

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.

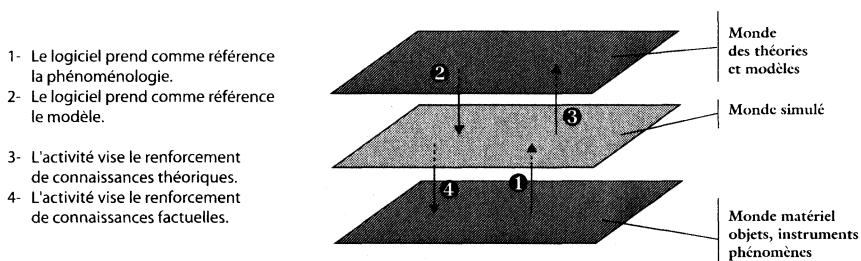


Figure 1 • La simulation entre monde matériel et théorie

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).

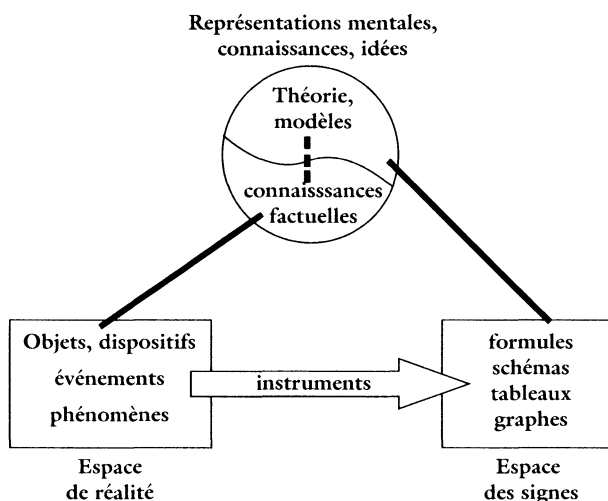


Figure 2 • Un espace des signes qui fait partie du « réel » de l'élève en classe de physique

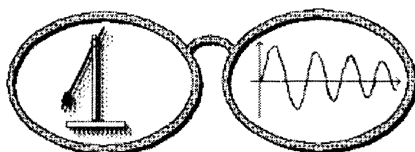


Figure 3 • La lunette cognitive ; P. Nonnon (logo de l'association EVARISTE⁶)

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-technique, 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).

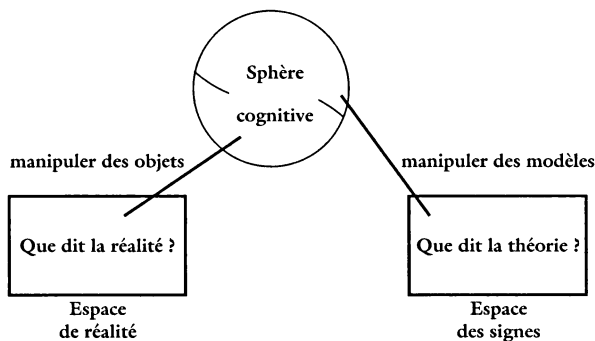


Figure 4 • La simulation pour manipuler des modèles

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 ;

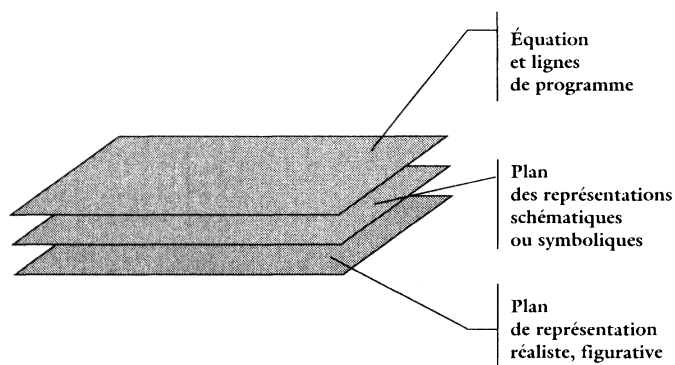


Figure 5 • Une structure feilletée pour les environnements de simulation

– 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).

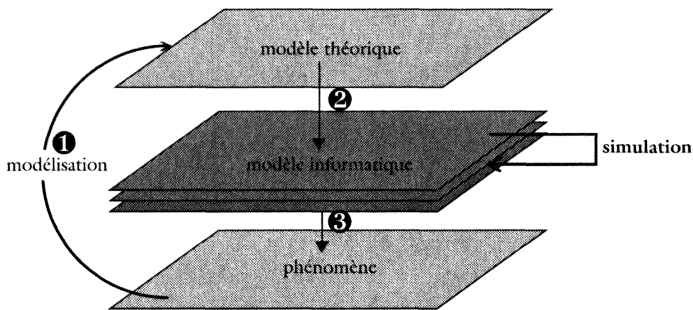


Figure 6 • Modélisation et simulation

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.

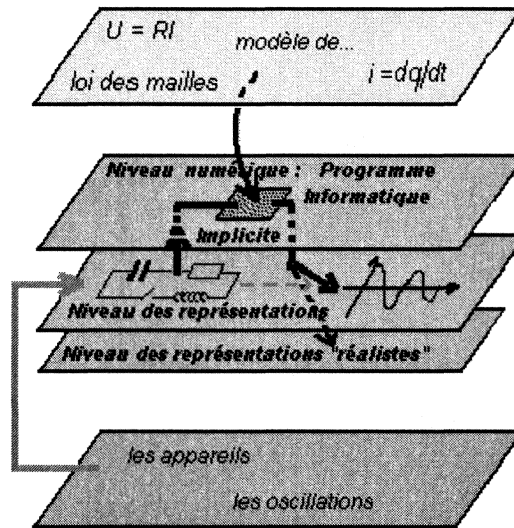


Figure 7 • **Actions dans un environnement de simulation : les flèches en gras indiquent un chemin d'actions qui court-circuite le modèle**

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).

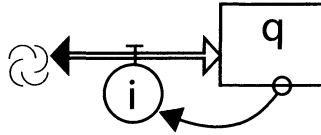


Figure 8 • Symbolisme dans *Stella/Think*

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).

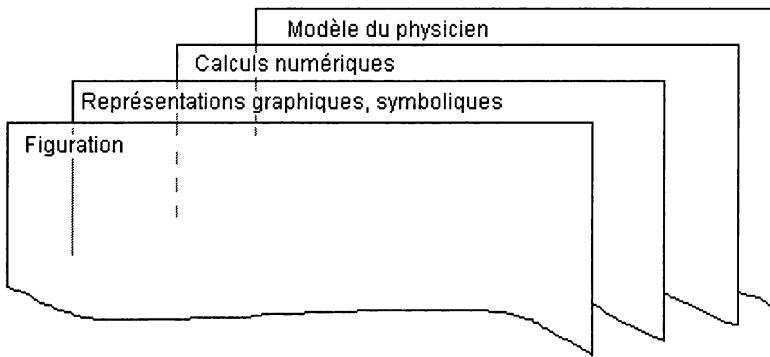


Figure 9 • Jeu de perspective des différents plans, le passage de l'un à l'autre, voire leur « transparence » ne doit pas amener à les confondre. Et suivant le logiciel, les points d'entrée et d'action sur le simulateur ne seront pas situés sur le même plan

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.

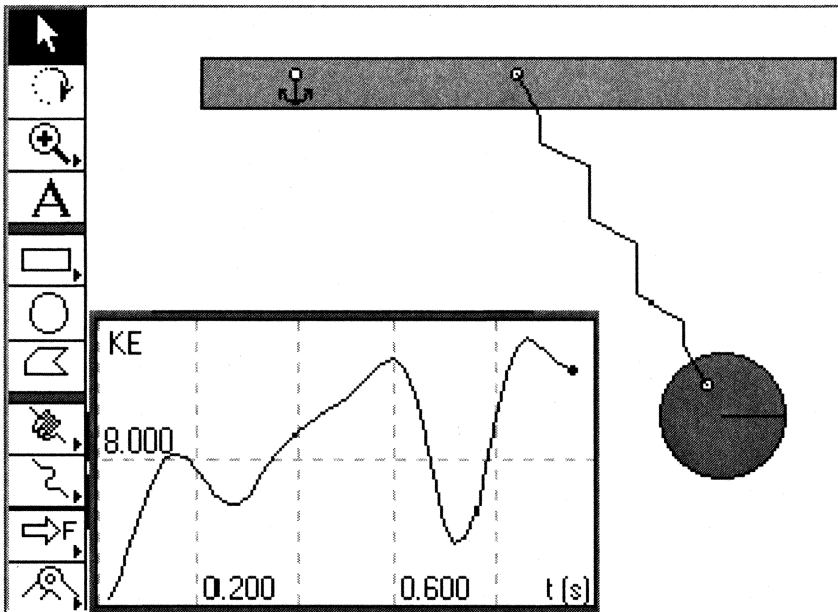
ANNEXE

Présentation de quatre logiciels cités

Interactive Physique

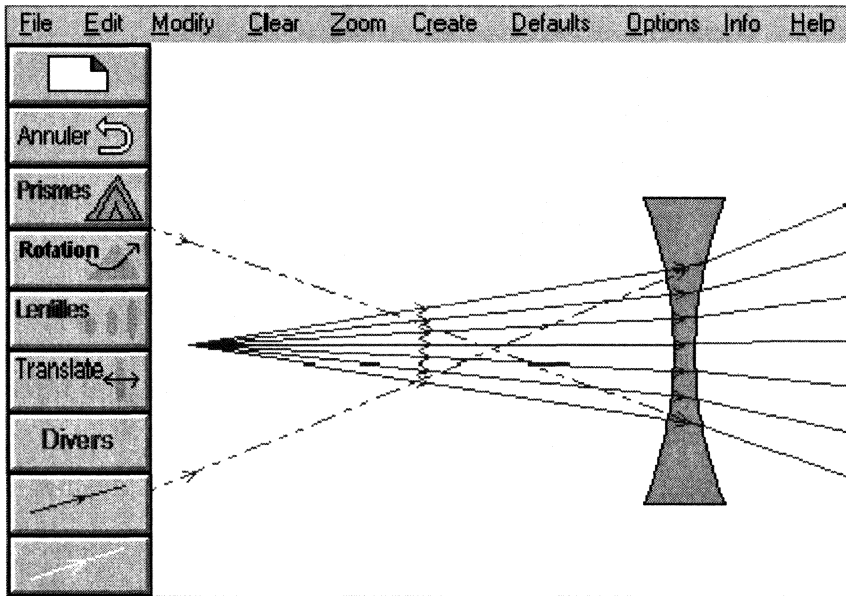
Logiciel de simulation de mécanique newtonienne fondé sur l'assemblage de représentations figuratives d'objets physiques (masse, ressort, liaison, etc.) affectés de propriétés.

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

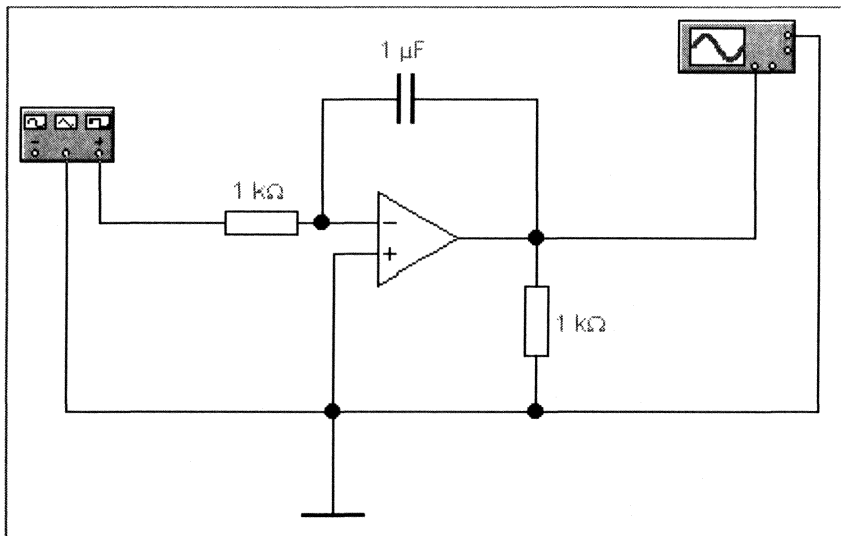


Ray Trace

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.



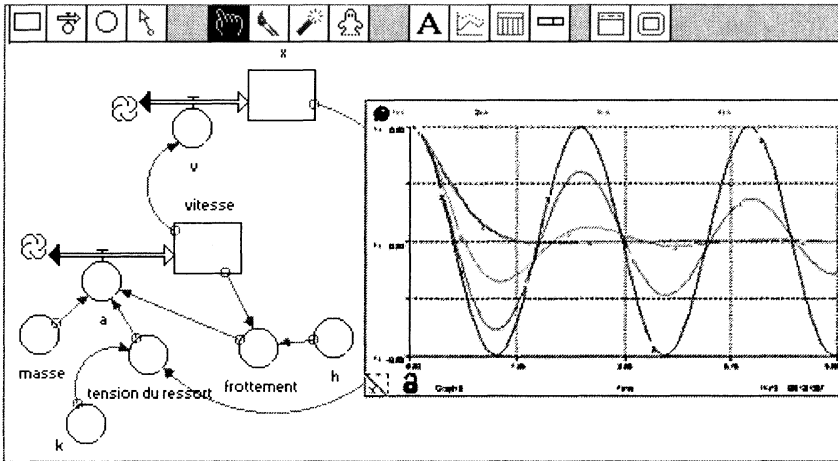
Electronics WorkBench



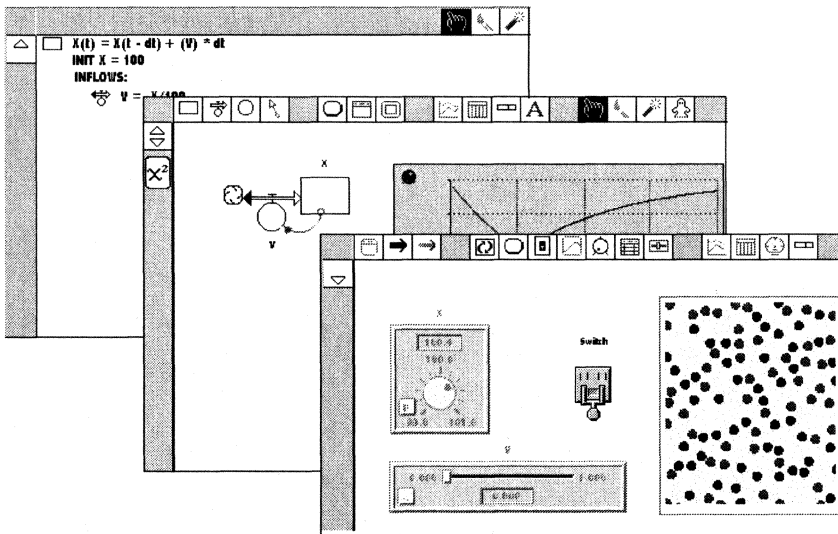
Logiciel professionnel de simulation de circuits électriques et électroniques, EWB permet de réaliser les circuits de son choix par assemblage des différents composants.

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.