

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

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

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

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

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

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

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

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

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

I. Considérations théoriques

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

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

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

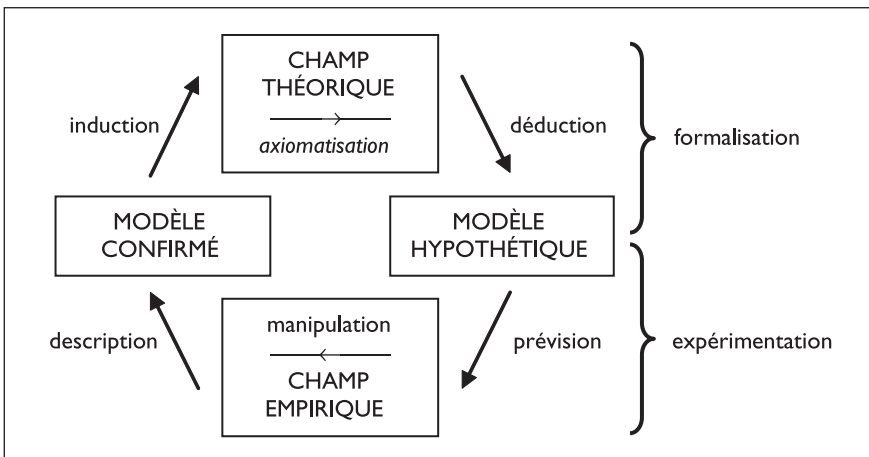
de celle qu'ils accordent au processus de transposition (ou de conversion) qui a permis la mesure. Ainsi, pour que cette confiance soit la plus grande possible, il nous est apparu souhaitable de conserver un lien perceptible avec ce qui est considéré comme réel par les étudiants. En d'autres mots, durant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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Rôle des TIC dans la formation à la modélisation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.1. Fenêtre d'animation

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

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

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



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

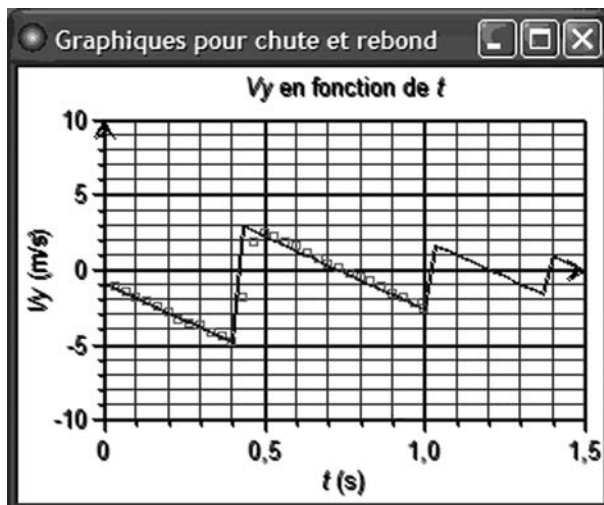
dians de comparer directement la réalité (séquence vidéo) au modèle (dessiné en superposition sur les images). Cette comparaison a l'avantage d'être moins abstraite que celle qui nécessite l'intermédiaire de graphiques, par exemple, et par conséquent risque d'être plus convaincante pour les étudiants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

3.2. Fenêtre des graphiques

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

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

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



3.3. Fenêtre des paramètres

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

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

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

Celles de droite affichent les valeurs des paramètres mesurés.

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

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

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

3.4. Utilisation de la vidéo

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

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

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

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

3.5. Paramètres des objets

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

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

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

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

Tableau 3. Paramètres des objets

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

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

4. Présentation d'une situation d'apprentissage

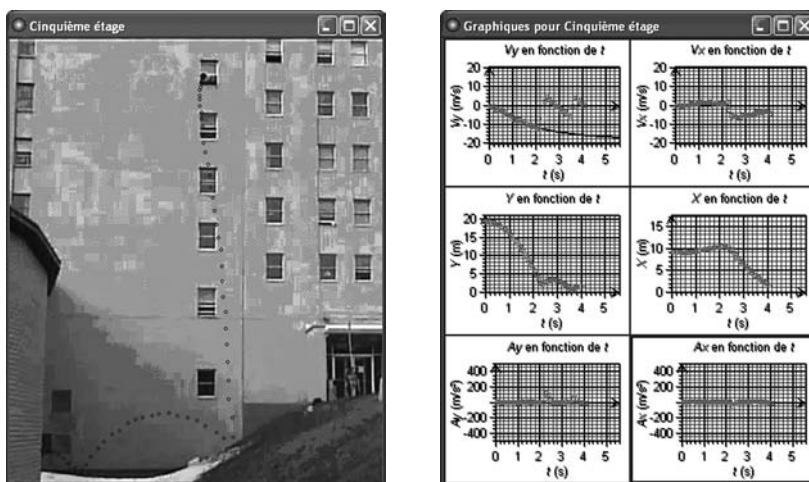
Cette section présente les résultats de l'utilisation de notre environnement en relation avec une situation d'apprentissage de la modélisation de la chute d'un corps. Cette situation a été créée pour les besoins de la recherche et elle est maintenant utilisée à grande échelle au collège Jean-de-Brébeuf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

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

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

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

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

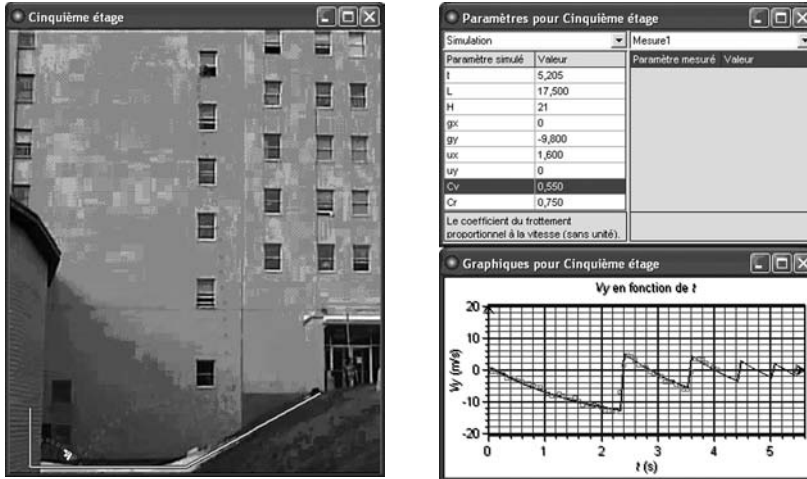


Pour vérifier leurs hypothèses, les étudiants peuvent afficher des relations théoriques sur les graphiques et les ajuster aux ensembles de points : c'est une méthode habituelle en ExAO. Cependant, la présence d'un système de SAO ouvre de nouvelles possibilités. Les étudiants peuvent, en effet, créer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

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

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

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



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

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

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

5. Modélisation didactique des cheminements d'apprentissage

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

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

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

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

Tableau 4. Exemple de synthèse des transcriptions et des identifications

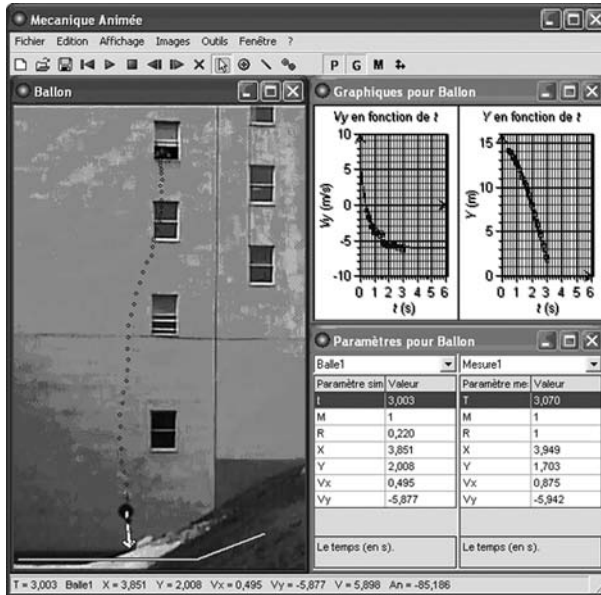
Interventions d'étudiant	Description synthétique	Identifications automatisées
<p>« Ça m'a l'air correct. Oui là c'est pas mal synchronisé. On était peut-être un cheveu en retard. Le temps n'était pas bon » (D97),</p> <p>« Si on change le temps à 1,09 d'après moi, ça va être encore plus concluant » (D98).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

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

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

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

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



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

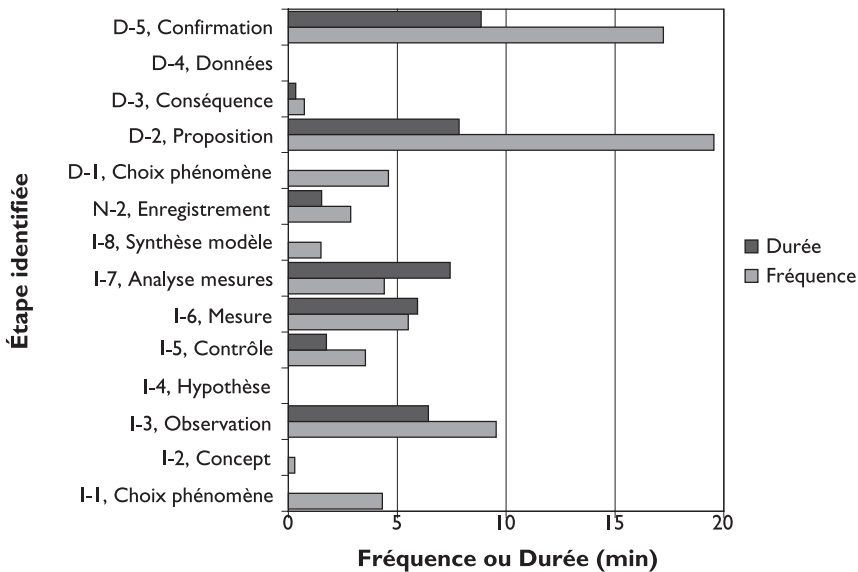
Lors des mises à l'essai systématiques, les réponses des étudiants à un questionnaire (quantitatif et qualitatif) ont permis d'observer que 93 % d'entre eux se sont montrés plus intéressés par cette expérience que par celles du même semestre. De plus, presque tous les étudiants ont déclaré que l'environnement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

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

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

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

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



6. Conclusion

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

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

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

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

BIBLIOGRAPHIE

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

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

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