles. La place importante donnée dans de nombreuses séances issues de la recherche à la participation des élèves crée des problèmes particuliers qui complexifient la conduite de la classe.

En effet, dans la plupart de ces séances, les élèves sont placés en situation de recherche et de production, ce qui introduit de l'incertitude dans le déroulement de la séance. Ce changement du rôle de l'élève s'accompagne d'une modification du rôle de l'enseignant qui doit, entre autres, enrôler les élèves dans la tâche, définir le problème et en faire partager le sens, faire expliciter les réponses des élèves, statuer sur leurs productions pour conclure, institutionnaliser le savoir. Dans notre recherche, nous nous intéressons plus spécifiquement aux phases de conclusion, moment d'interaction dont l'enjeu est d'accepter ou de refuser des productions d'élèves. Il

s'agit d'un moment clé de l'enseignement et de l'apprentissage. En effet, pendant ces phases de conclusion, les élèves prennent connaissance des modalités de contrôle de leurs productions à travers les arguments utilisés dans l'interaction (voir les techniques, figure 1). Ces modalités régulent et orientent la co-construction de savoirs et par-là, la construction individuelle des connaissances. Les opérations de contrôle peuvent être prises en charge par les élèves, mais elles s'effectuent toujours sous la responsabilité de l'enseignant. Ce dernier doit pouvoir, le cas échéant, proposer rapidement des arguments capables de conforter ceux d'un élève, de s'y opposer ou de pallier une absence d'argumentation des élèves. Cette recherche d'arguments est d'autant plus difficile pour l'enseignant que certaines productions sont inattendues et qu'il dispose généralement de peu de temps pour réagir.

Au cours d'une précédente recherche (Morge, 1997) nous avons conçu, réalisé et évalué une première formation d'enseignants visant à faciliter la mise en œuvre de ce type de séances. Le dispositif de cette formation s'inscrit dans le paradigme du praticien réflexif, largement diffusé dans de nombreux pays (INRP, 2001). Ce paradigme postule que le savoir professionnel n'est pas dans un rapport d'application avec les savoirs théoriques ou méthodologiques mais qu'il se construit dans l'action et la réflexion sur l'action. À partir de ce paradigme, se sont développés des dispositifs de formation dont l'activité centrale est l'analyse *a posteriori*, par l'enseignant, de sa propre pratique (Portugais, 1995 ; Saint-Georges, 1996 ; Morge, 1997 ; Boilevin, 2000). Ces dispositifs ont des limites dont le dépassement a en partie motivé la recherche présentée dans cet article.

1.2. Limites des formations par auto-analyse *a posteriori*

Dans le cadre d'une formation par l'auto-analyse *a posteriori*, l'enseignant ne progresse dans sa compétence à enseigner qu'après avoir enseigné. Il apprend après la conduite de la séance ce qu'il aurait pu ou dû faire pour la conduire. De plus, l'auto-analyse *a posteriori* restreint le choix du niveau des séances d'enseignement analysées à celui des classes dont l'enseignant est responsable. Enfin, les résultats fortement contextualisés de l'analyse ne sont pas exploités puisqu'ils ne peuvent pas être réinvestis dans des séances ultérieures, à moins de recommencer la même séance peu après l'analyse, ce qui est rarement possible. Dans ce type de formation, seules les compétences professionnelles transférables d'une séance à l'autre sont utiles et retiennent l'attention des protagonistes de la formation (l'enseignant, le formateur et le chercheur). Dans ce contexte, on comprend que les connaissances spécifiques à la gestion d'une séance particulière n'aient pas fait l'objet d'études.

Cet article se centre sur ces connaissances professionnelles locales et développe trois axes de réflexion. Le premier, à visée explicative, cherche à cerner les caractéristiques et les propriétés des connaissances professionnelles locales en précisant leur fonction et leur place au sein des connaissances professionnelles. Le deuxième, à visée descriptive, cherche à dégager quelques exemples de connaissances professionnelles locales à partir d'une étude de cas. Il s'agit d'une séance sur le thème du modèle particulière proposée à des élèves de 5^{ème} (cycle central) (grade 7). Les connaissances professionnelles dégagées s'inscrivent dans un cadre théorique et méthodologique que nous présenterons. Le dernier axe explore les perspectives ouvertes par cette étude sur le plan des contenus, des méthodes et des outils de formation.

1.3. Caractéristiques et propriétés des connaissances professionnelles locales

Étant donné le manque de recherches sur le sujet, il est encore difficile de définir précisément les connaissances professionnelles locales. Nous tentons néanmoins de mieux les cerner en les situant par rapport à d'autres compétences professionnelles puis en nous interrogeant à la fois sur les modalités de leur acquisition par les enseignants et sur leurs fonctions.

La littérature propose plusieurs typologies des connaissances mobilisées par l'enseignant dans l'exercice de son métier (Develay, 1994 ; Paquay, 1994 ; Durand, 1996 ; Tardif & Lessard, 1999, par exemple). Notre propos n'est pas ici de faire une typologie des typologies, mais plutôt de rechercher dans celles-ci la dimension globale ou locale des connaissances professionnelles. Les connaissances les plus transversales repérées dans les typologies voient leur domaine d'application s'étendre sur toutes les activités d'enseignement quelles que soient les disciplines. Il peut s'agir par exemple de connaissances sur le « *développement des élèves* » (Durand, 1996, p. 180) ou sur le « *domaine de la communication* » (Develay, 1994, p. 100). À un niveau de généralité inférieur, se situent les connaissances disciplinaires telles que les contenus à transmettre (Paquay, 1994 ; Durand 1996) ou les connaissances sur l'enseignement et l'apprentissage de la discipline (Develay, 1994 ; Durand, 1996). Le domaine d'application des connaissances professionnelles locales est, quant à lui, encore plus restreint puisqu'il se limite à une séance d'enseignement.

Nous pensons que les connaissances professionnelles locales, comme d'autres connaissances professionnelles enseignantes « *se construisent sous l'effet de l'enseignement* » (Durand, 1996, p. 183). Plus précisément, ces connaissances professionnelles locales pourraient être

construites selon deux modalités. La première, que nous qualifierons de théorique, consiste à appliquer, dans un contexte particulier, des savoirs ou savoir-faire généraux. Par exemple, lorsque l'enseignant prépare une séance, il peut en anticiper le déroulement en envisageant l'émergence de problèmes ou de certaines productions d'élèves en fonction des particularités de la séance : la tâche, le contenu abordé, le niveau des élèves, leurs conceptions. La deuxième modalité, que nous qualifierons d'empirique, consiste à réaliser effectivement la séance. Cette mise en œuvre permet à l'enseignant, non seulement de confirmer ou d'infirmer ses prévisions sur le déroulement, mais également de dégager de nouvelles connaissances professionnelles locales qui n'ont pas été inférées théoriquement. Pour nous situer parmi les typologies sus-citées, les connaissances professionnelles locales peuvent être, soit inférées à partir de la « *formation professionnelle à l'enseignement* », soit tirées de « *l'expérience du métier dans la classe et l'école* » (Tardif & Lessard, 1999, p. 368).

La fonction des connaissances professionnelles locales est, selon nous, d'affiner l'anticipation du déroulement d'une séance afin d'ajuster, de régler sa préparation ou sa gestion. Ainsi, à partir de cette anticipation, l'enseignant peut modifier légèrement la séance – l'ordre des activités, la formulation des consignes – ou adapter la façon dont il la gère. Ces modifications décidées sur la base d'anticipations constituent des rétrodictions (Maurice, 1996).

En attribuant aux connaissances professionnelles locales cette fonction d'anticipation et de réglage, nous pouvons expliquer la résistance au changement que montrent certains enseignants. En effet, le changement de séance pour aborder un même contenu est non seulement coûteux, puisqu'il faut reconstruire de nouvelles connaissances professionnelles locales, mais également risqué, puisqu'il faut gérer une séance dont l'anticipation est rendue difficile par le manque de ces mêmes connaissances. De plus, les enseignants ont du mal à abandonner une séance qui leur a demandé un long travail d'élaboration de connaissances professionnelles locales.

Si l'on attribue aux connaissances professionnelles locales la fonction d'anticipation et de réglage du déroulement de la séance, leur maîtrise est encore plus utile dans la gestion de séances dont le déroulement est rendu aléatoire par la participation des élèves. Pour cette raison, nous pensons que l'acquisition de connaissances professionnelles locales serait un moyen de faciliter, en formation initiale et continue, la mise en œuvre de séances issues de la recherche qui donnent une place importante à l'activité des élèves. À l'inverse, l'anticipation d'un cours magistral paraît plus aisée car son déroulement dépend presque uniquement de l'enseignant. Dans ce cas, les connaissances professionnelles locales jouent un moindre rôle.

Avant d'illustrer nos propos en repérant certaines connaissances professionnelles locales mobilisables dans une séance sur le modèle particulière, nous présentons les cadres théorique et méthodologique utilisés pour repérer ces connaissances.

2. MÉTHODOLOGIE ET CADRE THÉORIQUE DE LA RECHERCHE

Les enregistrements de cinq déroulements d'une même séance constituent les données brutes. Leur transcription est découpée en plusieurs unités avant d'être analysée. Cette analyse s'inspire fortement de l'approche anthropologique de Chevallard (1999). Elle vise à dégager des savoir-faire locaux mobilisables dans une séance et les savoirs qui les sous-tendent.

2.1. Conditions de recueil des données et découpage des transcriptions

Quatre professeurs de lycée et collègue en deuxième année d'IUFM ont enregistré dans leur classe le déroulement d'une séance sur le modèle particulière tirée des accompagnements des programmes. Cette séance est très fortement inspirée d'une recherche en didactique des sciences (Chomat *et al.*, 1988). Nous disposons de cinq enregistrements différents puisqu'un enseignant a réalisé la séance dans deux classes différentes. La transcription des enregistrements, assurée par le chercheur, est disponible sur Internet¹.

Préalablement à la mise en œuvre des séances, les enseignants en formation ont suivi deux cours de trois heures sur les phases de conclusion. Le premier cours, qui s'appuie sur une recherche précédente (Morge, 2001a), vise la distinction entre la validité et la véracité d'une production (figure 1). Cette présentation théorique est suivie d'une analyse de plusieurs extraits de séquences issus d'un ancien corpus (Morge, 1997). Le deuxième cours porte sur la séance du modèle particulière. À partir de l'accompagnement du programme (ministère de l'Éducation nationale, 1997), les enseignants se sont appropriés les différentes activités proposées aux élèves au cours de la séance d'enseignement ; ils ont discuté les options épistémologiques et didactiques présentées dans le document d'accompagnement ; ils ont élaboré un document présentant les activités de la séance (voir en annexe) en vue de le distribuer aux élèves ; et ils se sont interrogés sur la façon dont les productions d'élèves fournies dans l'accompagnement du programme pouvaient être acceptées ou refusées.

Après l'enregistrement et la transcription des séances, nous effectuons un découpage structurel emboîté des interactions (Vion, 1992). Ce type d'analyse structurelle rompt avec une approche linéaire de l'interaction dans la mesure où elle considère que chaque intervention se situe dans un groupe d'interactions plus large, qui lui-même s'inscrit dans un ensemble encore plus large d'interactions, etc. Cet emboîtement permet une lecture des interactions à différents niveaux. Chaque intervention est replacée dans son contexte défini par les niveaux supérieurs englobants. Ainsi, nous découpons tout d'abord la transcription en une série d'ensembles, chacun d'eux regroupant les interventions relatives à une même tâche. Chaque ensemble est ensuite découpé en sous-ensembles regroupant les interventions relatives à une même production d'élèves qu'il s'agisse de l'exposer, de la justifier, de la compléter ou de statuer sur celle-ci. Parmi ces différentes unités, nous isolons celle dont les interactions visent à accepter ou à refuser les productions. L'approche anthropologique de Chevallard (1999) est ensuite mobilisée pour analyser les phases de conclusion.

2.2. Approche anthropologique et analyse des phases de conclusion

Cette approche considère que « *toute activité humaine régulièrement accomplie peut être subsumée sous un modèle unique, que résume ici le mot de praxéologie* » (Chevallard, 1999, p. 223). Ce modèle organise les activités humaines en quatre niveaux. Le premier, celui de la tâche ou du type de tâche, décrit l'action (« monter un escalier », « calculer une somme », etc.) Le deuxième niveau, celui de la technique, correspond à la manière d'accomplir, de réaliser cette tâche. Une même tâche (par exemple : monter un escalier) peut être effectuée selon plusieurs techniques (debout ou à quatre pattes). Le troisième niveau, celui de la technologie, est celui du discours rationnel qui vient justifier la technique en assurant qu'elle permet bien d'accomplir la tâche. La technologie explique ou produit les techniques. Enfin, le quatrième niveau, celui de la théorie, « *reprend, par rapport à la technologie, le même rôle que cette dernière tient par rapport à la technique* » (ib., p. 227). Il constitue le niveau supérieur de justification, d'explication et de production. Une organisation praxéologique (tâche, technique, technologie, théorie) peut être ponctuelle, si elle s'applique à une tâche précise, ou globale, si elle s'applique à un genre de tâches.

Les deux premiers niveaux (tâche et technique) forment le bloc pratico-technique, également appelé savoir-faire. Les deux derniers (technologie et théorie) forment le bloc technologico-théorique, plus souvent appelé « savoir ». La distinction de ces deux blocs permet de séparer

clairement ce qui relève de l'action – tâche et technique – de ce qui relève du discours sur cette action – technologie et théorie –. Cette séparation rejoint la position du paradigme du praticien réflexif qui considère que le savoir professionnel n'est pas l'application de savoirs théoriques ou méthodologiques. Elle traduit le décalage qui peut apparaître entre le discours d'un enseignant sur sa pratique et sa pratique. Cette séparation rejoint également la position que nous avons développée dans un précédent article (Morge, 2001b) où nous avançons l'idée qu'en situation d'action, l'enseignant ne s'appuie pas nécessairement sur une réflexion d'ordre théorique pour prendre ses décisions, autrement dit, que le bloc pratico-technique fonctionne en autonomie par rapport au bloc technologico-théorique. En revanche, c'est principalement en situation de formation que l'activité réflexive offre la possibilité de construire un discours sur ces pratiques. En situation de réflexion sur l'action, le bloc technologico-théorique peut générer de nouvelles techniques mobilisables en situation d'action.

Chevallard (1999) articule, dans son analyse, l'organisation didactique et l'organisation mathématique en considérant à la fois l'activité de l'enseignant et l'activité mathématique. Pour notre part, nous nous centrons uniquement sur l'analyse de l'activité de l'enseignant et, plus précisément, sur la gestion des phases de conclusion. Appliquées à notre propre recherche, tâche, technique, technologie et théorie prennent des significations précises. En effet, la tâche analysée concerne l'acceptation ou le refus des productions d'élèves. La technique est ici le moyen utilisé pour accepter ou refuser ces productions, c'est-à-dire, l'argument avancé pour conclure. La technologie, discours qui explique la technique, devient la nature de l'argument avancé. Enfin, la théorie peut faire ici appel à des points de vue épistémologiques, didactiques et scientifiques pour expliquer, justifier ou éclairer la technologie.

L'approche anthropologique a été privilégiée dans cette recherche car elle est adaptée à notre problématique. Rappelons qu'ici nous explorons le champ des connaissances locales mobilisables et non pas le champ des connaissances effectivement mobilisées. Autrement dit, nous portons un regard extérieur sur l'activité de l'enseignant sans chercher à approcher les connaissances qu'il met effectivement en œuvre. Cette dernière question de recherche relève davantage d'une approche ergonomique, s'appuyant sur des entretiens d'auto-confrontation, telle que la développent par exemple Flavier *et al.* (2002) et Goigoux (2002).

Nous avons également choisi d'utiliser l'approche anthropologique de Chevallard parce qu'elle intègre des résultats plus anciens de nos propres travaux. La figure 1 présente, sous l'angle praxéologique, les deux grands types de phases de conclusion que nous avons mis au jour (Morge, 1997 ;

Morge, 2001a) à savoir les phases d'évaluation et les phases de négociation. La phase de conclusion est appelée phase d'évaluation si l'enseignant, seul ou avec des élèves, évalue la fausseté ou la véracité d'une production d'élève. La phase de conclusion est appelée phase de négociation, si les élèves et/ou l'enseignant recherchent la pertinence de la production par rapport à la tâche ou la cohérence de cette production avec les connaissances de référence (connaissances disponibles chez les élèves impliqués dans l'interaction et n'ayant toujours pas été publiquement invalidées) (Morge, 2001a). Tout au long de l'article, nous associons l'utilisation du terme de validation ou de non-validation à la description d'une phase de négociation.

L'approche anthropologique relie, tout en les distinguant, les savoir-faire mis en jeu dans la pratique et les savoirs technologiques et théoriques qui les sous-tendent. En ce sens elle diffère de deux importants courants de recherches sur les enseignants qui se focalisent sur un seul de ces aspects. Le premier courant tend à décrire les comportements verbaux ou non verbaux des enseignants et des élèves (Flanders, 1970 ; Postic, 1977 ; She & Fisher, 2000, par exemple) dans la perspective de les corrélés ensuite avec des attitudes ou des performances d'élèves. Ces études cherchent plus à décrire qu'à expliquer ce qui se passe dans la classe. De plus, la volonté d'effectuer des recherches quantitatives exclue l'usage de descripteurs nécessitant une analyse fine du déroulement de la séance. Ce manque de précision ne permet pas de distinguer des pratiques pourtant différentes. Par exemple, le terme de guidage peut recouvrir un ensemble très large de modalités d'interventions relevant de conceptions didactiques ou épistémologiques totalement opposées. Le second courant de recherches a pour objectif de connaître les conceptions des enseignants (voir Lederman, 1992, pour une synthèse). La méthodologie employée est souvent le questionnaire ou l'entretien. Ces recherches ne nous renseignent pas sur les aspects de la pratique effective qui seraient liés à ces conceptions. Notre approche des interactions maître-élèves se caractérise à la fois par un niveau assez fin du grain d'analyse – ce qui nécessite de travailler à partir de transcriptions et non d'observations en temps réel –, par la recherche de relations entre les pratiques effectives et les options théoriques qui les sous-tendent, par la recherche de leur fonction dans la co-construction du savoir. Ces orientations rapprochent nos travaux de ceux de Franceschelli & Weil-Barais (1998), Larcher & Chomat (1998) ou Rodriguez & Thompson (2001).

Le schéma ci-dessous (figure 1) rend compte de notre analyse des pratiques enseignantes. En le lisant de bas en haut, on retrouve la chronologie de l'analyse.

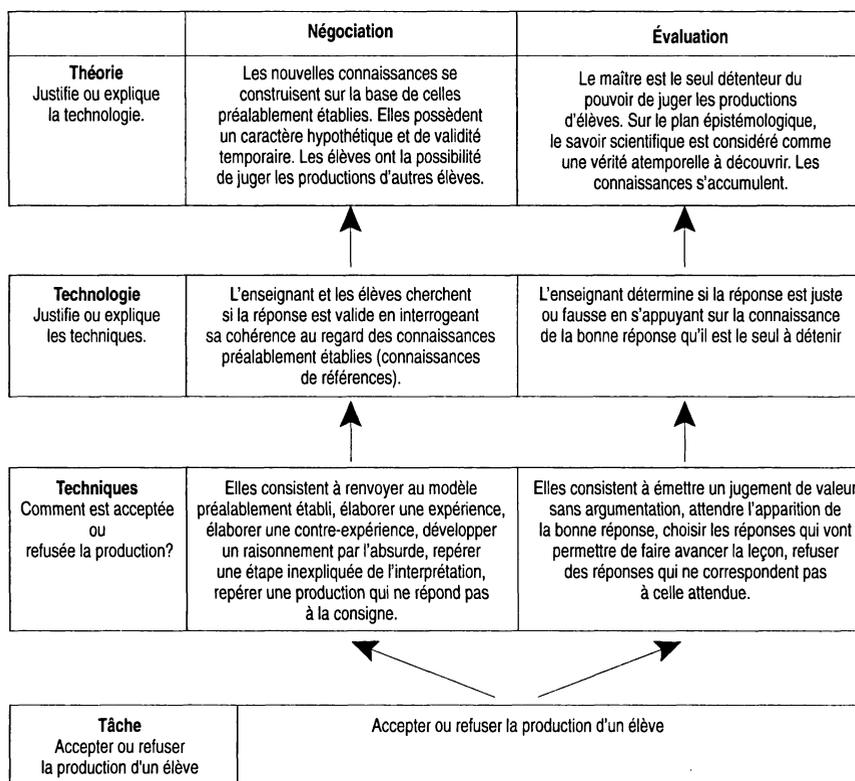


Figure 1 • L'évaluation et la négociation, deux grands types de phases de conclusion

Le premier niveau décrit la tâche que nous avons choisie d'étudier. Cette tâche consiste, pour les élèves ou l'enseignant, à accepter ou refuser une production d'élèves.

Le deuxième niveau, celui de la technique, décrit l'acceptation ou le refus de cette production. Pour des raisons de présentation, les techniques sont regroupées en deux blocs, selon qu'il s'agit d'une technique relevant de la négociation (bloc de gauche) ou d'une technique relevant de l'évaluation (bloc de droite). Dans le troisième niveau, on distingue deux technologies décrivant la nature des arguments. L'une, précédemment appelée négociation, consiste à déterminer la validité et la pertinence de la production en s'appuyant sur les connaissances de référence. L'autre, précédemment appelée évaluation, consiste à déterminer la véracité ou la fausseté de la production en référence à un savoir dont l'enseignant est l'unique détenteur. Chaque technologie relève de théories différentes. La technologie de

négociation (bloc de gauche) s'appuie sur une conception constructiviste de l'apprentissage et de l'activité scientifique. La technologie d'évaluation (bloc de droite) renvoie à une conception naturaliste (Robardet, 1994) du savoir scientifique et considère que l'apprentissage est une accumulation de savoirs qui n'ont pas forcément de liens entre eux.

3. ANALYSE DES PHASES DE CONCLUSION DANS LA DEUXIÈME ACTIVITÉ DE LA SÉANCE SUR LE MODÈLE PARTICULAIRE

La séance sur le modèle particulaire comporte quatre activités. Lors de la première activité les élèves observent et décrivent la compression du dioxyde d'azote (gaz roux) placé à l'intérieur d'une seringue bouchée. Les élèves notent par écrit leurs observations dans un tableau à double entrée tracé sur une feuille qui leur a été distribuée (voir en annexe). La correction de la première activité fournie dans l'accompagnement du programme retient que l'état de tassement et la couleur ont changé, alors que la nature et la quantité de gaz n'ont pas changé.

La deuxième activité consiste à modéliser le phénomène de compression observé au cours de l'activité 1. Le document distribué aux élèves présente quatre propriétés du modèle particulaire : une particule ne se coupe pas, ne se déforme pas, garde les mêmes dimensions et la même masse. Cette activité est en tout point identique à celle proposée dans l'accompagnement du programme. En revanche, elle diffère quelque peu de celle proposée dans le cadre des travaux de recherche (Chomat *et al.*, 1988) où figure à côté de chaque seringue un cadre dans lequel les élèves doivent représenter les particules. La présence de ce cadre supplémentaire se justifie par la volonté de différencier le registre du réel (la seringue) de celui du modèle (le cadre). Seule l'analyse du déroulement de cette deuxième activité, la plus stratégique du point de vue des savoirs mis en jeu, sera présentée dans cet article.

Notre analyse rend compte, à travers le filtre de nos outils, du déroulement effectif des séances. Néanmoins, nous nous autorisons quelques fois à proposer des déroulements possibles. Par exemple, nous pouvons suggérer des arguments qu'aucun enseignant n'a pensé mobiliser en phase de conclusion. Les phases de conclusion sont très souvent des phases de négociation (voir figure 1) puisque les enseignants ont été formés dans ce sens. Avant de rentrer dans l'analyse systématique des phases de conclusion, nous allons situer le contexte de cette deuxième activité en explicitant les connaissances mobilisables en phase de négociation à cet instant

de la séance. Si une large part de ces connaissances est identique pour les cinq séances, quelques différences apparaissent. Nous analyserons l'impact de ces variations sur les phases de conclusion.

3.1. Impact d'un changement des connaissances de référence utilisées en phase de conclusion

Les connaissances de référence (connaissances disponibles chez les élèves impliqués dans l'interaction et n'ayant pas été publiquement invalidées) délimitent l'espace de négociation offert à l'enseignant et aux élèves impliqués dans l'interaction. La liste des connaissances de référence n'est pas établie arbitrairement par le chercheur ou par l'enseignant, mais elle est définie par la situation d'enseignement elle-même. Pendant la séance, ces connaissances peuvent être utilisées différemment. L'enseignant ou les élèves peuvent les mobiliser ou non dans les phases de conclusion, les rappeler ou non en début de cours, les écrire ou non au tableau. Pour cette deuxième activité, tous les élèves disposent des connaissances suivantes : les descriptions phénoménologiques issues de l'activité 1 et validées par l'enseignant ; l'idée de représenter un gaz par des particules ; les quatre propriétés de ces particules (voir en annexe). Certains élèves excluent l'idée d'une présence de vide dans la matière. Cette conception n'étant pas encore publiquement invalidée au début de la deuxième activité, elle peut faire partie des connaissances de référence. Cela signifie que si un élève mobilise cette conception dans l'interaction, l'enseignant ne peut pas d'emblée la considérer comme fautive, s'il veut se situer dans une perspective de co-construction. Pour l'invalider, il devra développer d'autres arguments s'appuyant sur les connaissances de référence. Quand cette conception sera publiquement invalidée, elle sera exclue des connaissances de référence et l'enseignant pourra refuser son utilisation comme base argumentative.

L'analyse des transcriptions de séances montre que, pour deux enseignants, les connaissances de référence effectivement utilisées diffèrent quelque peu de celles décrites précédemment.

Lors d'une phase de conclusion, un enseignant convoque une propriété des gaz préalablement abordée en cours : « *Le gaz prend la forme du récipient qui le contient* » ou « *le gaz prend l'espace qui lui est donné* »². L'introduction de cette propriété dans les connaissances de référence offre une nouvelle possibilité d'argumentation pour invalider des réponses présentant une absence de particules dans l'embout de la seringue ou des réponses présentant un rangement regroupé de particules. Notons que cette connaissance relève des caractéristiques macroscopiques du gaz et non pas d'une cinquième proposition du modèle particulaire comme le suggère

l'enseignant³.

Un autre enseignant explique à ses élèves que « *pour avoir juste, il faut respecter les quatre propositions* »⁴. Les constatations expérimentales tirées de l'activité 1 ne sont pas utilisées pour contrôler les productions d'élèves. L'enseignant ne s'appuie pas ici sur la totalité des connaissances de référence pour invalider ou valider les productions. La conséquence de ce choix se révèle lors d'une phase de conclusion au cours de laquelle un élève, qui n'a pas conservé le nombre de particules, considère que sa réponse est juste puisque ni P1, ni P2, ni P3, ni P4 (voir en annexe) n'obligent à conserver le nombre de particules⁵.

Nous allons maintenant analyser l'ensemble des phases de conclusion de cette deuxième activité en commençant par celles qui concernent l'activité centrale de production des schémas pour finir par celles qui concernent les activités périphériques telles que chercher ce qu'il y a entre les particules ou situer les productions d'élèves les unes par rapport aux autres.

3.2. Phases de conclusion liées aux représentations des particules dans la seringue

Par son caractère ouvert, cette deuxième activité (voir en annexe) génère un grand nombre de réponses. Les réponses sont donc regroupées en fonction du type d'erreur repéré par l'enseignant ou les élèves. Les arguments avancés pour accepter ou refuser les productions sont repérés et leur pertinence discutée.

Les particules sont plus petites dans la situation 2

C'est le caractère indéformable des particules qui est avancé pour refuser cette réponse⁶. Le critère de contrôle des productions évoqué est l'une des propriétés des particules du modèle faisant partie des connaissances de référence. Il s'agit donc d'une phase de négociation.

Les particules sont représentées par des écailles

Un élève s'appuie sur l'image des écailles d'un poisson pour représenter les particules⁷. Afin de montrer son désaccord, un autre élève pointe la modification des dimensions des particules⁸. Ce contre-argument peut difficilement être accepté par le premier élève si, pour lui, les écailles glissent les unes sur les autres au moment de la compression, ce qui lui permet de concilier l'absence de vide et le déplacement du piston. Pour cet élève, les

particules ne se déforment pas et seule une argumentation basée sur le passage à une représentation en trois dimensions pourrait montrer le non-respect de la diminution du volume.

La non-conservation du nombre de particules

L'argument avancé pour invalider ces productions⁹ est le non-respect de la conservation de la quantité de gaz qui se traduit par la non-conservation de la quantité de particules. Cet argument s'appuie sur les connaissances de référence, à condition de considérer que l'hypothèse selon laquelle un gaz peut être représenté par des particules, faisant elle-même partie des connaissances de référence, recouvre le lien entre le nombre de particules et la quantité de gaz.

Mais si cet argument invalide la réponse, il ne renseigne pas le professeur sur les raisons de cette erreur, ce qui ne peut pas favoriser sa compréhension par l'élève. L'invalidation de la production en phase de conclusion peut également être l'occasion d'invalider le raisonnement ou la conception à l'origine de la production. Nous avançons, ci-dessous, quelques explications pouvant éclairer l'origine de cette réponse en différenciant deux cas.

Si le nombre de particules est plus élevé en 2 qu'en 1, l'élève a pu considérer la conservation du nombre de particules comme secondaire¹⁰, préférant mettre en avant l'aspect plus tassé ou plus foncé de la deuxième situation. Il peut aussi invoquer l'impossibilité de recompter le très grand nombre de particules représentées¹¹.

Lorsque le nombre de particules est moins élevé¹² en 2 qu'en 1, nous pouvons avancer là encore au moins deux interprétations. Soit l'élève, ne pouvant envisager l'existence du vide dans la matière, trouve ce moyen pour placer des particules indéformables dans un plus petit volume. Soit, et cela est un corollaire de l'interprétation précédente, l'élève traduit dans son schéma la conception, apparue également dans l'activité 1, selon laquelle il existe une co-variation entre la quantité et le volume de gaz¹³.

Les particules se touchent dans la situation 1

L'argument avancé à l'encontre de ce type de production consiste à dénoncer l'impossibilité de passer dans la situation 2 sans déformer les particules¹⁴. L'origine de ce type de production peut se trouver dans le refus de considérer l'existence de vide dans la matière¹⁵. Pour conserver cette conception, un élève imagine que les particules passent les unes par-dessus les autres¹⁶. Là encore, le passage à une représentation en trois dimensions permettrait d'invalider cette explication. L'origine de cette production peut

également se trouver dans l'application de la loi macroscopique « *le gaz occupe tout le volume dont il dispose* »¹⁷ au niveau microscopique « *les particules occupent tout le volume dont elles disposent* ». L'expression de cette loi sous la forme « *le gaz se répartit uniformément dans le volume qu'il occupe* » pourrait éviter cette difficulté supplémentaire.

Les particules se touchent uniquement dans la situation 2

En accolant des particules dans la situation 2, les élèves paraissent traduire l'atteinte d'un maximum de compression et/ou l'évitement du vide. Ces réponses sont valides au regard des connaissances de référence mais fausses au regard du savoir savant puisque c'est à l'état solide que les particules sont accolées. S'il accepte cette réponse, l'enseignant considère cette production comme une étape de la construction. Pour refuser ces réponses fausses mais valides, un enseignant explique que la situation 2 autorise une nouvelle compression¹⁸. Notons que seule l'introduction de l'agitation particulière pourra expliquer la résistance¹⁹ du gaz à la compression en situation 2.

Le rangement des particules

Dans plusieurs schémas les particules sont rangées, alors que d'un point de vue scientifique et dans le cadre de ce modèle, l'agitation particulière attribue une position aléatoire aux particules. Aucun enseignant n'a considéré le rangement des particules comme un critère d'invalidation des productions. En effet, dans les connaissances de référence, rien ne justifie cette invalidation. Comme dans le cas de l'accolement des particules, les enseignants valident des productions scientifiquement fausses, considérant qu'il s'agit d'un savoir en construction. Ces rangements peuvent s'expliquer par la nécessité d'une structure évitant aux particules de tomber au fond de la seringue. L'agitation particulière constituera une réponse à ce problème.

Diversité des symboles dans une même seringue

La nécessité d'associer un symbole à un type de particule n'est pas explicitement présente dans les connaissances de référence. Mais cet argument utilisé en phase de conclusion²⁰ relève de la négociation si l'on considère que l'idée de représenter un gaz par des particules recouvre le rapport entre l'unicité du gaz et celle des symboles représentant les particules.

Absence de particules dans le bout de la seringue

Les connaissances de référence n'offrent aucun critère d'invalidation de ce type de réponse²¹. L'utilisation de la loi de répartition uniforme du gaz dans l'espace occupé peut constituer un moyen d'invalider ces productions,

si elle a préalablement été établie.

Il n'y a pas de particules, le coloriage est plus dense en 2 qu'en 1

Pour invalider cette réponse²², l'enseignant dit qu'elle ne répond pas au problème posé²³ puisque le gaz n'est pas représenté par des particules. L'enseignant n'explique pas la différence entre le dessin d'un phénomène et la représentation symbolique d'un modèle.

3.3. Phases de conclusion relatives aux activités périphériques

Différentes activités périphériques ont été repérées dans le corpus : interpréter l'espace entre les particules, comparer des productions d'élèves entre elles, choisir les symboles, choisir le nombre de particules. Ces activités périphériques ne sont pas clairement explicitées et formulées au niveau de la préparation de séances mais elles émergent de sa réalisation. Pour chaque activité périphérique, les arguments de validation ou de non-validation des réponses sont repérés et leur pertinence discutée.

Interpréter l'espace entre les particules

Cette activité périphérique vise à pointer l'existence du vide entre les particules de matière. Cette idée s'oppose à la conception majoritaire des élèves. Les transcriptions de séances montrent que, pour les élèves, l'espace interparticulaire est composé de gaz, d'air, d'un autre gaz, du même gaz ou encore de vide.

Pour invalider les réponses suggérant l'existence d'un autre gaz entre les particules (l'air²⁴, un autre gaz²⁵, d'autres particules²⁶) plusieurs enseignants avancent l'argument selon lequel il n'y a qu'un seul gaz dans la seringue²⁷. Cet argument s'appuie sur les conditions expérimentales de l'expérience. Dans cette situation, aucun enseignant n'a pensé à se situer sur le plan du modèle pour dire que la présence de gaz – donc de particules – entre les particules, empêcherait la compression. Ce type d'argument est uniquement avancé²⁸ pour refuser l'idée selon laquelle le gaz roux est entre les particules. L'impossible coexistence du gaz et des particules à une même échelle n'a jamais été évoquée. Notons que l'apparition fréquente de l'idée selon laquelle l'air est entre les particules peut s'expliquer par l'invisibilité de l'air et par l'application de l'idée que l'air est partout autour de nous.

Enfin, d'autres élèves expliquent que l'ensemble des particules de la seringue ne pouvant pas être représenté, les espaces restés libres sont remplis des particules non représentées²⁹. Cette interprétation de l'espace

interparticulaire est possible si l'enseignant considère les productions des élèves comme des représentations simplifiées de la réalité microscopique au lieu de les considérer comme des représentations du modèle théorique ou comme un zoom de la réalité microscopique.

Comparer des productions

Avant d'engager la critique des productions sélectionnées au tableau, une enseignante demande à chaque élève de situer sa production³⁰ parmi celles déjà sélectionnées. À cet instant de l'activité, les élèves ne différencient pas les critères signifiants (conservation du nombre et de la forme des particules) des critères non signifiants (le nombre de particule, le symbole utilisé). Ils considèrent alors que chaque réponse diffère de celles sélectionnées³¹, notamment sur la base des critères non signifiants. Un élève ira jusqu'à dire que son schéma appartient au groupe des productions utilisant le symbole des ronds³². Placée à cet instant de la séance, cette activité périphérique est une impasse qui amène l'enseignant soit à conclure que toutes les productions sont différentes, soit à imposer sans possibilité de se justifier, la stricte utilisation des critères signifiants. L'enseignant consacre plus du tiers de la séance à cette comparaison.

Choisir le nombre de particules

Certains enseignants ont accepté des représentations présentant un très grand nombre de particules, alors que d'autres ont limité ce nombre. Certains élèves représentent jusqu'à 159 particules³³. L'activité de modélisation se transforme alors en activité de comptage. La représentation d'un très grand nombre de particules s'accompagne d'une perte de temps³⁴ et peut empêcher un recomptage précis³⁵.

Pour justifier la limitation du nombre de particules à représenter, un enseignant explique que la représentation de la totalité des particules – au nombre approximatif de 10^{22} – n'est pas réalisable³⁶. En utilisant cet argument, il considère que la production est une représentation simplifiée de la réalité microscopique dans laquelle toutes les particules ne peuvent pas être représentées. Si la limitation du nombre de particules permet d'éviter à certains élèves de s'égarer, on peut s'interroger sur sa justification. En effet, les élèves peuvent ensuite considérer, comme nous l'avons déjà vu, que l'espace interparticulaire est rempli des particules non représentées³⁷. De plus, l'argumentation s'appuie sur une connaissance dont l'élève ne dispose pas (nombre de particules dans un litre de gaz) ce qui revient à utiliser un argument d'autorité. Il s'agit alors d'une phase d'évaluation.

Pour justifier la limitation du nombre de particules représentées, une

autre piste consiste à définir plus clairement le statut épistémologique des productions des élèves. En effet, si le schéma traduit les constats expérimentaux et les propriétés du modèle, le nombre de particules importe peu. Il est donc préférable d'en faire un petit nombre pour éviter un laborieux comptage. La limitation du nombre de particules à représenter peut également se justifier en considérant la production des élèves comme un zoom effectué sur des particules que l'on considère réelles.

La présence d'un très grand nombre de particules pourrait aussi s'expliquer par la formulation de la consigne « *représente tout le gaz* ». Pour éviter cet écueil, la solution consisterait à supprimer le terme « tout » de la consigne. Mais ce terme a été rajouté à la consigne originale (Chomat *et al.*, 1988) car, selon les auteurs, son absence pouvait générer des productions présentant une différence du nombre de particules entre les situations 1 et 2. Pour limiter le nombre de particules représentées, l'enseignant ne peut donc pas modifier la consigne.

Choisir le symbole

Conformément aux suggestions de l'accompagnement du programme, le choix du symbole représentant les particules est laissé aux élèves. Ce choix traduit le caractère non signifiant du symbole utilisé et contribue à distancier la production de l'élève d'une quelconque représentation de la réalité. La production de l'élève traduit les propriétés des particules et du phénomène présenté et non pas la forme des particules.

Lors des séances, cette liberté de choix du symbole est justifiée de façon différente par deux enseignants. Pour l'un d'eux, le choix du symbole est libre car il n'est pas stipulé³⁸ dans la formulation de l'activité. Autrement dit, c'est l'exercice scolaire qui dicte les règles de production des savoirs et non pas la nature même de l'activité de modélisation. Un autre enseignant explique que la représentation des particules est libre car leur forme est inconnue des élèves³⁹. Là encore, l'enseignant considère que les productions d'élèves représentent la réalité puisqu'ils les dessineraient comme elles sont, s'ils connaissaient leur forme.

4. CONCLUSION : EXEMPLES DE CONNAISSANCES PROFESSIONNELLES LOCALES

Les connaissances professionnelles des enseignants sont nombreuses. Dans l'exercice de leur métier, les enseignants utilisent des connaissances sur la matière enseignée, la façon de la transmettre, les grands principes éducatifs, la psychopédagogie et la didactique, la planification d'un cours et son organisation, le système d'enseignement, l'organi-

sation de l'école, les programmes, les manuels, la gestion de groupes, les origines socio-économiques des parents, etc. (Tardif & Lessard, 1999, pp. 362-363). Ces connaissances peuvent être triées selon différents critères qui produisent des typologies différentes. Pour notre part, nous nous sommes attachés au caractère générique ou spécifique des connaissances professionnelles ce qui nous a amenés à envisager l'existence de connaissances professionnelles locales dont le domaine d'application est limité à une séance particulière. Ces connaissances peuvent être réinvesties uniquement dans une nouvelle réalisation de la même séance. Nous postulons que ces connaissances professionnelles locales facilitent l'anticipation du déroulement de la séance et permettent d'ajuster sa préparation ou sa gestion. Nous pensons que ces connaissances jouent un grand rôle dans l'appropriation, la conservation et la répétition par les enseignants de certaines situations d'enseignement.

Dans cette conclusion, les connaissances professionnelles locales repérées dans la séance sur le modèle particulière sont regroupées en fonction de la nature de ces connaissances. Nous tentons de montrer en quoi ces connaissances sont locales et comment leur maîtrise permettrait à l'enseignant de mieux anticiper et donc de mieux contrôler le déroulement de la séance. Des exemples tirés de l'analyse présentée ci-dessus accompagnent notre propos. Un enseignant qui dispose de connaissances professionnelles locales connaît les points qui suivent.

Des productions possibles d'élèves en fonction des tâches proposées et du niveau des élèves

L'apparition de certaines productions imprévues (particules représentées par des écailles, nombre de particules supérieur en situation 2, etc.) peut déstabiliser un enseignant et rendre difficile la gestion de la séance. Sans cette connaissance des productions possibles d'élèves, il est constamment soumis à l'inconnu et à l'incertitude. S'il a une connaissance préalable des productions possibles, il peut anticiper la façon dont il va les gérer. Ce meilleur contrôle de la situation lui permet de réellement prendre en compte les productions au lieu de les éviter. Nous pensons d'ailleurs que la présence de quelques productions d'élèves dans les préparations de séances des accompagnements des programmes, aide les enseignants à se représenter et à anticiper le déroulement de la séance.

Des arguments mobilisables en fonction des productions

Connaître différentes façons d'accepter ou de refuser des productions d'élèves c'est, pour l'enseignant, disposer d'un réel choix d'action lui permettant d'adapter son intervention. Ainsi, lorsque des élèves postulent un

glissement de particules les unes sur les autres, aucun enseignant n'a pensé à demander une représentation en trois dimensions pour montrer que cette solution ne respecte pas la diminution du volume observée. La connaissance de cet argument et des productions pour lesquelles il est pertinent, constitue une connaissance professionnelle locale dont la possession aurait été utile aux enseignants.

L'impact des connaissances de référence utilisées

L'utilisation de certaines connaissances comme base argumentative modifie les phases de négociation. Par exemple, en s'appuyant sur la propriété macroscopique selon laquelle le gaz se répartit uniformément dans l'espace qu'il occupe, l'enseignant peut invalider une absence de particules dans l'embout de la seringue. Il peut également invalider des accolements de particules en situation 2 si celle-ci est présentée comme une situation dans laquelle le gaz peut encore être comprimé.

Des impasses

Certains choix de l'enseignant peuvent l'amener dans une impasse c'est-à-dire dans une situation qui l'empêche de parvenir à ses fins. Par exemple, s'il demande aux élèves de situer leur propre production par rapport à celles sélectionnées au tableau avant d'avoir différencié les critères signifiants des non signifiants, il doit conclure que chaque production est différente. Cette activité de comparaison, souvent pertinente, est inappropriée dans ce contexte particulier. De même, si l'enseignant considère que le respect des quatre propriétés est suffisant pour valider une production, il ne peut plus invalider des réponses présentant une différence du nombre de particules.

L'influence de la consigne sur les productions des élèves

Pour limiter le nombre de particules l'enseignant peut modifier la consigne en supprimant le terme « *tout* » de la phrase « *représente tout le gaz...* ». Mais, en l'absence de ce terme, certains élèves pourraient produire des schémas ayant un nombre de particules différent dans les deux situations. L'influence de la consigne a un caractère nécessairement local, lié à la séance.

L'influence de certaines positions épistémologiques sur le déroulement de la séance

Si l'enseignant considère les schémas des élèves comme des représentations simplifiées de la réalité, les élèves peuvent penser que l'espace interparticulaire est l'emplacement des particules non représentées. De

même, si les productions des élèves sont considérées comme des représentations de la réalité, les élèves peuvent représenter jusqu'à cent cinquante neuf particules dont le recomptage constitue une perte de temps et détourne le sens de l'activité. Notons que, si les positions épistémologiques ont un caractère général, leur influence dans un contexte précis possède quant à lui une forte caractéristique locale et reste difficilement prévisible en dehors de toute mise en œuvre effective de la séance.

Différentes formes d'expression des conceptions

La connaissance des différentes formes d'expression que peuvent prendre les conceptions est une connaissance professionnelle locale. Par exemple, des élèves peuvent reprendre l'idée selon laquelle « *l'air est partout autour de nous, il nous entoure* » et considérer que l'air entoure les particules de gaz roux. Dans le même ordre d'idée, la formulation « *le gaz occupe tout l'espace qui lui est offert* » peut amener les élèves à remplir de particules tout l'espace de la seringue. Ces deux productions traduisent la conception d'une matière exempte de vide et l'application de lois du domaine macroscopique au domaine microscopique. La seule connaissance des conceptions des élèves n'est pas opérationnelle si l'enseignant ne sait pas sous quelles formes elles peuvent s'exprimer. Cette expression dépend de la situation dans laquelle sont les élèves, donc de la séance elle-même.

Les connaissances professionnelles locales peuvent également être présentées en séparant les tâches, les techniques, les technologies et les théories (Chevallard, 1999) qui les composent. Cette présentation (figure 2) permet d'organiser les connaissances mises en jeu qui sont à la fois, les productions des élèves, les arguments permettant de les valider ou non, et le discours technologique et théorique justifiant les techniques utilisées. L'ensemble de l'organigramme synthétise clairement les connaissances professionnelles locales mobilisables dans cette activité. Nous avons pris le parti d'illustrer notre propos uniquement à travers quelques exemples dont certains sont commentés afin d'en faciliter la lecture et la compréhension.

Nous commenterons trois cas différents. Le premier, le plus simple, associe un argument possible (une technique) à l'invalidation d'une production d'élève (la tâche). Dans le deuxième cas, deux techniques permettent d'invalider une production. Le troisième exemple montre le cas d'une réponse pouvant être soit acceptée, soit refusée en fonction des arguments avancés.

Le premier cas consiste à invalider une réponse présentant des particules plus petites en situation 2 (tâche). L'argument d'une déformation des particules peut être avancé (technique). Cet argument est l'une des techniques relevant du non-respect des propriétés du modèle (technologie).

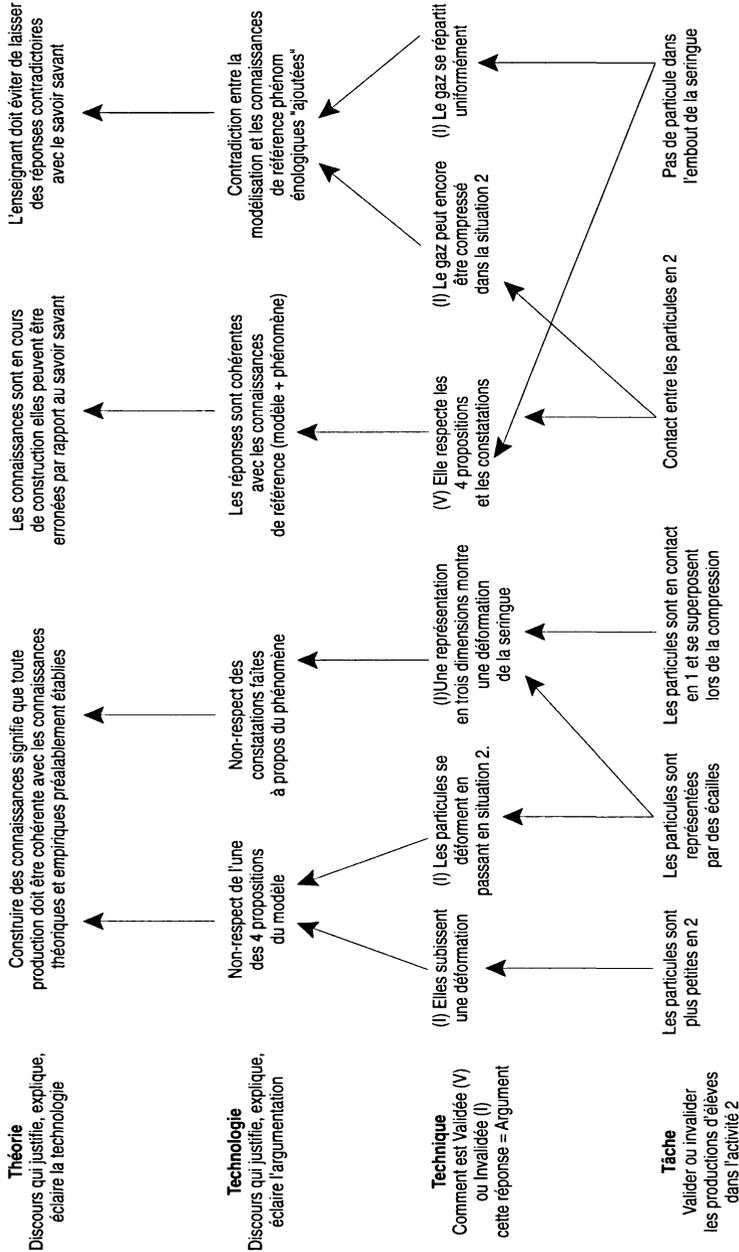


Figure 2 • Exemples de phases de conclusion tirées de l'activité 2 et analysées selon l'approche anthropologique de Chevallard

Enfin, l'exigence de respect des propriétés du modèle relève d'une conception constructiviste de l'enseignement, de l'apprentissage et de l'activité scientifique (théorie).

Dans le deuxième exemple, il s'agit d'invalider une production présentant des écailles qui se resserrent en situation 2 sous l'effet de la compression (tâche). Deux arguments sont alors envisageables. Le premier consiste à considérer que les écailles sont plus petites en 2 qu'en 1 et donc que les particules se déforment (technique). Cet argument renvoie au non-respect de l'une des propriétés du modèle (technologie). Le deuxième argument consiste à passer à une représentation en trois dimensions pour montrer que le glissement des écailles les unes sur les autres provoquerait une déformation du corps de la seringue (technique), ce qui est contradictoire avec les constatations de la première activité (technologie).

Prenons maintenant le cas d'une réponse présentant une absence de particules dans l'embout de la seringue, tout autre critère de validité étant respecté. Il est possible de la valider en considérant que les propositions du modèle et les constatations sont respectées (technique), ce qui correspond aux critères de validation d'une production (technologie). La validation d'une production fautive sur le plan scientifique peut se justifier (théorie) en évoquant l'idée selon laquelle les connaissances des élèves sont en cours de construction et que de nouveaux savoirs ne sont introduits que s'ils sont nécessaires à la résolution de la tâche. Cette même production peut être invalidée en montrant qu'elle est contradictoire avec l'idée d'une répartition uniforme des gaz (technique), pointant ainsi la contradiction entre la production et le phénomène antérieurement établi (technologie). Ce choix peut éventuellement se justifier par le refus d'accepter des réponses contradictoires avec les savoirs savants (théorie).

5. VERS UNE FORMATION PAR LA SIMULATION ANALYSÉE

Une fois déterminées, ces connaissances professionnelles spécifiques à une séance donnée peuvent constituer des contenus de formation. À l'issue d'une telle formation, l'enseignant dispose de connaissances dont la construction aurait normalement nécessité la réalisation répétée de la même séance durant plusieurs années. L'acquisition de ces connaissances par un enseignant accroît son expérience professionnelle sur une séance donnée. Cette formation permet également de développer des savoirs technologiques et théoriques transversaux. Mieux préparée, la gestion de la séance est facilitée. Disposant de ces connaissances avant la mise en œuvre

de la séance, une partie des situations inconfortables ou des tensions liées à la réalisation de séances issues de la recherche (Morge, 2001b) pourrait disparaître. Cette facilitation peut contribuer à une meilleure diffusion de produits de recherches en didactique.

Pour former les enseignants à la gestion d'une séance particulière avant qu'ils ne la réalisent réellement, nous avons conçu un logiciel⁴⁰ de simulation de gestion de la séance. Cet outil permet la mise en œuvre d'une formation en deux temps : celui de la simulation et celui de la réflexion sur cette simulation. La simulation de l'enseignement met en jeu les savoir-faire (bloc pratico-technique) alors que la réflexion sur cette simulation mobilise les savoirs (bloc technologico-théorique). Au cours de la simulation, il est demandé aux enseignants d'accepter ou de refuser des productions réelles d'élèves, d'argumenter leur décision, de lancer puis de gérer des activités périphériques (choisir le nombre de particules, choisir le symbole, comparer les productions entre elles, interpréter l'espace interparticulaire). Si le formateur intervient peu dans cette première partie, son rôle est plus important dans la seconde puisqu'il fait expliciter aux enseignants leurs choix et les raisons de leurs choix, il resitue les échanges sur des plans didactique, scientifique ou pédagogique, et il propose si nécessaire des solutions en les argumentant. Lors de cette phase de distanciation, les enseignants adoptent une position réflexive pour justifier leurs décisions, expliciter les conceptions qui les sous-tendent et les comparer à celles prises dans une situation strictement identique par d'autres enseignants.

Cette formation par la simulation analysée se situe toujours dans le paradigme du praticien réflexif puisqu'elle place l'enseignant en situation d'action d'enseignement (simulée) et de réflexion sur cette action. En revanche, elle bouscule l'un des postulats de ce paradigme qui considère que le travail de réflexion ne peut se mener qu'après ou éventuellement pendant l'action et non pas avant l'action.

6. SYNTHÈSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Ce travail vise à mieux connaître les connaissances qui peuvent être mobilisées par les enseignants dans le cadre de l'exercice de leur métier. Aux connaissances professionnelles enseignantes jusque là mises au jour, nous ajoutons par le biais de cet article les connaissances professionnelles locales, connaissances spécifiques à une séance. Nous nous sommes attachés à cerner leurs caractéristiques et leurs propriétés puis à en repérer certaines dans le cas d'une séance sur le modèle particulière. Cette recherche sur les connaissances professionnelles locales a des applications dans le domaine de la formation des maîtres puisqu'elle permet d'entrevoir

de nouveaux contenus de formation et débouche sur la construction d'une formation par la simulation analysée qui renouvelle l'approche théorique du praticien réflexif.

Cette recherche sur les connaissances professionnelles locales aboutit à l'obtention de deux types de résultats : des résultats particuliers et des résultats catégoriels. Les premiers concernent les connaissances professionnelles locales relatives à la séance étudiée. Ils ne peuvent pas faire l'objet d'un transfert à d'autres séances. Cela signifie qu'un changement de programme supprimant l'enseignement du modèle particulière rendrait ces résultats particuliers inutilisables – comme il rendrait inutilisables d'autres résultats de recherches directement liées à ce contenu –. Les seconds sont relatifs à la nature des connaissances professionnelles locales (impasses, impact de la consigne sur les productions d'élèves, formes prises par les conceptions). Ces résultats plus généraux sont transférables à l'analyse d'autres situations d'enseignement, comme nous le montrons dans l'exemple suivant.

En étudiant un enseignant de mathématiques qui veut réaliser une séance issue de la recherche en didactique, Coulange (2000) a observé par hasard la construction d'une connaissance professionnelle locale. En dehors du protocole de recherche, l'enseignant réalise préalablement ladite séance. Il se rend alors compte que les élèves utilisent tous la même méthode de résolution alors qu'il devait mettre en concurrence leurs différentes méthodes. L'enseignant attribue cela à la présence des lettres x , y , z dans l'énoncé, ce qui orienterait les élèves vers la résolution algébrique. Cette connaissance professionnelle locale relève de la catégorie « influence de la consigne sur les productions d'élèves ». Ne voulant pas modifier la consigne, l'enseignant change l'ordre de présentation des problèmes pour tenter d'éviter cet écueil. Cet exemple montre comment le concept de connaissance professionnelle locale permet d'appréhender une partie du fonctionnement cognitif des enseignants. Ce concept est transférable à d'autres disciplines et d'autres situations d'enseignement.

Sur le plan méthodologique nous avons adopté une position d'extériorité par rapport à l'enseignant et à son activité. Les connaissances professionnelles locales ont été inférées sur la base de l'analyse de cinq déroulements d'une même séance. Une autre méthode d'accès aux connaissances professionnelles locales consiste, par exemple, à interroger les enseignants sur les connaissances qu'ils acquièrent à travers la réalisation d'une séance et qu'ils réinvestissent dans une nouvelle réalisation de cette même séance. Cette seconde méthode permet d'accéder aux connaissances professionnelles locales consciemment mobilisées par l'enseignant.

La liste des catégories de connaissances professionnelles locales

que nous avons dégagée n'est pas exhaustive. De plus, la pertinence des catégories dépend des caractéristiques de la situation d'enseignement étudiée. Par exemple, dans les situations a-didactiques (Robardet, 1997) le contrôle des productions d'élèves s'effectue par confrontation avec le milieu ce qui exclut l'existence de phases de conclusion telles que nous les avons rencontrées dans la séance du modèle particulière. La catégorie « *arguments mobilisables en fonction des productions des élèves* » n'est pas pertinente pour décrire les connaissances professionnelles locales mobilisables dans ce type de séance.

NOTES

1. <http://www.auvergne.iufm.fr/ER/lmorge/modèleparticulaire.htm>
Chaque intervention est numérotée par ordre d'apparition dans la séance. Chaque numéro d'intervention est précédé d'une lettre différente pour chacune des séances.

2. d353-355

3. d397-398

4. e335

5. e363

6. d404, d408, d413

7. d444

8. d452

9. b183, e326, c151

10. e341, e344

11. e326, 328

12. c151

13. e363

14. b209, a185, a22, a246, d424

15. e386

16. d426

17. d473 à d477

18. b244 à b269

19. e462
20. d415, d442
21. e382
22. b169
23. b166
24. b208, e412, a268, a289, a290, c267
25. b228
26. c273
27. b205, e428, a297, b227, c279
28. b231
29. d473 à d481
30. d208 à 329
31. d210, d219, d249, d293, d294
32. d300
33. d195
34. d314-315, d342-343
35. e326, e328
36. a162
37. d473 à d481
38. b110 à b119
39. e291
40. <http://www.auvergne.iufm.fr/ER/lmorge/simodpart.htm>

BIBLIOGRAPHIE

BESSON U., VIENNOT L. & LEGA J. (2001). Pression et statique des fluides : un début de modélisation. *Bulletin de l'union des physiciens*, cahier n° 1, n° 835, pp. 825-840.

BOILEVIN J.-M. (2000). *Conception et analyse du fonctionnement d'un dispositif de formation initiale des enseignants de physique – chimie utilisant des savoirs issus de la recherche en didactique : un modèle d'activité et des cadres d'analyse des interactions en classe*. Thèse, université Aix-Marseille 1.

CHEVALLARD Y. (1999). L'analyse des pratiques enseignantes en théorie anthropologique du didactique. *Recherche en didactique des mathématiques*, vol. 19/2, n° 56, pp. 221-265.

CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1988). Modèle particulière et activité de modélisation. *Aster*, n° 7, pp. 143-184.

COULANGE L. (2000). *Étude des pratiques du professeur du double point de vue écologique et économique – Cas de l'enseignement des systèmes d'équations et de la mise en équation en classe de troisième*. Thèse, université Joseph Fourier, Grenoble.

DEVELAY M. (1994). *Peut-on former les enseignants ?* Paris, ESF.

DURAND M. (1996). *L'enseignement en milieu scolaire*. Paris, PUF.

FLAVIER E., BERTONE S., MÉARD J. & DURAND M. (2002). Les préoccupations des professeurs d'éducation physique lors de la genèse et la régulation des conflits en classe. *Revue française de pédagogie*, n° 139, pp. 107-119.

FLANDERS N.A. (1970). *Analyzing teaching behavior*. Reading (Massachusetts), Addison-Wesley.

FRANCESCHELLI S. & WEIL-BARAI A. (1998). La routine conversationnelle comme stratégie de changement conceptuel : apprendre à modéliser en mécanique. In A. Dumas-Carré & A. Weil-Barais (Dir.), *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Berne, Peter Lang, pp. 163-184.

GOIGOUX R. (2002). Analyser l'activité d'enseignement de la lecture : une monographie. *Revue Française de Pédagogie*, n° 138, pp. 125-134.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE PÉDAGOGIQUE (2001). Le praticien réflexif. La diffusion d'un modèle de formation. *Recherche et Formation*, n° 36.

JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le « débat scientifique » dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.

KAMINSKI W. (1989). Conception des enfants (et autres) sur la lumière. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 973-996.

LARCHER C. & CHOMAT A. (1998). Médiation dans des situations d'entretiens avec des élèves de collège à propos de la modélisation des propriétés thermoélastiques des gaz. In A. Dumas-Carré & A. Weil-Barais (Éds), *Tutelle et médiation dans l'éducation scientifique*. Berne, Peter Lang, pp. 135-161.

LEDERMAN N.-G. (1992). Student's and teacher's Conceptions of the Nature of Science : A review of the research. *Journal of research in science teaching*, vol. 29, n° 4, pp. 331-359.

LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAI A. (1993). *Construire des concepts en Physique*. Paris, Hachette.

MAURICE J.-J. (1996). Problèmes multiplicatifs : l'expérience de l'enseignant, l'action effective de l'élève. *Revue de didactique des mathématiques*, vol. 16, n° 3, pp. 323-348.

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE (1997). *Accompagnement des programmes de 5^e et de 4^e*. Collection collège. Paris, CNDP.

MORGE L. (1997). *Essai de formation professionnelle des professeurs de sciences physiques portant sur les interactions en classe. Étude de cas en formation initiale*. Thèse, université Paris 7.

MORGE L. (2001a). Caractérisation des phases de conclusion dans l'enseignement scientifique. *Didaskalia*, n° 18, pp. 99-120.

MORGE L. (2001b) Former sur les aspects pratiques et théoriques des interactions enseignant-élèves en classe de sciences. *Aster*, n° 32, pp. 155-176.

- PAQUAY L. (1994). Vers un référentiel des compétences professionnelles de l'enseignant ? *Recherche et formation*, n° 16, pp. 7-38.
- PORTUGAIS J. (1995). *Didactique des mathématiques et formation des enseignants*. Berne, Peter Lang.
- POSTIC M. (1977). *Observation et formation des enseignants*. Paris, PUF.
- ROBARDET G. (1994). La formation des enseignants de sciences physiques et le mythe naturaliste. In M. Caillot (Éd.), *Actes du quatrième séminaire de recherche en didactique des sciences physiques*. Université de Picardie Jules Vernes (CURSEP) et IUFM de Picardie, pp. 4-22.
- ROBARDET G. (1997). Le jeu du résistor : une situation visant à ébranler des obstacles épistémologiques en électrocinétique. *Aster*, n° 24, pp. 59-80.
- RODRIGUES S. & THOMPSON I. (2001). Cohesion in science lesson discourse : clarity, relevance and sufficient information. *International Journal of Science Education*, vol. 23, n° 9, pp. 929-940.
- SÉRÉ M.-G. (1985). *Analyse des conceptions de l'état gazeux qu'ont les enfants de 11 à 13 ans, en liaison avec la notion de pression, et proposition de stratégie pédagogique pour en faciliter l'évolution*. Thèse de doctorat d'état, université Paris 6.
- SAINT-GEORGES M. (1996). *Formation des professeurs de sciences physiques par la didactique*. Thèse, université Paris 7.
- SHE H.-C. & FISHER D. (2000). The Development of a Questionnaire to Describe Science Teacher Communication Behavior in Taiwan and Australia. *Science & Education*, n° 84, pp. 706-726.
- TARDIF M. & LESSARD C. (1999). *Le travail enseignant au quotidien*. Québec, Presses de l'université Laval.
- VION R. (1992). *La communication verbale*. Paris, Hachette.

ANNEXE

Nom :	Classe :
Prénom :	
Modèle particulaire des gaz	
Activité 1 : Observations	
Observez l'expérience réalisée par le professeur, puis indiquez dans le tableau ci-dessous « ce qui a changé » et « ce qui n'a pas changé » pour la seringue et pour le gaz.	
Activité 2 : Modélisation	
On peut se représenter un gaz comme un ensemble de particules invisibles à l'œil nu, ayant les propriétés suivantes :	
P1 – Une particule ne se coupe pas.	
P2 – Une particule garde les mêmes dimensions.	
P3 – Une particule garde la même masse.	
P4 – Une particule ne se déforme pas.	
Représentez tout le gaz dans les situations 1 et 2 pour rendre compte de ce qui a été constaté.	
 Situation 1	 Situation 2

Activité 3 : Conclusion

D'après les activités précédentes, donnez les significations des expressions suivantes

- Un seul gaz =
- Le gaz est plus tassé =
- Le gaz peut encore se serrer =
- Il y a la même quantité de gaz =

Activité 4 : Enrichissement du modèle

Qu'a t-on appris en plus par rapport aux quatre propriétés initiales ?

.....
.....
.....
.....

Cet article a été reçu le 2 avril 2002 et accepté le 8 avril 2003.

« Histoire et épistémologie des disciplines » Quel projet pour la formation des maîtres ?

« History and epistemology of subjects » Which project for teachers' education ?

Joël LEBEAUME

UMR STEF
ENS Cachan – INRP
École normale supérieure de Cachan
61, avenue du Président Wilson
94235 Cachan cedex, France.

Résumé

Le but de cet article est de discuter les multiples ambiguïtés de l'introduction généralisée « de l'histoire et de l'épistémologie des disciplines » dans la formation professionnelle des enseignants en France. Après l'étude rétrospective des discours concernant ces contenus de formation, est soutenue l'idée que cette formation professionnelle initiale doit favoriser l'analyse anticipatrice ou réflexive des tâches d'enseignement-apprentissage selon quatre perspectives : la classe, l'élève, les références et le curriculum.

Mots clés : didactique, disciplines scolaires, formation professionnelle initiale, histoire, épistémologie

Abstract

The aim of this paper is to discuss the ambiguousness of the generalized introducing of « history and epistemology of subjects » within teachers' education in France. In the first part are studied several orientations of these contents since ten years. In the second part, the conditions of this integration is proposed in order to be able to analyze teaching-learning with four perspectives : school, pupils, references and curriculum.

Key words : didactics, school matters, pre-service teachers' education, history, epistemology.

INTRODUCTION

Parmi les plus récentes mesures de rénovation de la formation des maîtres, « l'introduction généralisée dans la formation disciplinaire de l'histoire (des disciplines) et de l'épistémologie des disciplines¹» est citée au premier alinéa des changements concernant les futurs professeurs de l'enseignement secondaire (Lang, 2002 ; ministère de l'Éducation nationale, 2002). Sans précision sur les enjeux, les contenus et les modalités de la formation, cette injonction fait l'hypothèse d'une signification évidente et d'une interprétation partagée. Or l'expression « histoire et épistémologie des disciplines » est source de multiples malentendus en raison de l'ambiguïté de cette composition de termes, plus précisément due à l'association ordonnée histoire et épistémologie et à l'indifférenciation des disciplines scolaires et universitaires. Martinand (1998) attire l'attention sur la confusion engendrée par l'expansion de l'épistémologie hors du domaine originel de la recherche.

De quoi parle-t-on vraiment ? S'agit-il pour les enseignants stagiaires de retravailler Seignobos, Bachelard, de Saussure, Volney, etc., selon leurs spécialités ? S'agit-il plutôt de clarifier leur posture spécifique de professeur de français par rapport à la littérature, la rhétorique, les sciences du langage, etc., ou bien celle de professeur d'économie et gestion par rapport aux sciences de la gestion ou aux pratiques de l'expertise comptable, du droit ou du marketing ? Ou bien s'agit-il de caractériser les fondements et l'organisation des mathématiques au collège, d'identifier les mésaventures des mathématiques modernes, les relations fonctionnelles entre mathématiques et sciences physiques au lycée professionnel ou bien les évolutions de l'enseignement du latin ou celles de la philosophie. Quel est donc le projet de ce changement prescrit pour la formation des maîtres ?

Tenter de préciser le sens implicite de cet intitulé ne peut s'accorder de la proposition d'un énoncé élaboré à partir de définitions lexicales. Il est

plus pertinent d'en circonscrire l'acception au travers des discours plus ou moins officiels de la formation des maîtres. Comme ces formulations relèvent du processus social d'élaboration-consultation de ces textes, elles en portent aussi les compromis provisoires. Leur variation est ainsi supposée permettre de révéler à la fois la signification de l'expression « histoire et épistémologie des disciplines » mais aussi ses tensions et le cas échéant ses évolutions.

1. LES TEXTES ET L'ESPRIT

1.1. Premiers principes

L'analyse des discours institutionnels montre que les termes « histoire, épistémologie, discipline » sont régulièrement associés depuis le rapport Bancel (1989). À cette date, « *les connaissances relatives aux identités disciplinaires (savoirs à enseigner, histoire, épistémologie et enjeux sociaux des différentes disciplines)* » s'inscrivent dans l'un des trois pôles constitutifs de la professionnalité globale. Les commentaires qui distinguent explicitement savoirs scolaires et disciplines académiques arguent de la nécessité pour les enseignants de confronter le savoir à enseigner aux différents niveaux de la scolarité et le savoir académique². Cette connaissance des conditions d'élaboration et de construction du savoir scolaire n'est cependant présentée que comme une formation « complémentaire » indispensable à cette confrontation.

Ces éléments de formation sont ainsi conçus en privilégiant d'abord les caractéristiques de la discipline académique puis celles de la discipline scolaire afin d'identifier les filiations et les obstacles susceptibles d'apparaître au cours de l'apprentissage. Ces orientations sont très clairement mentionnées dans le texte fixant le cadre national concernant les contenus et la validation des formations (BOEN – Bulletin officiel de l'Éducation nationale, 1991). Trois intentions majeures figurent :

- mesurer l'écart entre savoirs universitaires et disciplines scolaires³ ;
- assurer la transposition de ces savoirs en contenus d'enseignement adaptés aux différents publics concernés ;
- repérer les obstacles rencontrés dans les apprentissages et créer les situations pédagogiques, individuelles ou de groupe, propres à les surmonter.

Ces intentions qui se réfèrent explicitement à la transposition didactique semblent inspirées par les travaux de didactique des mathématiques. À cette époque en effet, l'article « *Épistémologie et didactique* » (Artigue,

1990) retrace l'histoire de cette relation et présente l'épistémologie à la fois historique et génétique avec une fonction critique du savoir à enseigner et des obstacles aux multiples origines, ontogénétique, didactique, langagière et épistémologique. Mais cette référence des orientations institutionnelles à l'enseignement des mathématiques privilégie simultanément un modèle unique (voire universel) de discipline scolaire. Il tend alors à masquer les particularités et les singularités des autres disciplines. Le développement de la didactique des mathématiques, les recherches à l'époque seulement en cours sur les disciplines scolaires mais aussi les rapports de force des groupes sociaux sont des hypothèses interprétatives vraisemblables de cette sélection prioritaire.

Les principes initiaux sont régulièrement repris mais en soulignant davantage l'intérêt de cette vigilance épistémologique pour l'identification des relations interdisciplinaires. Les textes relatifs à l'épreuve professionnelle (BOEN, 1991) puis sur dossier (BOEN, 1994) signalent dans des formulations analogues que les candidats doivent avoir réfléchi aux finalités et à l'évolution de la discipline ainsi qu'aux relations de celle-ci avec les autres disciplines. Les indications concernant l'élaboration des plans de formation 1995-1999 (BOEN, 1994) accentuent quant à elles, l'importance accordée à la « *vision plus synthétique et plus ouverte de ces disciplines dans leurs démarches, leurs méthodes, leur place dans les champs de savoir* ». C'est encore dans ces mêmes termes, qu'est définie l'exigence de « connaissance de la discipline » dans le texte précisant les missions du professeur exerçant dans l'enseignement secondaire (1997)⁴.

1.2. Amorce d'un changement

Si ces intentions sont encore privilégiées dans les textes plus récents, ces derniers indiquent toutefois une amorce de renversement. Il s'agit désormais de partir des savoirs scolaires et non plus des savoirs universitaires. La circulaire sur la politique contractuelle (BOEN, 1999) précise ainsi la nécessité d'intégrer « *un travail sur les savoirs scolaires et sur la transversalité des apprentissages* ». Le cahier des charges de la deuxième année en institut universitaire de formation des maîtres (2001)⁵ participe également de cette évolution puisqu'il précise l'indispensable retour aux savoirs académiques dans le travail de l'enseignant.

Cependant, cette amorce de changement n'est pas radicale et l'ambiguïté demeure par la position relative des mots « histoire » et « épistémologie », par l'absence de qualificatifs du terme « discipline », et par la substitution confuse de « disciplines » et « savoirs ». Les textes successifs du projet ministériel (ministère de l'Éducation nationale, 2001-2002)

conservent ces hésitations : le premier précise qu'il s'agit de « dépasser la discipline en intégrant des éléments d'histoire de la discipline, d'épistémologie et de didactique », le suivant de « prolonger son approche disciplinaire par des notions d'épistémologie et d'histoire de la discipline ». Le texte définitif rassemble enfin « les approfondissements disciplinaires, l'histoire et l'épistémologie de la discipline, la didactique et la pédagogie de la discipline (...) ». Mais aucun nouveau principe susceptible de guider la formation des maîtres n'est alors clarifié.

1.3. Ambiguïtés en suspens

Si l'intention est de promouvoir dans la formation l'analyse critique et réflexive des contenus scolaires, sa formulation confuse semble porter la trace de rapports de force amortis dans les termes d'un consensus mou. Celui-ci admet alors toutes les représentations possibles de l'association de ces trois mots-valises. Il convient d'interroger cette imprécision et d'en proposer une interprétation.

On peut raisonnablement supposer que ces hésitations traduisent des oppositions au sein des groupes de travail, entre les tenants des disciplines scolaires et ceux des disciplines universitaires. Cette hypothèse interprétative peut être argumentée par trois éléments liés. Le premier est le rattachement systématique de ces éléments à la formation disciplinaire, dont le haut niveau est légitimement revendiqué depuis les origines des IUFM. Le deuxième est la cristallisation sur ce point de vue épistémologique et/ou historique porté sur les disciplines alors que la sociologie des curriculums par exemple n'est jamais mentionnée. Les savoirs scolaires sont à étudier essentiellement par rapport à leur érosion éventuelle mais sans les inscrire dans un projet social d'éducation. Le troisième élément concerne l'exclusion des professeurs des écoles de cette préoccupation. Excepté les très récentes recommandations (Bornancin, 2001, 2002), aucun texte concernant ces enseignants ne signale en effet l'intérêt de l'épistémologie et de l'histoire des champs disciplinaires. Ces propos institutionnels révèlent alors la représentation dominante des disciplines scolaires associées à l'enseignement secondaire et conçues exclusivement comme les sous-produits des disciplines universitaires.

Le brouillage des propos institutionnels peut alors témoigner de l'incapacité de prendre en charge la diversité des disciplines scolaires, c'est-à-dire de les penser hors d'un modèle dominant et réducteur, celui des quelques disciplines cumulatives de savoirs exclusivement en texte. En ce sens, l'écho de ces prescriptions dans les programmes des concours ou dans les indications relatives à l'épreuve professionnelle ou sur dossier, est

jusqu'alors contrasté. Selon les disciplines, figure l'analyse de la transposition didactique (Capes section biologie-géologie, section arts plastiques). Le Capes – certificat d'aptitude au professorat d'éducation physique (BOEN, 2001), le Capes – certificat d'aptitude au professorat de l'enseignement secondaire – section espagnol (BOEN, 1991b, 1991c, 1992a, 1992b) et section sciences économiques et sociales retiennent explicitement l'histoire de l'enseignement ou de la discipline. Pour le Capes section histoire-géographie, les attentes du jury concernent notamment l'approche critique de ces disciplines dans le champ des connaissances et dans le champ de l'enseignement. Ces exigences révèlent les préoccupations de chacune de ces communautés disciplinaires. L'histoire d'un enseignement contribue alors à la constitution du corps professoral (EPS) ou à la consolidation d'une identité disciplinaire (SES). L'épistémologie et l'histoire assurent aussi la mise à distance critique des contenus disciplinaires et permet de saisir la construction historique de cette discipline hybride en France (histoire-géographie).

Mais la difficulté de clarifier l'étiquetage de cette partie de la formation peut aussi être interprétée comme le signe d'une compartimentation arbitraire et non opératoire de la formation. Dans les textes de 1991, la distinction entre formation disciplinaire et formation générale rattache alors à l'une les aspects liés à « la transposition des savoirs » et à l'autre « l'approche philosophique et épistémologique ». En outre, au fil des textes, cette approche s'avère étirée entre la didactique et la pédagogie ; la première relevant de la formation disciplinaire, la seconde de la formation générale. Dans les plus récents textes, ces clivages sont encore présents.

Depuis un peu plus de dix ans, les prescriptions n'ont pas encore fixé le sens de cette association de mots « discipline, histoire, épistémologie » dans le registre spécialisé de la formation des maîtres. Les derniers textes laissent en suspens toutes ces ambiguïtés. Cependant, la généralisation de l'histoire et de l'épistémologie des disciplines au cours de la deuxième année d'IUFM les renvoie aux premières actions professionnelles des enseignants-stagiaires. En raison de leur affectation privilégiée dans les collèges, ces actions sont résolument distantes des disciplines universitaires de leur formation initiale.

2. ACTIONS PROFESSIONNELLES ET CONTENUS SCOLAIRES

La clarification nécessaire à la mise en œuvre de cette directive est proposée ici dans le contexte des actions professionnelles des professeurs-

stagiaires. Nous tenterons alors de préciser les contenus nécessaires à ces actions et nous indiquerons leurs enjeux spécifiques. Ceux susceptibles de s'inscrire dans « l'histoire et l'épistémologie des disciplines » seront enfin soulignés.

2.1. Tâches d'enseignement-apprentissage et perspectives

Parmi les multiples tâches professionnelles des enseignants, nous ne retenons que les actions d'enseignement-apprentissage, c'est-à-dire celles qui participent à l'apprentissage des élèves et celles qui assignent aux professeurs leur spécialité. Nous situons en outre cet examen à l'échelle d'une séquence ou d'une série de séances que les professeurs-stagiaires anticipent, organisent, mettent en œuvre, discutent, etc. L'examen est ainsi centré sur une action avec des élèves dans un contexte particulier et avec ses contenus propres désignés par les programmes d'une discipline scolaire. Quelles que soient les ressources utilisées, l'action professionnelle correspond à cette création originale et personnelle. Plusieurs contrôles sont nécessaires sur sa faisabilité et ses contraintes mais surtout sur sa pertinence. C'est là qu'une formation peut contribuer à l'analyse critique de cette action examinée selon différentes perspectives, c'est-à-dire selon différents points de vue ou manières de l'objectiver.

Nous soutenons l'idée que cette formation à l'analyse anticipatrice ou réflexive des tâches d'enseignement-apprentissage doit privilégier quatre perspectives : la classe, l'élève, les références et le curriculum. Il s'agit donc d'objectiver cette même situation d'enseignement-apprentissage avec ces quatre points de vue complémentaires :

- le premier focalise la classe. Lui correspondent les conditions de mise en œuvre des activités contribuant aux apprentissages disciplinaires. Sont en particulier en jeu les méthodes d'enseignement (exposition, travaux de groupes, situations-problèmes, etc.) et les rites organisateurs de chacune des disciplines (échauffement, activité motrice, relaxation pour l'EPS par exemple). La réflexion critique porte plus précisément sur les spécificités organisationnelles et relationnelles de l'enseignement d'un contenu ;

- le deuxième privilégie l'élève. Il repère les interactions entre le sujet, l'apprenant, l'élève ou le jeune, et la tâche et ses contenus. Il renvoie plus particulièrement aux travaux sur les obstacles et à ceux concernant les rapports à l'apprendre et aux contenus. L'analyse critique de la tâche s'attache aux conditions de cette interaction cognitive, pragmatique, affective et conative ;

- le troisième s'attache aux références. Il porte essentiellement sur la signification de la tâche et de son contenu par rapport à l'extérieur de l'école. Il ne renvoie pas exclusivement aux disciplines universitaires. Il s'agit d'inter-

roger plus largement le contenu par rapport à l'extérieur qui, selon les disciplines, est composé de savoirs, de pratiques, de théories, de normes, d'axiomes, de règles, etc. C'est alors une réflexion critique sur les références des contenus enseignés ;

– le quatrième enfin concerne le curriculum. Il situe le moment scolaire que représente cette tâche dans l'itinéraire emprunté par l'élève au cours de sa scolarité. L'analyse critique porte alors sur l'inscription de cet épisode dans la scolarité de l'élève, mais également dans la structure du curriculum. Il s'agit de caractériser la (ou les) tâche(s) prescrite(s) par rapport aux principes de construction et d'organisation (élémentarité, progressivité, flexibilité) du curriculum disciplinaire : par exemple contrôler la fonction d'un exercice dans l'organisation actuelle de l'enseignement du français en séquences auxquelles sont articulés des apprentissages systématiques. Mais il s'agit aussi de contrôler les enjeux éducatifs de ce moment scolaire par rapport aux principes fondateurs du curriculum. Au-delà du contrôle de la validité et de la pertinence d'une manipulation permettant de distinguer les montages des circuits électriques en série ou en parallèle, d'exprimer quantitativement des relations tout en prenant en compte les représentations des élèves, leurs raisonnements et leurs expériences antérieures, il s'agit aussi de percevoir son impact pour l'éducation scientifique des adolescents.

Ces quatre perspectives ne peuvent être considérées comme disjointes car elles ont pour origine le contenu de la tâche. Elles ne sont pas nouvelles ! Les recherches en didactique ont depuis plus de trente ans pris en charge au moins les trois premières. Pour la formation des enseignants, Martinand suggère ainsi une reproblématisation en termes de règles, références et obstacles. La dernière qui pourrait être exprimée en termes d'horizon, s'appuie sur les travaux plus récents consacrés aux disciplines scolaires et qui ont mis en évidence d'une part leur diversité et leur spécificité, d'autre part leur structure et leur organisation (Chervel, 1988 ; Develay, 1992 ; Lebeaume, 2000 ; Martinand, 2001).

2.2. Didactique et formation

La présentation de cette objectivation selon quatre perspectives, centrée sur des micro-actions professionnelles d'enseignement-apprentissage, peut être étendue aux actions de plus grande envergure correspondant à la prise en charge d'un enseignement disciplinaire au cours d'une année ou d'un cycle et dans ses différentes figures scolaires (par exemple pour un professeur de génie mécanique : enseignement en seconde ISI – initiation aux sciences de l'ingénieur –, en première SI – sciences de l'ingénieur – ou en terminale STI – sciences et techniques industrielles).

La formation professionnelle consiste précisément à élaborer progressivement cet ensemble d'actions contrôlées, c'est-à-dire des pratiques d'enseignement et leur cadre interprétatif. Il ne s'agit donc pas d'informer les enseignants avec quelques références historiques ou épistémologiques mais de leur permettre de construire des outils d'analyse et de contrôle de leurs interventions sur les contenus et sur les disciplines scolaires. L'enjeu d'une telle formation professionnelle pour – et non pas à – l'enseignement d'une discipline est grand.

Avec la généralisation prescrite de « l'histoire et de l'épistémologie des disciplines », on peut craindre cependant l'apparition dans les maquettes de formation d'un horaire consacré à cet intitulé. Une telle planification n'aurait ni sens ni intérêt et les professeurs-stagiaires ne tarderaient pas à dénoncer une nouvelle fois leur perception d'un ensemble compartimenté sans cohérence. Si l'on considère que la formation d'enseignants du second degré est une formation de professionnels de l'enseignement d'une discipline, ces contenus de formation ne peuvent être périphériques. Ils sont constitutifs du « noyau dur » suggéré dans les réflexions actuelles (Obin, 2002) car ils engagent la responsabilité des professeurs vis à vis des contenus. Ils sont alors intégrés à la didactique considérée en tant que discipline de formation (Martinand, 1994a). Si l'on admet en revanche que les enseignants « appliquent les programmes » et donc qu'ils n'interviennent pas sur les disciplines, alors l'histoire et l'épistémologie peuvent être périphériques et ne constituer qu'une ouverture. Mais aujourd'hui, la demande institutionnelle est fortement marquée par cette responsabilité des professeurs : consultation-délibération des projets de programmes, contribution-participation aux nouveaux dispositifs, argumentation-discussion au cours des inspections. Les mêmes décisions sont à prendre pour la formation des professeurs des écoles dont la spécialité n'est pas attachée à une discipline : l'histoire et l'épistémologie des champs disciplinaires peuvent être ou ne pas être intégrées au « noyau dur » avec les conséquences sur leur professionnalité.

Cette clarification qui est sans doute un bouleversement – non pas intellectuel mais social – aurait également le mérite d'assurer la cohérence des différentes injonctions ou recommandations institutionnelles. L'analyse des pratiques pourrait par exemple être un moyen pour un but déterminé : l'élaboration de ce cadre de réflexion critique pour l'enseignement.

2.3. « Histoire et épistémologie des disciplines »

Dans cette proposition, où peuvent se situer l'histoire et l'épistémologie des disciplines ? La réponse ne peut être exprimée que dans une perspective fonctionnelle mettant en évidence leurs contributions spécifiques.

Afin de lever les ambiguïtés largement répandues jusqu'alors, il convient de distinguer ce qui relève de l'histoire des disciplines et de l'épistémologie. Chacune des quatre perspectives peut être informée par son histoire : l'histoire des conceptions psychologiques, celle des méthodes pédagogiques, celles des sciences, des arts, des lettres, des industries... et celles de chacune des disciplines scolaires. Elles représentent un intérêt majeur pour l'histoire des idées, notamment celles concernant l'éducation. Mais elles ne sont sans doute pas toutes urgentes pour la formation professionnelle des enseignants-stagiaires. C'est en ce sens que Prost (1985) privilégie, pour la formation des maîtres, l'épistémologie et la didactique à l'histoire du système éducatif.

L'histoire des disciplines scolaires présente l'intérêt fondamental de mettre en évidence leur évolution, de saisir leur fondement socio-économico-politique et leur forme scolaire (Vincent, 1994). C'est un moyen pour discuter la pertinence sociale des disciplines étiquetées sur des emplois du temps et sur des salles de classe, pour situer les pressions et les controverses dont elles sont l'objet et pour identifier les processus de leur légitimation. Saisir les conditions d'émergence de la technologie et des sciences physiques et chimiques avec l'unification de la scolarité post-élémentaire, comprendre l'extinction de l'économie domestique et ses relations avec les évolutions des rôles sociaux et de la consommation de masse, situer les débats sur la place et la fonction du latin ou des langues vivantes, percevoir les raisons de l'exclusion d'une discipline informatique et en revanche l'identification d'une discipline documentation... sont des connaissances nécessaires à la construction de l'identité professionnelle des jeunes enseignants. L'appropriation des racines de chacune des disciplines est une condition de leur intégration et de leur socialisation. C'est aussi une condition pour qu'ils situent leur rôle dans une histoire en cours. C'est enfin un moyen pour rompre avec les idées communes de l'élaboration des programmes d'enseignement à partir de l'analyse descendante des disciplines académiques dont résulterait un agrégat de leurs petites versions scolaires et de briser les images caricaturales d'une puissante noosphère et d'enseignants serviles. Au-delà des enjeux pour chacune des communautés disciplinaires, l'histoire de la culture scolaire contemporaine par l'approche comparée des histoires des disciplines scolaires est un moyen de constitution du corps enseignant, selon les recommandations récentes (Bornancin, 2001).

Mais l'histoire des disciplines peut également être celle de leurs contenus. Il s'agit alors d'une épistémologie des disciplines scolaires qui ne peut s'effectuer sans leur histoire. Cette épistémologie s'inscrit directement dans la proposition précédente car elle est l'étude des fondements des enseignements, des paradigmes et des ruptures⁶. L'intention critique de cette formation repose aussi sur la mise en évidence des débats internes pour

saisir les raisons des configurations du présent, par exemple ceux de la philosophie sur sa place en fin de scolarité ou étendue à l'ensemble des classes (Dagognet, 1997). En outre, la distanciation que permet cette formation offre aux enseignants la liberté et la responsabilité de véritables délibérations de leur discipline, en particulier pour penser les relations interdisciplinaires des nouveaux dispositifs (itinéraires de découverte, travaux personnels encadrés, projet professionnel à caractère professionnel). C'est aujourd'hui indispensable pour que les alliances ne soient ni opportunistes ni annexionnistes comme dans les premières tentatives d'interdisciplinarité (Barré de Mignac & Cros, 1984).

Si l'histoire des disciplines est un moyen de socialisation professionnelle et si l'épistémologie et l'histoire des disciplines scolaires sont un moyen d'analyse critique des contenus scolaires, des intérêts sont également présents dans l'épistémologie et l'histoire des sciences expérimentales, des mathématiques, de la géographie, des sciences de l'ingénieur, etc. Ils correspondent aux différents apports des didactiques des disciplines dans leurs registres épistémologique et psychologique et plus particulièrement centrés sur les obstacles et les difficultés d'apprentissage. Mais qu'en est-il toutefois pour la philosophie, pour les arts plastiques ou musicaux, pour l'éducation physique et sportive ? Apparaissent ainsi les limites de cet intitulé difficilement généralisable.

La proposition de clarification amène à affirmer la didactique, dans sa fonction critique et prospective (Martinand, 1994b) comme élément central de la formation professionnelle disciplinaire et à promouvoir la « confrontation » des contenus scolaires d'un point de vue pédagogique, d'un point de vue psychologique, d'un point de vue épistémologique et d'un point de vue curriculaire.

La formation ainsi clarifiée est fondamentalement intégrée aux contenus scolaires que les enseignants-stagiaires ont à enseigner. Mais ce n'est pas vraiment une proposition nouvelle. Elle correspond à ce qui s'appelait autrefois la « méthodologie spéciale », dispensée pour la formation des maîtres en Belgique et en Suisse (Buisson, 1911). Toute une histoire et une épistémologie de la formation !

NOTES

1. Dans le dossier de presse est mentionnée l'expression « histoire et épistémologie des disciplines » et dans le discours du ministre « histoire des disciplines et épistémologie des disciplines ».

2. Extrait du rapport Bancel : il s'agit ainsi de connaître « *l'histoire et l'épistémologie de la discipline, les conditions de sa genèse, l'histoire de l'éla-*

boration de ses méthodes et de ses concepts principaux, son développement, les ruptures épistémologiques qui ont marqué son histoire, ses retombées dans la vie sociale, technologique et industrielle et, enfin, ses applications ».

3. Nous soulignons la variation des termes dans les deux formulations : « savoirs scolaires et disciplines académiques » et « savoirs universitaires et disciplines scolaires ».

4. « Ceci implique qu'il sache situer l'état actuel de sa discipline, à travers son histoire, ses enjeux épistémologiques, ses problèmes didactiques et les débats qui la traversent. Il a réfléchi à la fonction sociale et professionnelle de sa discipline, à sa dimension culturelle et à la manière dont elle contribue à la formation des jeunes. La culture qu'il a acquise, disciplinaire et générale, lui permet de situer son domaine d'enseignement par rapport aux autres champs de la connaissance. » (BOEN, 1997, p. 1571).

5. Rapport remis au ministre le 5 novembre 2001.

6. Pour un ensemble de disciplines scolaires voir Develay, 1995.

BIBLIOGRAPHIE

ARTIGUE M. (1990). Épistémologie et didactique. *Recherches en didactique des mathématiques*. vol. 10, n° 23, pp. 241-286.

BANCEL D. (1989). Créer une nouvelle dynamique de la formation des maîtres. Rapport au ministre. In *Les IUFM. Sélection des textes officiels. Document d'information n° 2*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.

BARRÉ de MIGNAC C. & CROS F. (1984). *Les activités interdisciplinaires – Aspects organisationnels et psychopédagogiques*. Paris, INRP.

BORNANCIN M. (2001). *La formation initiale des professeurs et des conseillers principaux d'éducation en deuxième année d'IUFM*. Rapport de mission à Jack Lang, ministre de l'Éducation nationale. (<http://www.education.gouv.fr/rapport/bornancin.pdf>).

BORNANCIN M. (2002). *Propositions pour une charte des formateurs exerçant dans les IUFM*. Rapport au ministre. (<http://www.education.gouv.fr/rapport/bornancincharte.pdf>).

BUISSON F. (1911). Article méthodologie. *Nouveau dictionnaire de pédagogie*. Paris, Hachette, pp. 1292-1293.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1991a). *Circulaire n° 91-202 du 2 juillet 1991*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1991b). *Note du 30 sept. 1991 : Concours externes du CAPES : programmes de l'épreuve professionnelle*. Paris, ministère de l'Éducation nationale

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1991c). *Bulletin officiel de l'Éducation nationale, n° 34 du 3 oct. 1991*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.

BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992a). *Note du 16 mars 1992 : informations pratiques sur l'épreuve professionnelle*. In *Bulletin Officiel de l'Éducation nationale, n° 12 du 19 mars 1992*. Paris, ministère de l'Éducation nationale, encart pp. 1-20.

- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1992b). In *Bulletin officiel de l'Éducation nationale*, n° 15 du 9 avril 1992. Paris, ministère de l'Éducation nationale, additif, pp. 1117-1119.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1994). *Circulaire n° 26 du 14 novembre 1994*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1997). Mission du professeur exerçant en collège, en lycée d'enseignement général et technologique ou en lycée professionnel. In *Circulaire n° 97-123 du 23 mai 1997*. Paris, ministère de l'Éducation nationale, pp. 1571-1576.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (1999). *Circulaire n° 99075 du 27 mai 1999*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- BULLETIN OFFICIEL DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2001). *Bulletin officiel de l'Éducation nationale*, n° 8, du 24 mai 2001. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- CHERVEL A. (1988). L'histoire des disciplines scolaires : réflexions sur un domaine de recherche. *Histoire de l'éducation*, n° 38, pp. 59-119.
- DAGOGNET F. (1997). La notion de programme. *L'enseignement philosophique*, n° 1, pp. 4-9.
- DEVELAY M. (1992). *De l'apprentissage à l'enseignement*. Paris, ESF.
- DEVELAY M. (Dir.) (1995). *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines*. Paris, ESF.
- LANG J. (2002). *La rentrée dans les IUFM*. Discours du 13 mars 2002. (<http://www.education.gouv.fr/discours/iufm.htm>.)
- LEBEAUME J. (2000). *L'éducation technologique – Histoires et Méthodes*. Paris, ESF.
- MARTINAND J.-L. (1994a). Didactique des sciences et formation des enseignants – Notes d'actualité. *Les sciences de l'éducation pour l'ère nouvelle*, n° 1, pp. 9-24.
- MARTINAND J.-L. (1994b). La didactique des sciences et de la technologie et la formation des enseignants. *Aster*, n° 19, pp. 61-75.
- MARTINAND J.-L. (1998). Épistémologie. In C. Étévé & P. Champy (Dir.), *Dictionnaire encyclopédique de l'éducation et de la formation*. Paris, Nathan, pp. 416-417.
- MARTINAND J.-L. (2001). Matrices curriculaires et matrices disciplinaires. Le cas de l'éducation technologique en France. In C. Carpentier (Coord.), *Actes du colloque international des 12, 13 et 14 janvier 2000, Contenus d'enseignement dans un monde en mutation*. Paris, L'Harmattan, pp. 249-269.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2001-2002). *Principes et organisation de la deuxième année de formation des enseignants stagiaires. Plan de rénovation de la formation des enseignants. Versions du 27 février 2001 et du 12 mars 2002*. Paris, ministère de l'Éducation nationale.
- MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION NATIONALE (2002). *La rénovation de la formation des maîtres : les mesures concrètes d'application*. Dossier de presse. (<http://www.education.gouv.fr/presse/2002/iufm/iufmdp.htm>.)
- OBIN J.-P. (2002). *Enseigner, un métier pour demain*. Rapport au ministre. (<http://www.education.gouv.fr/rapport/obin.pdf>)
- PROST A. (1985). *Éloge des pédagogues*. Paris, Seuil.
- VINCENT G. (Dir.) (1994). *L'éducation prisonnière de la forme scolaire ? Scolarisation et socialisation dans les sociétés industrielles*. Lyon, PUL.

Cet article a été reçu le 12 février 2002 et accepté le 27 mars 2003.

■ COMPTE RENDU D'INNOVATION

Report of innovation

Expérimentation d'un environnement informatique dans le cadre de travaux pratiques sur l'interféromètre de Michelson en licence : compte rendu d'innovation

Experimentation of a computer environment for lab work on the Michelson's interferometer at the bachelor's degree : report of innovation

Christophe VIUDEZ

LIDSET

Université Joseph Fourier Grenoble I – IUFM de Grenoble

Université Joseph Fourier Grenoble I, BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France.

Résumé

Cet article présente un environnement informatique utilisé comme ressource libre durant des travaux pratiques (TP) d'optique à l'université. Nous avons conçu cet environnement à la suite d'une étude préalable des TP existants. Cette étude a montré que les étudiants ont rarement recours au modèle physique enseigné pour interpréter les différentes situations auxquelles ils

sont confrontés. Notre objectif est de renforcer le recours au modèle par l'emploi de simulations, la constitution d'une référence empirique et le réinvestissement des connaissances. Nous illustrons l'effet de ces différents modes de renforcement à travers des exemples de leur utilisation par les étudiants.

Mots clés : *travaux pratiques, modélisation, simulation, environnement informatique, interféromètre de Michelson.*

Abstract

This article presents a computer environment used as a free access resource during university lab work. We have designed this environment after a prior study of existing lab work. This study has underlined that students rarely used the taught model for interpreting the different situations they were confronted with. Then the main aim is to increase the model uses by simulations, constitution of an empirical reference and knowledge reinvesting. We illustrate the effect of these different strengthening directions by some examples of students' use of the environment.

Key words : *lab work, modelling, simulation, computer environment, Michelson's interferometer*

INTRODUCTION

L'innovation a été engagée dans une séance de travaux pratiques (TP) portant sur l'interféromètre de Michelson en licence de physique-recherche et de sciences physiques de l'université Joseph Fourier à Grenoble. Elle consiste en la mise au point d'un environnement informatique d'aide aux travaux pratiques, nommé EnvIA (**Environnement Informatique d'Apprentissage**), et elle est le fruit d'une démarche qui s'est poursuivie sur trois années. L'article suit cette démarche en évoquant tout d'abord l'analyse des TP classiques à l'origine de cette innovation, puis aborde les principes généraux qui ont permis la conception de l'environnement au cours de la seconde année et enfin donne les résultats de la mise en place de l'environnement au cours de l'année 2000.

1. ORIGINES DE L'INNOVATION

Notre perspective est centrée sur l'aspect dialectique de la physique, vue comme un dialogue entre des constructions théoriques et des phéno-

mènes. Dans la continuité des travaux sur la modélisation de Tiberghien (1994), nous transférons aux savoirs objets d'apprentissage et aux connaissances de l'apprenant, la structure du savoir savant au sens de Chevallard (1985).

Le savoir savant est constitué de deux champs :

- le champ théorique qui comprend les théories et les modèles,
- le champ empirique, domaine des entités matérielles, qui comprend le domaine de validité du modèle.

Nous avons étudié les travaux pratiques car ils font intervenir ces deux champs. Nous nous sommes intéressés à une séance de TP sur l'interféromètre de Michelson.

Quelques mots sur le contenu du TP

L'interféromètre fut conçu par Albert A. Michelson pour réaliser l'expérience dite de Michelson et Morley (1887) qui, par ses résultats, sert souvent d'introduction à la théorie de la relativité. Cet instrument est utilisé dans notre cas pour étudier différents types d'interférences. Il est constitué de deux miroirs et d'une lame séparatrice, comme l'indique la figure 1. La lame séparatrice est semi-réfléchissante (elle réfléchit 50 % de la lumière). Elle va diviser le faisceau de lumière incident en deux faisceaux qui vont être chacun réfléchis par un miroir. Cette réflexion va permettre de recombinaison des faisceaux.

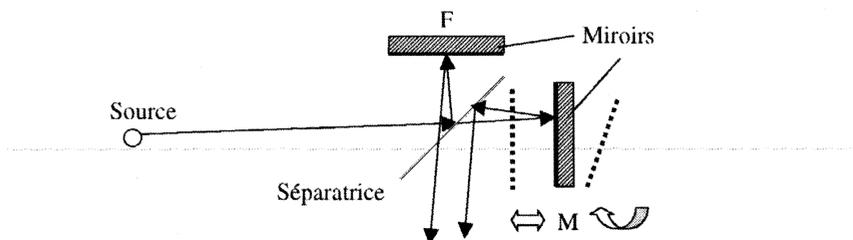


Figure 1 • L'interféromètre de Michelson : le faisceau incident provenant de la source est divisé au niveau de la séparatrice. Chaque faisceau est ensuite réfléchi par un miroir (M ou F) pour être recombinaison avec l'autre faisceau et ainsi donner lieu à des interférences. Le miroir mobile (M) peut être translaté ou orienté

Suivant la position des miroirs, on peut faire parcourir à chacun des faisceaux un trajet différent avant la superposition. Cette différence de trajet, appelée différence de marche, va entraîner une différence de phase entre les ondes lumineuses ; différence de phase qui, en fonction de sa valeur,

aboutira à une intensité importante ou faible. Ces variations d'intensité donnent lieu à l'observation d'anneaux ou de franges rectilignes suivant la position des miroirs. L'observation de ces franges nécessite l'obscurité, c'est pourquoi les binômes d'étudiants sont isolés et opèrent sur des travaux différents (Michelson, diffraction, polarisation). L'enseignant gère en alternance 5 binômes durant 4 heures.

Lors des TP les étudiants déplacent un des miroirs (qui est donc qualifié de mobile dans le document photocopié de TP fourni aux étudiants et dans EnvIA). En fait, deux mouvements sont possibles, un mouvement de translation perpendiculaire à l'autre miroir et une rotation (figure 1). Ces mouvements vont déterminer deux configurations de l'interféromètre : une configuration « lame d'air » et une configuration « coin d'air ». Pour faciliter la détermination de la différence de marche, l'interféromètre est modélisé dans le document de TP initial par des schémas équivalents (figure 2).

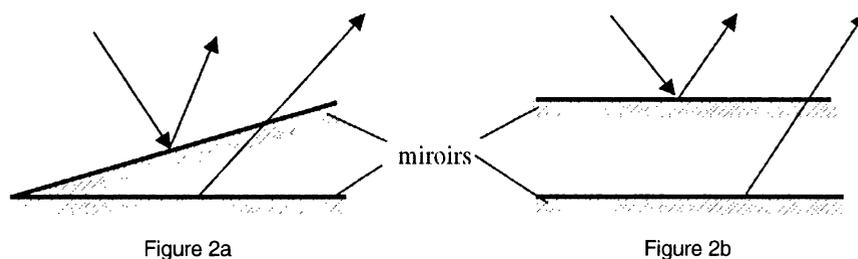


Figure 2 • Les schémas optiques équivalents à la configuration géométrique de l'interféromètre. Figure 2a : le coin d'air lorsque les miroirs ne sont pas orthogonaux et Figure 2b : la lame d'air lorsque les miroirs sont orthogonaux. Les flèches indiquent le tracé d'un rayon lumineux

La configuration du Michelson n'est pas directement observable. L'utilisateur détermine celle-ci à partir des figures d'interférences obtenues, d'où la constante nécessité d'interpréter ces figures. L'observation de franges rectilignes correspondra au coin d'air, celle d'anneaux à la lame d'air.

Nous avons évalué les liens entre champ théorique et champ empirique établis par les étudiants au cours d'une première étude de cas menée sur cinq binômes (Viudez, 1998).

L'analyse des échanges verbaux entre étudiants et entre étudiants et enseignant a amené aux constats suivants :

- l'absence de mise en relation des aspects empiriques avec le modèle physique, notamment la représentation de l'interféromètre par des schémas équivalents, engendre des difficultés de manipulation et d'obtention des phénomènes ;

- l'enseignant a un rôle de médiateur l'amenant à :
 - interroger les étudiants sur leur interprétation des situations,
 - reformuler l'expression du modèle physique pour faciliter son appropriation, notamment en détaillant les relations entre différence de marche et intensité lumineuse,
 - représenter visuellement le modèle physique par des schémas, des gestes, notamment pour montrer l'évolution des franges en s'appuyant sur le schéma équivalent du coin d'air.

À partir de ces conclusions, nous avons envisagé de favoriser le recours au modèle physique en suivant trois pistes :

- la matérialisation du modèle,
- la caractérisation du dispositif et des phénomènes,
- la mise en relation des connaissances entre elles et leur réinvestissement dans les différentes situations du TP et du thème « optique ».

EnvIA a été conçu pour pouvoir mener à bien l'exploitation de ces trois pistes dans un même environnement informatique. Les étudiants n'ont pas à changer de logiciel au cours de leurs TP. Ceci a requis la conception d'un navigateur HTML personnalisé qui peut afficher les simulations et les documents hypertextes. Le navigateur est un document de TP virtuel ; il reprend le document photocopié traditionnel en ajoutant des images, des simulations et des informations complémentaires sur certains éléments du TP. Les activités de manipulation de l'interféromètre n'ont pas été modifiées. L'étudiant, suivant ses besoins, peut consulter un document informatique sur la lecture des vis micrométriques, sur les propriétés des sources lumineuses utilisées dans le TP ou sur les lois de la réflexion.

L'étude préalablement menée a également permis un diagnostic des difficultés rencontrées sur des concepts physiques mobilisés par le TP (différence de marche, longueur de cohérence, etc.) qui s'exprimaient par des interprétations incorrectes des manipulations effectuées et des phénomènes observés. Diagnostic sur lequel nous nous sommes appuyés et que nous évoquerons dans un exemple mis en œuvre dans l'innovation. Les compléments apportés par EnvIA au document de TP ont pour origine ce diagnostic.

EnvIA reprend, en grande partie, les fonctions de reformulation et de représentation du modèle physique assurées par l'enseignant et qui répondent à des besoins de la part des étudiants. L'objectif n'est pas de substituer l'environnement à l'enseignant mais de compléter la démarche de ce dernier. L'enseignant peut décrire le mouvement des miroirs avec ses mains, l'environnement va apporter une animation comparable mais avec une visualisation plus aisée du coin d'air virtuel. L'environnement permet aux étudiants de manipuler une représentation en « 3D » ou en « projection 2D ».

Nous présentons maintenant de manière plus détaillée les trois principes de conception d'EnvIA.

2. LES PRINCIPES CONSTITUTIFS DE L'ENVIRONNEMENT

2.1. Simulation et matérialisation du modèle :

Le principe de matérialisation du modèle s'inspire de nombreux travaux en didactique de la physique (Méheut, 1996 ; Buty, 2000). L'idée est de favoriser le recours au modèle, en permettant aux étudiants de visualiser ou d'agir sur ses paramètres. La simulation utilise le modèle physique qui est implémenté dans un programme informatique. L'étudiant doit pouvoir modifier un ou plusieurs paramètres et visualiser l'évolution d'une grandeur, d'une figure ou d'un objet au moyen du programme. Ceci afin de mieux appréhender la structure interne du modèle (les relations entre les différents concepts physiques du modèle) et de faciliter la confrontation du modèle avec son champ expérimental de référence, favorisant ainsi la validation du modèle.

Un exemple de figure géométrique dynamique

Cette simulation (figure 3), élaborée à partir du logiciel Cabri-géomètre, a pour objectif d'étudier la translation du miroir mobile et ses conséquences sur les figures d'interférences observées. Elle est construite à partir du schéma équivalent du coin d'air. Suivant ce schéma, on peut considérer les franges d'interférences comme les intersections de l'un des miroirs avec des plans dits « d'égale épaisseur », parallèles à l'autre miroir (figure 3).

La principale difficulté de l'interprétation de la translation des franges est liée à la capacité, pour les étudiants, d'imaginer, à partir d'une figure fixe, comment peut s'opérer l'évolution du système. Il s'agit ensuite de relier l'évolution d'une figure à l'évolution des franges observées sur un écran mural.

La figure (figure 3) utilisée met en parallèle le modèle d'une situation et l'observation correspondante, à la nuance près que ne sont représentés ici que les maximums d'intensité. Les brouillages liés à la cohérence temporelle de la lampe n'apparaissent pas car on s'appuie sur une définition géométrique des franges, les considérant comme des intersections de plans.

L'utilisateur peut translater le miroir mobile M, ou plutôt son image M', et observer simultanément l'évolution du schéma théorique [(2) dans la figure 3] et la translation des maximums d'intensité sur une image simulée de l'écran

sur lequel sont visualisées les franges réelles [(3) dans la figure 3]. L'utilisateur peut également se rendre compte, en comparant la simulation aux phénomènes réels, de l'écart qui existe du point de vue de la répartition de l'intensité : les maximums ne sont pas des traits et le contraste n'est pas constant, là encore car les franges sont définies comme étant des intersections de plans.

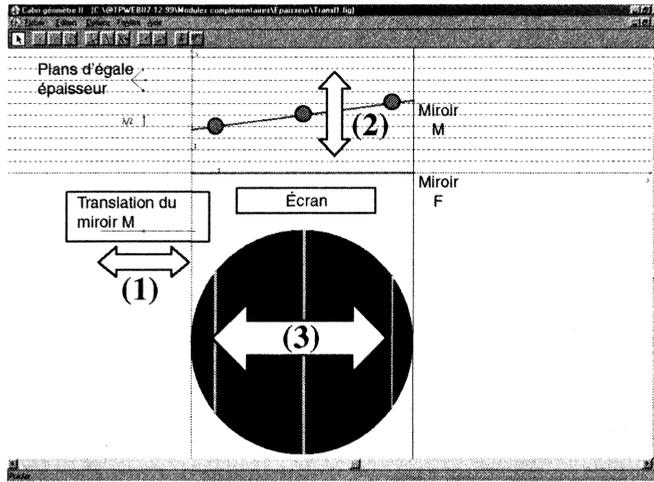


Figure 3 • Simulation de la translation du miroir mobile : le curseur (1) permet de déplacer le miroir mobile (2) et de voir évoluer la position des franges (3) qui correspondent sur la figure à l'intersection des plans d'égale épaisseur et du miroir M

2.2. Constitution d'une référence empirique

Nous avons vu précédemment une première action, la matérialisation du modèle, qui consistait à favoriser l'appropriation du modèle théorique. Cette action est complétée par la mise en place d'une référence empirique qui va permettre de baliser le champ empirique en fournissant à l'étudiant des repères que celui-ci n'a pas *a priori* (beaucoup d'étudiants n'ont pas vu antérieurement de figures d'interférences). Ces repères concernent :

- les actions qu'il effectue sur le dispositif expérimental (notamment l'identification du matériel),
- les réponses du dispositif (identification des phénomènes).

Les étudiants vont pouvoir appréhender l'éventail d'actions possibles sur le dispositif et leur pertinence soit par rapport à l'attente institutionnelle (l'action fait-elle partie du protocole défini par le document de TP ?) soit par

rapport à l'obtention seule de phénomènes (l'action peut ne pas figurer dans le document mais permettre l'observation de phénomènes étudiés).

L'identification du matériel et des phénomènes est intégrée à EnvIA par des photos. Le test des actions possibles est permis par l'application « test des configurations du dispositif » détaillée ci-après.

L'application de tests des configurations

Cette application (figure 4) reprend le principe de tests des différentes configurations du matériel. Elle permet aux étudiants de choisir une configuration donnée pour le dispositif et de savoir si on peut ou non observer des franges.

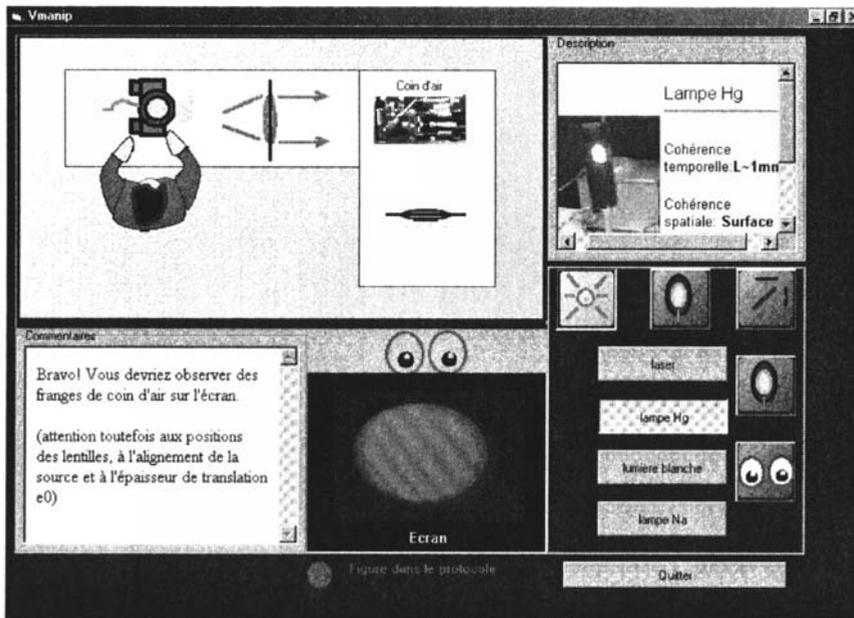


Figure 4 • **Application de tests des configurations** : l'application représente une vue de dessus schématique du dispositif. L'étudiant sélectionne un élément de chaque catégorie (source, focalisation entrée, interféromètre, etc.) et a un retour visuel (photo) et textuel (message) sur la pertinence de la configuration qu'il a mise en place

Plusieurs informations sont données à l'étudiant, un message textuel, une photo si la configuration permet l'observation d'un phénomène d'interférence et un retour sur la présence ou non de cette configuration dans la partie pratique du document de TP.

Cette simulation s'appuie sur un modèle discret de l'expérience (l'étudiant peut tester les combinaisons des éléments du tableau 1).

Sources	Focalisation entrée	Interféromètre	Focalisation sortie	Visualisation
Laser	aucune	Coin d'air	Aucune	Interféromètre
Lampe Hg	L1 « parallèle »	Lame d'air	L2	Spectroscope
Lampe Na	L1 « convergent »	Contact optique	L3	Écran
Lumière blanche				

Tableau 1 • Construction des configurations possibles par la détermination d'un élément de chaque catégorie (par exemple : lampe Na, L1 « parallèle », lame d'air, L3, écran)

L'application permet à l'étudiant :

- de voir un ensemble minimal de combinaisons potentielles et ainsi d'envisager les paramètres de la manipulation (à quels paramètres correspondent les différentes possibilités) ;

- d'acquérir le modèle qualitatif du dispositif proposé dans l'application, et de le mettre en lien avec le modèle quantitatif de référence, (mettre en relation l'utilisation d'une lentille en entrée avec la valeur de l'angle d'incidence par exemple) ;

- de voir qu'il y a un écart entre ce que l'étudiant peut envisager avec cette application et la mise en place concrète des configurations ; par exemple, mettre en place une source au niveau de l'application ne demande qu'un simple « clic » alors qu'il faut veiller dans la réalité au bon alignement de la lampe avec les miroirs ;

- de voir que l'on peut obtenir des phénomènes non prescrits par le polycopié, et faire ainsi la distinction entre le champ expérimental de référence et sa restriction institutionnelle. Ainsi, il est possible d'observer des franges de coin d'air avec la lampe au sodium, même si, dans le document polycopié de TP, on utilise, pour cette partie du TP la lampe au mercure.

2.3. Mise en relation et réinvestissement des connaissances

L'environnement met en relation les modèles et les champs expérimentaux du TP avec d'autres modèles et champs expérimentaux dans une perspective de transfert ou de différenciation des concepts et des phénomènes. EnvIA compare l'interprétation des couleurs de l'arc-en-ciel et celles des bulles de savon pour différencier réfraction, dispersion et interférences. Cette mise en relation se fait par l'architecture même de l'environnement et notamment le réseau des liens hypertextes qui le constitue.

3. EXPÉRIMENTATION D'ENVIA

Le logiciel a été testé lors d'un enseignement de TP de 4 heures. Vingt groupes d'étudiants en licence de physique et sciences physiques ont été observés et enregistrés (en audio) avec trois enseignants différents. Nous avons également mesuré la durée du TP et compté le nombre de consultations du logiciel.

Ces mesures confirment qu'Envia a été régulièrement utilisé : 946 utilisations sur les 18 groupes où le compteur était opérationnel. Cette utilisation est à l'origine d'une hausse nette de la durée moyenne de la séance de TP qui passe de 3 h18 (1998) à 3 h 52 (1999-2000).

Sur le nombre de consultations, 58 % correspondent à des éléments complémentaires du document photocopié de TP.

Nous présentons des exemples représentatifs d'analyse de discours transcrits. Les principaux résultats, leurs limites et les perspectives de développement sont abordés pour les composants d'EnvIA présentés précédemment. Nous appuyons ces résultats par d'autres obtenus par une analyse quantitative des verbalisations et par les comptes de consultations.

L'analyse du contenu des transcriptions a permis d'évaluer les apports des différentes composantes de l'environnement pour six groupes. Elle a porté également sur les interactions entre les différents acteurs (étudiants, enseignant, observateur) et les différents supports (document de TP, EnvIA). L'enjeu de cette analyse est de déterminer l'origine de l'appropriation par l'étudiant d'éléments du modèle enseigné pour décrire ses actions sur le dispositif matériel. De cette analyse seront tirés les exemples d'apports d'EnvIA présentés dans cet article.

L'analyse quantitative des verbalisations s'appuie sur une grille qui reprend, en partie, celle utilisée par Tiberghien (1994) et Bécu-Robinault (1997). Elle consiste à répertorier les verbalisations suivant trois catégories :

- « empirique » : la verbalisation n'a pour objet que des actions, des objets ou des phénomènes (« *Je bouge la vis* », « *on voit une tache lumineuse* »),

- « modèle » : la verbalisation fait explicitement référence à un élément du modèle (« *La différence de marche c'est fonction de l'angle de coin d'air* »),

- « relation empirique-modèle » : la verbalisation met en relation un élément du niveau empirique avec un élément du modèle (« *Les taches se superposent quand le coin d'air est nul* »).

Nous distinguons également les verbalisations spontanées de celles qui correspondent à la lecture d'un document que nous qualifierons de « lectures ».

3.1. Résultats concernant la matérialisation du modèle

Le principal rôle de la matérialisation du modèle a été de permettre une appropriation d'éléments du modèle qui favorise la mise en relation de ce modèle avec le champ expérimental.

Étudiant : « *On garde un coin d'air, on regarde l'influence de la translation (du miroir M). Donc elles (les franges d'interférences) se traduisent forcément ok. On a pas vu (varier) la netteté des franges* ».

La matérialisation du modèle complète dans certains cas le discours de l'enseignant si celui-ci aborde le modèle de manière implicite. Pour les 2 groupes (sur 6) qui ont utilisé la simulation, l'environnement a permis de s'approprier la relation « translation des franges – translation du miroir » sans que cette relation ne soit abordée par l'enseignant.

Un autre effet de la matérialisation du modèle est l'utilisation systématique d'EnvIA pour résoudre les problèmes d'interprétation. Sur les 6 groupes 64 % des 120 lectures au sujet du modèle sont des lectures d'EnvIA.

Cette utilisation est préalable au recours à l'enseignant. Ceci permet, non seulement une sélection des recours à l'enseignant, mais aussi l'instauration d'une réflexion personnelle préalable.

Cette réflexion personnelle amène des effets de focalisation : les étudiants s'appropriant en partie le modèle, l'enjeu de compréhension du TP est renforcé et ceci conduit à une dilatation de la durée consacrée à un problème spécifique. Certains étudiants ont consacré 30 minutes à l'étude du spectre cannelé, alors que d'autres ne vont qu'observer rapidement le spectre.

Par ailleurs, le dialogue étudiant-enseignant est facilité : s'appuyant sur les schémas et les simulations, les étudiants décrivent la situation matérielle à l'enseignant, le schéma ou la simulation revêtent alors un rôle de communication.

Dans l'extrait suivant l'étudiant s'appuie sur la simulation de la figure 1 pour discuter une limite du modèle employé pour déterminer l'épaisseur de la lame d'air.

Étudiant : « *Comment on peut mesurer l'épaisseur ? On a un coin d'air l'épaisseur n'est pas constante, il faut que le coin soit très faible* ».

Limites et perspectives

Les disparités entre les enseignants dans la mise en relation du modèle avec son champ expérimental se ressentent sur l'utilisation des simulations du modèle. Ces mises en relation correspondent à 46 % des 442 verbalisations d'un enseignant, 23 % (sur 273) de celles d'un autre enseignant (ces verbalisations correspondent à 2 séances de 4h de TP). Si le modèle est implicite dans les discussions avec l'enseignant, certains étudiants négligent l'interprétation des phénomènes. Ils se focalisent sur les manipulations qui leur semblent correspondre aux attentes de l'enseignant. D'autres vont privilégier leur compréhension des phénomènes et consulter EnvIA pour parvenir à leurs fins. Nous avons observé un cas dans lequel cette demande d'interprétation était stoppée par une intervention de l'enseignant pour faire « avancer » les étudiants dans le TP.

Autre point délicat, l'appropriation du modèle physique s'accompagne, dans le cadre d'un contrat didactique classique, d'une assimilation des simulations et des expériences (un résultat et un seul, le résultat expérimental est identique au résultat théorique). Les résultats expérimentaux s'effacent notamment devant ceux de la simulation.

Après avoir mesuré l'épaisseur de la lame d'air, l'étudiant appuie sa réponse sur la simulation et non sur sa mesure.

Étudiant : « *On a simulé et trois cannelures impliquent $e=1,5 \mu\text{m}$.* »

Si les étudiants se sont bien appropriés les relations entre grandeurs physiques visées par les simulations, il n'en reste pas moins que ces relations sont imposées. On ne permet pas aux étudiants de développer leurs propres relations avant qu'ils puissent les confronter au modèle proposé ou à l'expérience. Un développement de l'environnement consisterait à fournir des outils de conceptions de modèles (Schecker, 1993).

3.2. Résultats concernant la référence empirique

La référence empirique est très utilisée par les étudiants. La partie d'EnvIA traitant du matériel a été consultée 119 fois sur 18 groupes.

Un premier résultat est un gain de temps dans la mise en place du dispositif expérimental. Les difficultés d'identification du matériel, qui avaient été observées systématiquement dans l'étude exploratoire, disparaissent et laissent plus de temps à la résolution des problèmes de compréhension des concepts physiques, ceci dans tous les groupes.

On note que la référence empirique a également un rôle dans le processus d'évaluation des manipulations par les étudiants eux-mêmes. Ils

évaluent les phénomènes obtenus et peuvent décider de la poursuite du TP ou de la présence d'un problème pour lequel ils auront recours à l'enseignant. Cet apport aboutit aussi à une sélection des demandes d'intervention de l'enseignant.

Enfin, cette référence empirique offre la possibilité à l'enseignant de comparer la représentation simulée de l'expérience et l'expérience réellement effectuée. Les étudiants expriment leur positionnement dans une configuration du dispositif *via* l'application de tests des configurations. L'enseignant peut comparer les choix effectués dans l'application à l'état courant du dispositif. C'est pour lui un moyen de détecter des divergences entre les actions des étudiants sur le matériel et l'interprétation qu'ils en font au moyen de l'application. La détection de ces divergences amène à une discussion et à une tentative d'élaboration d'une interprétation qui soit plus cohérente.

Dans l'exemple ci-dessous, l'étudiant met en place l'interféromètre dans une configuration coin d'air. Sur l'application de tests des configurations il choisit une configuration correspondant à l'observation d'anneaux avec un interféromètre réglé en lame d'air.

Étudiant : « *Avec cette configuration (simulation du dispositif) il faudrait obtenir cette image*

Enseignant : « *Dans une heure et demie oui. On va commencer par regarder les franges d'égale épaisseur. Cette configuration (sur la simulation) correspond à la deuxième partie qui sont les franges dites d'égale inclinaison.* »

Limites et perspectives

Nous avons constaté, dans le cadre de l'enseignement de TP classique, une assimilation de la simulation et de l'expérience réelle.

Les étudiants utilisant l'application de tests des configurations remettent en partie en cause la spécificité du matériel physique.

Étudiant : « *On pourrait le faire (le TP) sans le matériel... ça fait exactement pareil* ».

L'application de tests des configurations et les photographies peuvent être complétées par la présentation d'aspects dynamiques des phénomènes sous forme de vidéos. Une utilisation de cette application sans l'enseignant nécessite un développement de son interaction avec l'utilisateur pour pouvoir prendre en charge les cas de décalage application-expérience liés à une mauvaise interprétation de l'utilisateur.

CONCLUSION

Nous avons présenté ici l'origine d'une innovation, l'introduction pour l'enseignement de travaux pratiques d'un environnement informatique nommé EnvIA, son développement et un aperçu des résultats obtenus lors de son expérimentation. Ces résultats portent sur les interactions des étudiants, des enseignants avec EnvIA et montrent deux apports d'EnvIA.

Le premier concerne son utilisation par des étudiants en autonomie : EnvIA permet l'appropriation de relations entre grandeurs du modèle physique et un meilleur repérage des phénomènes qui leur sont associés. L'interprétation des manipulations effectuées et des phénomènes observés devient plus systématique qu'auparavant.

Le second concerne l'enseignant pour lequel EnvIA peut être un outil d'évaluation et de communication. Nous avons toutefois souligné les limites de l'apport d'EnvIA et nous espérons à l'avenir pouvoir explorer les perspectives proposées pour enrichir le dialogue simulation-expérience dans les enseignements de travaux pratiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BÉCU-ROBINAULT K. (1997). Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction du concept de puissance. *Didaskalia*, n° 11 pp. 7-35.
- BUTY C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, université Lyon 2.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique. Du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- MÉHEUT M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique des gaz au collège, questionnement et simulation. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- SCHECKER H. (1993). Learning physics by making models. *Physics Education*, vol. 28, n° 2, pp. 102-106.
- TIBERGHEN A. (1994). Modeling as a basis for analysing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, n° 1, pp. 71-87.
- VIUDEZ C. (1998). *Modélisation dans le cadre de travaux pratiques en licence de sciences physiques : cas d'un TP sur l'interféromètre de Michelson*. Mémoire de DEA, université Grenoble I.

Cette innovation a été menée dans le cadre d'une thèse, sous la direction de Jean Dufayard et Daniel Lacroix. La thèse a été financée par le ministère de l'Éducation nationale de la Recherche et de la Technologie, et préparée au sein du LIDSET de l'université Joseph Fourier.

Ce texte a été reçu le 10 janvier 2001 et accepté le 16 avril 2002.

BOOK REVIEWS

FOURNOUT V. (Dir.) (2002). *L'entreprise-média et les contenus en ligne*. Paris, PUF, 219 p.

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) permettent désormais à de nombreuses entreprises et à des éditeurs spécialisés d'offrir virtuellement des ressources et des références sur Internet. Comme on le sait, ces bases de données et ces banques d'images, de valeur et d'utilité inégales, sont fréquentées par des utilisateurs variés, dont les enseignants et les étudiants. Le responsable de cette publication, Vincent Fournout, fait partie de l'une de ces sociétés nouvelles, appelée La Mine, qui produisent et commercialisent ces contenus en ligne. Sans prétendre servir de mode d'emploi ou d'analyse sociologique de la circulation de l'information sur la toile, son livre concis donne un état des lieux sur un domaine en pleine effervescence et fournit des conseils sur certaines approches de conception de contenus en ligne.

La première partie du livre décrit successivement les différentes formes de contenus en ligne, de métadonnées et d'animation sur Internet : les images GIF, les langages de script (comme le JavaScript), et de programmation (comme le Java). On y aborde aussi le phénomène de la caméra vidéo pouvant retransmettre des images en continu sur Internet (comme dans l'émission Star Académie) et la question de la temporalité liée à cette retransmission. On note d'emblée que le point de vue général de l'ouvrage est celui du concepteur offrant différents services électroniques et interactifs à des publics variés, moyennant une rétribution.

La deuxième partie porte sur des aspects moins techniques, plus humains : la convivialité sur la toile, les échanges, la nécessité pour le concepteur de se placer en position d'utilisateur, les aspects juridiques. Quelques pages du troisième chapitre (sur les acteurs et leurs usages) sont consacrées à l'éducation à distance par Internet. Les auteurs insistent sur le rôle de la personnalisation et de l'interaction devant intervenir dans la formation en ligne ; on y décrit ce « nouveau métier qui est en train de naître, à mi-chemin entre le professeur de faculté et le répétiteur privé » (p. 172).

Les auteurs sont conscients des risques de dérives de ce système, par exemple si les banques documentaires deviennent progressivement des prétextes à la surexploitation ou servent à abuser d'un patrimoine d'archives d'accès limité, dont la circulation risquerait de devenir restreinte en raison de sa rareté ou de son potentiel commercial. Cette tendance conduirait à une dissymétrie entre les archives de qualité – presque introuvables ou trop chères – et celles à la fois plus répandues et moins rigoureuses, offertes gratuitement. Ce problème n'est pas directement évoqué ici : s'il est plus facile de tomber sur un site personnel qui nous donne des éléments d'information sur un sujet donné, comment le néophyte peut-il faire la part des choses entre le juste et l'inexact, entre la rigueur et le superficiel ? Ainsi, doit-on se fier préférablement à l'encyclopédie Yahoo ou aux volumineux tomes de l'Universalis ? Comme en bien des domaines, le plus facilement accessible n'est pas forcément de la meilleure qualité, mais il y a aussi des exceptions.

L'ensemble se lit aisément mais exige une certaine familiarité avec l'univers de l'Internet. On déplorera toutefois dans « L'entreprise-

média et les contenus en ligne » la surabondance de mots anglais dans un ouvrage pourtant publié par les PUF ! On se demande si le réviseur linguistique était parti en vacances. La liste de termes étrangers rassemblés ici serait trop longue à énumérer ; indiquons seulement les plus choquants : « web design » (p. 93), « communication corporate » (p. 159), « newsletter » (pp. 94 et 162), « consumer » (p. 163). L'ouvrage se termine par une abondante bibliographie, comprenant une importante proportion de sites Internet. Ce livre semble d'abord destiné aux concepteurs de sites et aux agents de mise en marché, mais pourra aussi intéresser des chercheurs en technologie éducative, car il informe sur l'optique des concepteurs de contenus en ligne, qui ne sont pas forcément des éducateurs mais d'abord des communicateurs. Ce n'est pas la même chose.

Y. Laberge

HULIN N. (2001). *Études sur l'histoire de l'enseignement des sciences physiques et naturelles*, Lyon, ENS éditions, Cahiers d'histoire et de philosophie des sciences n° 49, 230 p.

Ce livre est constitué d'un ensemble d'articles assez courts qui abordent une question concernant l'histoire de l'enseignement des sciences physiques et naturelles aux XIX^e et XX^e siècles. Ces textes ont été présentés lors des journées d'étude sur l'histoire des sciences physiques et naturelles.

La préface indique que cette histoire de l'enseignement est encore peu développée et qu'elle doit sans cesse être reliée à l'histoire des disciplines. Comme le dit B. Belhoste dans un texte introductif, cette histoire de l'enseignement des disciplines ne doit pas être regardée comme une simple curiosité mais elle doit permettre de mieux comprendre la dynamique de la recherche scientifique, elle participe donc à une meilleure connaissance et compréhension de l'histoire de chaque discipline.

À la fin du livre, ces articles sont complétés par des documents du XIX^e siècle qui traitent tous du même sujet : faut-il enseigner à parts

égales les sciences et la littérature ? ou bien comment l'enseignement des sciences peut-il s'insérer dans l'enseignement traditionnel qui accorde une grande part, voire une part exclusive, à la littérature ?

Il y a par exemple, un texte de Georges Cuvier de 1807 : « De la part à faire aux sciences et aux lettres dans l'instruction publique » dans lequel il écrit « Il semble donc ne rester que deux questions faciles à résoudre ; les éléments des sciences mathématiques et physiques sont-ils d'une utilité assez générale à tous les états libéraux, pour qu'on les fasse entrer dans la partie de l'éducation commune à tous les états ? et les sciences et les lettres ne se nuiraient-elles pas réciproquement dans une étude simultanée ? ».

On voit bien que cette question de la constitution d'un socle de culture commune dans la scolarité obligatoire, n'est pas récente et qu'elle a suscité de nombreux débats qui ne sont pas clos.

Ce texte est suivi d'un extrait du Journal de Pierre-Louis Roederer, ministre de l'instruction publique sous le consulat, qui reprend les arguments de Cuvier, puis d'un texte du ministre Hippolyte Fortoul et du discours d'Armand de Quatrefages de Bréau (1852) qui conclut par cette phrase, je ne résiste pas à l'envie de vous la soumettre : « Désormais, dans nos lycées, la littérature n'opprimera plus la science ; jamais la science ne songera à opprimer la littérature. Appuyées l'une sur l'autre, comme deux sœurs qui s'aiment et se respectent mutuellement, elles travailleront à l'envi à élever les intelligences, à fortifier les cœurs ».

L'article de P. Taquet sur Cuvier et sur son implication dans les débats sur l'enseignement des sciences en France au XIX^e siècle, complète et enrichit la lecture des textes historiques. Il apporte également de nombreuses informations sur l'organisation des études au XIX^e siècle, sur les disciplines enseignées et sur les programmes.

Dans le même esprit, l'article de R. Locqueneux propose une étude sur Henri Bouasse, physicien né en 1866, qui a publié une série d'articles sur la méthode scientifique, sur le rôle de l'expérience dans la découverte scientifique et sur la place et

l'intérêt de l'histoire des sciences dans l'enseignement. Là encore je trouve que ces questions sont tout à fait actuelles et cette étude historique nous permet de les enrichir.

Les différents articles abordent à la fois une perspective historique concernant l'enseignement d'une science (les sciences physiques, la géologie, la biologie ou la chimie) mais ils posent également une question plus générale. Par exemple, la célèbre réforme de l'enseignement de 1902 est évoquée dans plusieurs articles : celui de D. Fauque en ce qui concerne la chimie et les exercices pratiques et celui de P. Kahn où il discute de l'influence du positivisme dans cette réforme.

D'autres textes portent sur les couplages ou au contraire sur les cloisonnements disciplinaires : par exemple G. Gohau examine comment la géologie est devenue une discipline enseignée en 1902, en se distinguant de la biologie et de la minéralogie.

N. Hulin montre comment, à la fin du XVIII^e siècle, on se préoccupe de définir chaque discipline par des caractéristiques propres, puis comment, au XIX^e siècle, certains scientifiques s'attachent à trouver (retrouver) des rapports entre les disciplines. Ainsi, au début du XIX^e siècle, il n'existe qu'une seule agrégation de sciences, ce n'est qu'en 1869 qu'on créera trois agrégations : mathématiques, sciences physiques, sciences naturelles.

On voit donc bien, à travers cette étude, comment les réflexions sur les sciences faites par des scientifiques vont avoir de l'influence sur la définition et le couplage des disciplines dans l'enseignement et comment les problèmes d'interdisciplinarité se posent depuis longtemps. C'est un peu la conclusion de N. Hulin : comment la connaissance de l'histoire des disciplines enseignées peut-elle nous faire réfléchir sur les questions d'interdisciplinarité et de décloisonnement ?

D'autres articles abordent des questions plus ponctuelles : par exemple l'étude d'un sujet d'agrégation de sciences naturelles par J. L. Fisher et celle de G. Morel sur les jardins scolaires qui furent en vogue dans la seconde moitié du XIX^e siècle.

Enfin, E. Satiel présente tout d'abord un rapide historique de l'enseignement des sciences de la nature, en introduisant la leçon de choses, puis elle compare les objectifs et les contenus des leçons de choses et de « La main à la pâte ». Elle montre des différences sur le statut des observations et des expérimentations, sur la place de l'argumentation, du débat, sur le rôle et la place de l'écrit. À la fin, elle montre l'importance, dans « La main à la pâte », de l'accompagnement des professeurs et des formateurs par des chercheurs.

En conclusion, j'ai trouvé ce livre tout à fait intéressant tant sur les informations historiques qu'il apporte que sur sa contribution à des débats sur la place des disciplines tout à fait actuels.

S. Coppé

HULIN N. (2002). *Les femmes et l'enseignement scientifique*. Paris, PUF, collection Sciences, histoire et sociétés, 227 p.

La quatrième de couverture de l'ouvrage de Nicole HULIN porte la mention suivante : « Ancienne élève de l'ENS, maître de conférences honoraire à l'université Pierre-et-Marie-Curie-Paris VI, chercheur (sic) au Centre Alexandre Koyré ; par ailleurs titulaire d'une agrégation scientifique masculine (par dérogation spéciale) ».

Ainsi défini, le parcours professionnel de l'auteur justifie déjà l'intérêt et la légitimité pour le sujet traité dans le livre : l'histoire de l'enseignement des sciences pour les filles et de la formation des professeurs-femmes scientifiques. L'ouvrage est suivi d'une postface de Claudine Hermann, actuellement professeur à l'École polytechnique, chargée de mission à la Communauté européenne sur « Femmes et sciences », qui actualise la situation historique sur la question de l'accès des filles aux études scientifiques. L'ouvrage est composé aussi par des annexes, certaines connues comme les textes de Condorcet ou de Jules Ferry, mais d'autres très originales et significatives sur les sujets de composition française donnés aux agrégations scientifiques féminines entre 1884 et

1937. Complété avec une chronologie, une bibliographie et un index, l'ouvrage est un précieux instrument de travail et de réflexion.

Cette étude, si elle complète les ouvrages généraux de Françoise Mayeur, devenus des classiques, sur l'éducation secondaire des filles au XIX^e siècle et de Bur Margadant sur l'École normale supérieure de Sèvres, est la première publication du genre qui scrute la formation des filles et des femmes à l'enseignement scientifique, dans l'entre-deux-guerres. Avec la parution attendue de l'ouvrage de Catherine Marry (Belin, 2003) sur les formations scientifiques des filles dans les écoles d'ingénieurs, on aura un panorama complet et inattendu sur la formation scientifique des filles. En effet, l'apport du livre de Nicole Hulin est fondamental pour déconstruire les idées reçues sur l'éducation des filles jusqu'à la généralisation de la mixité dans « les années 68 ».

L'auteur distingue bien la spécificité de l'enseignement féminin (à partir de la loi Camille Sée de décembre 1880) jusqu'à l'assimilation par le décret Bérard de 1924 qui ouvre, pour les filles, l'accès égalitaire au baccalauréat. Programmes, horaires, formation et résultats des filles sont attentivement scrutés, toujours à l'aune d'une mixité, entendue comme coéducation (cf. la circulaire du 3 juillet 1957). L'auteur se penche aussi sur le genre des concours et en premier lieu sur les agrégations scientifiques féminines. La distinction se fait entre l'agrégation de sciences naturelles (devenue rapidement mixte) et les agrégations de mathématiques et de physique-chimie. Si l'identification complète entre agrégation masculine et agrégation féminine se fait dans les années 1930 – à l'exception de l'horaire des épreuves minoré d'une heure pour les femmes –, c'est seulement en 1970 qu'aura lieu la fusion entre les deux agrégations sexuées (« genrées » serait plus juste, sinon plus élégant).

L'exemple des filles candidates à des concours masculins (entrée à l'ENS d'Ulm et agrégations masculines) est plus connu ; mais l'auteur s'appuie sur le dépouillement des journaux professionnels et sur une description fine des horaires et des options dans les différentes agrégations pour pointer la persistance d'une ségrégation (au sens de séparation)

dans le genre des concours (voir, pour les disciplines littéraires l'analyse de L. Efthymiou – thèse de doctorat d'histoire Paris 7, mai 2002).

On peut conclure de cette analyse très fine fondée sur les textes imprimés, officiels ou semi-officiels et les statistiques en soulignant la difficulté à imposer un enseignement mixte des sciences. Constat paradoxal, l'imposition tardive de la mixité – 1986 pour les ENS – conduit à l'effondrement des candidatures féminines dans les professions scientifiques.

Dans cet ouvrage précis et argumenté, Nicole Hulin dessine un paysage de mixité, certes tardive, mais réelle, qui questionne sur les aléas ou les conséquences de la mixité dans le système éducatif français. L'ouvrage, s'il ne décrit pas les pratiques des professeurs et des élèves au milieu des « années 68 » est un outil précieux pour lire les obstacles culturels, politiques et sociaux et finalement le « retard français » à cette mixité scolaire, théorisée dans un premier temps puis expérimentée – avec difficulté – dans l'entre-deux-guerres particulièrement par les femmes scientifiques.

M. Zancarini-Fournel

PERRET-CLERMONT A-N., PERRET J-F. avec la collaboration de GOLAY-SCHILTER D., KAISER C. et POCHON L-O. (2001). *Apprendre un métier dans un contexte de mutations technologiques*. Fribourg, Suisse, Éditions universitaires de Fribourg, 202 p.

Ce livre relate une recherche collaborative financée par un Programme National de Recherche en Suisse, de thème général : *L'efficacité de nos systèmes de formation*. Il aborde un thème d'actualité dépassant largement la Suisse, puisqu'il s'agit de réfléchir à l'efficacité d'un enseignement professionnel préparant les jeunes à l'entrée dans un monde du travail en pleine évolution. Le problème est posé de façon générale et est traité à partir d'une étude de cas menée à l'École Technique Sainte Croix (ETSC), dans le Jura suisse. En 1993, il s'agissait pour les responsables d'introduire de nouvelles technologies informatiques, de plus en plus

présentes dans l'industrie du secteur. Cette année-là naissait un vaste projet d'équipement avec en particulier l'achat d'une cellule d'usinage informatisée, puis d'une cellule d'assemblage avec robot, de façon à initier les élèves au « Computer Integrated Manufacturing ». Le grand intérêt de ce livre est d'avoir pris en considération différents niveaux d'analyse des « perturbations » que crée l'arrivée de nouvelles technologies, du plan le plus micro quand les auteurs observent des étudiants, au plan le plus macro quand ils retracent l'histoire socio-économique de la région.

Le livre s'organise en neuf chapitres, après une introduction qui en annonce l'articulation. Le premier chapitre, *Des compétences professionnelles recomposées*, s'interroge en quelques pages sur l'évolution des compétences à enseigner. Puis le second chapitre pose ce problème qui se résout de façon souvent fort différente d'un pays à l'autre ou au cours du temps : *Où s'acquiert les savoirs et savoir-faire professionnels ?* Entre la formation en entreprise, la formation à plein temps en école et la formation duale, c'est la solution du plein temps à l'école que pratique l'ESTC. Il s'agit donc de penser l'équilibre entre l'enseignement des savoirs et des savoir-faire, dans un contexte renouvelé, puisque l'école prend l'ensemble en charge. Le chapitre 3 est consacré au point de vue des enseignants : *Quand de nouveaux systèmes de fabrication entrent dans une école : ce qu'en disent les enseignants concernés*. C'est en effet les enseignants qui sont en première ligne pour « apprivoiser », comme il est dit joliment, les machines arrivantes. C'est eux qui peuvent juger comment ils vont les utiliser, comme machines didactiques seulement, ou comme machines industrielles plus ou moins professionnelles. L'engagement personnel, la remise en question de chacun lors de la réorganisation du plan d'étude, les tensions inévitables au sein d'une équipe enseignante où chacun vit une évolution, tout cela est décrit de façon précise.

Les trois chapitres suivants constituent l'étude de cas elle-même et rendent compte des observations des étudiants (ils ont entre 20 et 25 ans). Le chapitre 4, *Lors des travaux*

pratiques, que se passe-t-il ? les auteurs « franchissent le seuil des ateliers ». Ils observent des travaux pratiques d'automatisation, pendant lesquels les étudiants commandent par ordinateur la conception et l'usinage de pièces mécaniques. Dix étudiants en binômes ainsi que leur enseignant seront filmés pendant une séance (quatre heures) dont le terme est l'obtention d'une pièce définie. L'accent est mis sur les différents rôles assumés par l'enseignant (formateur, organisateur-instructeur et aussi ingénieur), et les interactions avec les élèves. Le chapitre suivant *Interagir et réussir*, étudie, lui, ce qui se passe au sein d'une paire d'élèves affrontés à une même tâche et devant collaborer pour discuter et mettre en œuvre des décisions communes. L'enregistrement d'un seul groupe est d'abord analysé au cours de phases de discussion, de décision, de résolution de problèmes. Puis ce sont les enregistrements de quatre groupes qui permettent de caractériser les interactions, partage des rôles, partage du pouvoir, prises de parole. Le chapitre 6 trace un tableau plus global de ce que les élèves vivent en travaux pratiques. Il s'intitule *Des activités d'apprentissage différemment interprétées*. Les données sont des entretiens préalables avec les enseignants, les enregistrements vidéos des travaux pratiques et des échanges qui ont accompagné les évaluations et l'attribution de la note. Enfin, des extraits de ces enregistrements ont été soumis aux commentaires des élèves concernés, d'autres élèves plus jeunes et des enseignants. Le chapitre 7, *Motivations professionnelles et rapport aux situations d'apprentissage*, se fonde sur un questionnaire écrit rempli par 143 élèves en formation à l'ESTC. Les questions sont celles du choix de l'École, des rapports de l'École à la vie active, des tâches, facteurs de réussite et d'échec pendant la scolarité, des choix professionnels et de l'image du professionnel qui s'est formée chez les élèves. Une analyse factorielle permet de structurer les résultats et en particulier de montrer la distance entre l'image de soi d'un élève et l'image qu'il a du professionnel. Le chapitre 8, *Faire face à l'introduction de nouvelles technologies : pour un repérage des dimensions en jeu*, ainsi que le chapitre de conclusion, *Perspectives pédagogiques*, tentent de synthétiser l'ensemble des résultats et analyses, et d'en

montrer l'extension possible à d'autres types et contextes d'apprentissage.

Ce livre est donc d'une grande richesse, puisque les auteurs ont conduit l'étude de cas, à des niveaux très différents d'analyse, micro (en travaux pratiques) et macro (analyse systémique de l'évolution industrielle dans la région et de l'enseignement technique). Au fil de la lecture, on trouve de nombreux résultats significatifs et convaincants, vu le soin apporté à la méthodologie et l'analyse. C'est ainsi que deux modèles d'apprentissage sont repérés (page 69 en particulier), l'un considérant l'autonomie comme processus et condition d'un apprentissage au sens classique de « learning by doing », l'autre comme produit et résultat de l'apprentissage. Ou encore les auteurs ont su écouter les élèves et montrent bien que l'image du professionnel (page 128) est un but, quelque peu figé, valorisé par les élèves, et ouvrant peu à l'adaptabilité que visent implicitement les enseignants. Tout au long du livre on trouve des définitions des rôles d'enseignants, rôles que, visiblement, les auteurs engagent à repenser si l'on veut faire évoluer l'enseignement professionnel et d'ailleurs tout enseignement. Le dernier chapitre en effet ouvre les conclusions à d'autres types d'enseignement, en plaidant le fait que l'on méconnaît la véritable place des savoir-faire dans l'enseignement, même dit général. On aurait donc beaucoup à apprendre des apprentissages qui se vivent dans les écoles techniques.

Cependant, pour conclure, les auteurs se servent beaucoup plus des analyses du système que du niveau micro d'analyse. Chacune des technologies adoptées entraîne un processus d'assimilation institutionnelle et pédagogique, qui n'est pas sans bouleverser les relations humaines et les modes pédagogiques. La « machine » s'introduit comme un quatrième pôle en relation avec l'enseignant, l'élève, le savoir, et tout est changé. L'école se trouvant à la croisée de la culture scolaire et de la culture d'entreprise, les effets sont parfois paradoxaux. Par exemple, on assiste à une scolarisation des activités, pour répondre aux demandes, ce qui fait que les budgets, pourtant importants, consacrés aux nouvelles technologies, n'ont pas servi à promouvoir

une pratique de projet ni une culture d'initiative. Une crainte existe chez les élèves : que les technologies ne les transforment en « presse-bouton ». C'est pourquoi les recommandations des auteurs sont de prendre en considération la construction de l'identité professionnelle, et du rapport au savoir des élèves. C'est un détour par rapport à l'analyse fine des processus d'apprentissage, tenant compte des interactions sociales. Cette analyse qui a fait la réputation de l'école de Neuchâtel, apparaît ici en retrait par rapport aux données sur les structures, quand les auteurs en appellent à une évolution nécessaire des rapports maître-apprenti. Au total un livre éclairant sur et au-delà de l'enseignement technique s'adaptant au monde du travail.

M.-G. Séré

ROUFFIAC-MISSONNIER M-F. (2002). *Mise en évidence de chemins d'apprentissage des élèves lors d'une ingénierie didactique d'électrocinétique*. Thèse de doctorat, université Paris 7.

La thèse de madame Missonnier concerne une ingénierie didactique relative à l'enseignement de l'électricité en classe de seconde (grade 10) en France. Dans une première partie théorique, consacrée aux analyses préalables, elle analyse de façon approfondie les programmes, la littérature relative aux représentations des élèves, les bases épistémologiques de la compréhension de la physique et les thèses constructivistes relatives à l'apprentissage. Sur ces bases, elle construit ses hypothèses et présente de façon différenciée la structure du contenu et celle des méthodes. Une seconde partie, plus courte, présente de façon très structurée le design de la séquence et de la méthode. Une troisième partie contient les résultats de la recherche en mettant en évidence le développement chez les élèves des concepts physiques en jeu. Les dernières parties de la thèse comparent les résultats qui sont évalués et résumés. Les résultats obtenus reposent sur un très grand nombre de données empiriques constituées principalement par un énorme recueil de productions écrites des élèves. On est très loin de l'étude

de cas. Ces commentaires très riches pourraient d'ailleurs faire l'objet d'analyses complémentaires.

Les hypothèses mises à l'épreuve concernent, la maîtrise des prérequis, une approche énergétique préalable du circuit électrique, une démarche qualitative du type « Main à la pâte », mais au lycée, et une introduction indépendante des concepts. Pour la construction de sa séquence elle a choisi de commencer par traiter de façon qualitative la question du circuit fermé et de la circulation avant même d'aborder les grandeurs physiques que l'on introduit d'habitude dès que l'on commence à étudier l'électricité. Les résultats obtenus montrent que le choix de ce « bouquet d'hypothèses » est payant. L'élaboration et la mise à l'épreuve d'une séquence d'enseignement sur ces bases, dans le cadre de l'ingénierie didactique, permettraient de qualifier la démarche d'ingénierie de production. Mais madame Missonnier n'en est pas restée là. En effet cette séquence lui a permis, dans une démarche cette fois qualifiable d'ingénierie de recherche, de mettre à l'épreuve avec succès l'hypothèse de J.-L. Closset sur la hiérarchisation des raisonnements en électricité et de montrer que les chemins cognitifs décrits par celui-ci étaient aussi des chemins d'apprentissage. Il s'agit là d'une avancée importante sur le plan scientifique.

Au passage elle a mis en évidence des représentations des élèves, jusqu'à ce jour inconnues, à propos de la ddp et de la résistance électrique.

Il est à souligner aussi que madame Missonnier a tenu à faire réaliser sa séquence par d'autres collègues, d'abord proches, puis d'autres académies. Pour ce faire elle a élaboré un long document écrit. Ce faisant elle ouvre le chantier de la transmission à des enseignants lecteurs, pas forcément formés à la didactique, de pratiques pédagogiques et de concepts didactiques à mettre en œuvre sans que le « pilote » ne soit là pour aider ces enseignants à résoudre les difficultés au fur et à mesure qu'ils les rencontrent. Les très nombreuses traces écrites laissées par leurs élèves permettent d'éclairer la façon dont ces enseignants se sont appropriés la séquence. L'analyse des difficultés rencontrées par les

professeurs pour échapper au poids des coutumes et pour intervenir sur le mode de la médiation lors des interactions avec les élèves ouvre des pistes pour la formation des enseignants.

L'originalité de la démarche dans le cadre de l'ingénierie didactique fait aussi progresser le concept au plan méthodologique, montrant tout l'intérêt qu'il y a à sortir de l'étude de cas, mais au prix d'un énorme travail de recueil de productions écrites d'élèves et d'une analyse très fouillée.

J.-L. Closset

ROUX-LANIER C., LANOT F., PIMBE D., ROBERT A. (2001). *La culture générale de A à Z*. Paris, Hatier, 415 p.

Est-il indispensable d'être cultivé pour réussir en société ? La notion de culture générale, à la fois évanescence et relative, demeure cruciale pour les formateurs de tous les niveaux. On pourrait provisoirement la définir par « tout ce qui ne fait pas partie de votre discipline ni de votre profession mais que vous devriez néanmoins savoir ». Le présent ouvrage fournit des notions de culture générale empruntées autant à l'histoire, la philosophie, les courants de pensée, les arts et les lettres, et contient en outre des notices consacrées à la science et à de nombreux enjeux contemporains : le contrat social, la tolérance, le tiers-monde (expression créée par A. Sauvy en 1952). L'ensemble réunit plus de 200 notices d'environ une page, ordonnées alphabétiquement, partant de l'absolutisme (pp. 5-6) jusqu'à la ville (p. 394 et sq.), ici présentée sous ses aspects géographiques, historiques et littéraires. Trois des quatre co-auteurs de *La culture générale de A à Z* sont d'anciens élèves de l'École normale supérieure ; tous sont professeurs dans des classes préparatoires aux grandes écoles de France.

Ce livre étoffé se distingue d'un simple dictionnaire par son grand nombre d'entrées consacrées spécifiquement à des notions qui ne se résument pas en un seul mot et qui ne se trouveraient pas aisément dans des dictionnaires généraux, comme les origines

de la droite et de la gauche en politique, le mouvement des lumières, la réforme protestante, la révolution industrielle. La notice sur la révolution scientifique identifie cette notion par « un changement de perspective culturelle » (p. 317) et retrace les changements de paradigmes, depuis la Réforme jusqu'à nos jours, tout en décrivant les circonstances ayant permis « l'avènement de l'esprit scientifique » (p. 318).

Les auteurs parviennent à délimiter les notions retenues selon diverses perspectives disciplinaires, alliant la théorie à des exemples pratiques, en y incluant souvent des éléments critiques. La notice consacrée à la technique (p. 368) indique d'emblée, après une double définition du terme, que la neutralité de la technique n'est qu'illusoire, que des auteurs comme le philosophe Jacques Ellul ont théorisé une critique de la technique ; la notice se termine par des remarques sur l'éthique et les enjeux contemporains liés aux nouvelles technologies. La notice la plus longue de l'ouvrage, consacrée à la physique, comprend des développements très clairs sur la thermodynamique, mais aussi sur la théorie de la relativité et sur la structure de la matière.

La grande force de cet ouvrage réside dans sa volonté interdisciplinaire : ainsi, la bibliographie consacrée au thème du nucléaire (p. 265) mentionne quelques références relevant du domaine purement scientifique, mais suggère aussi des livres comme

Le principe responsabilité du philosophe de Hans Jonas, *La prophétie anti-nucléaire* du sociologue Alain Touraine et inclut en outre, comme complément de réflexion, des titres de films (non pas de documentaires mais fictifs) comme *Hiroshima mon amour* d'Alain Resnais et *Docteur Folamour* de Stanley Kubrick. Les responsables ont rédigé deux notices distinctes sur la biologie et la bioéthique. Par conséquent, le lecteur réalise que la science existe en société et que celle-ci implique intrinsèquement des interventions humaines, donc subjectives. Plusieurs encadrés approfondissent une dimension sociale de la science en rapport avec le thème particulier de la notice.

Conçu d'abord pour la préparation de certains concours d'entrée dans les grandes écoles françaises (IEP, ECE) et en vue des épreuves du baccalauréat, le livre « La culture générale de A à Z » servira en outre aux futurs enseignants et aux didacticiens, dans la mesure où les auteurs réussissent à présenter clairement des notions familières mais parfois difficiles à cerner. On peut également y lire par pur plaisir d'autres notices sur l'épicurisme, le jazz ou la musique romantique. La culture générale touche une foule d'aspects qui sont en apparence futiles pour ceux qui ne les connaîtraient pas.

Y. Laberge