

SOUS LA DIRECTION DE
MARTIN RIOPEL, PATRICE POTVIN ET JESÚS VÁZQUEZ-ABAD

UTILISATION DES TECHNOLOGIES pour la recherche en éducation scientifique



<http://www>

pul

Page laissée blanche intentionnellement

Page laissée blanche intentionnellement

**Utilisation
des technologies
pour la recherche
en éducation
scientifique**

Page laissée blanche intentionnellement

SOUS LA DIRECTION DE
MARTIN RIOPEL, PATRICE POTVIN ET JESÚS VÁZQUEZ-ABAD



**Utilisation
des technologies
pour la recherche
en éducation
scientifique**

Les Presses de l'Université Laval

Les Presses de l'Université Laval reçoivent chaque année du Conseil des Arts du Canada et de la Société d'aide au développement des entreprises culturelles du Québec une aide financière pour l'ensemble de leur programme de publication.

Nous reconnaissons l'aide financière du gouvernement du Canada par l'entremise de son Programme d'aide au développement de l'industrie de l'édition (PADIÉ) pour nos activités d'édition.

Maquette de couverture et mise en pages : Mariette Montambault

ISBN 978-2-7637-8728-2

© Les Presses de l'Université Laval 2009
Tous droits réservés. Imprimé au Canada
Dépôt légal 4^e trimestre 2009

Les Presses de l'Université Laval
Pavillon Maurice-Pollack, bureau 3103
2305, rue de l'Université
Québec (Québec) G1V 0A6
Canada

www.pulaval.com

TABLE DES MATIÈRES



Présentation des directeurs	
Martin Riopel, Patrice Potvin, Jesús Vázquez-Abad . . .	XIII

Introduction

Des technologies de plus en plus présentes, de plus en plus perfectionnées, de plus en plus efficaces.	1
---	----------

Chapitre 1

Utilisation des technologies pour la recherche sur la modélisation algébrique des phénomènes scientifiques	5
Résumé	5
Introduction	6
1. Problématique	7
2. Importance de la modélisation algébrique dans la démarche expérimentale en sciences	13
3. Modélisation algébrique	14
4. Modélisation algébrique pour la Régression Graphico- Statistique (RGS)	15
5. Justification mathématique de la méthode (RGS) et unicité.	19
6. Généralisation de la méthode RGS aux fonctions polynomiales.	20
7. Résultats de cette recherche auprès des élèves	20
Conclusion.	21
Bibliographie	23

Chapitre 2

Apport d'une infrastructure informatique dans l'analyse de trace cognitive	25
Résumé	25
Introduction	26
1. Cadre théorique	26
2. Méthode	36
3. Analyse séquentielle	38
Conclusion.	42
Références.	43

Chapitre 3

Un dispositif de suivi oculaire pour l'analyse de l'attention et des processus cognitifs des apprenants en physique	45
Résumé du projet	45
Introduction	46
1. Problématique de la recherche	47
2. Objectif de la recherche	51
3. État de la question et travaux reliés.	53
4. Approche méthodologique	66
Conclusion.	72
Références.	73

Chapitre 4

Les technologies mobiles pour mieux comprendre l'apprentissage coopératif dans un cours de physique.	79
Résumé	79
Introduction	80
1. Problématique	80
2. Cadre théorique	81
3. Objectifs	86
4. Méthodologie	87

5. Résultats	92
6. Discussion et perspectives	101
Conclusion	104
Bibliographie	106

Chapitre 5

Protocoles socioconstructivistes et simulateurs en astronomie : rôle sur l'apprentissage, le développement des compétences et la motivation	111
Résumé	111
Introduction	112
1. Contexte et problématique de la recherche de développement	113
2. Cadre théorique	117
3. Méthodologie	124
4. Résultats	132
Conclusion	136
Bibliographie	137

Chapitre 6

Maîtriser l'environnement d'expérimentation en éducation scientifique : l'expérience du LabUQAM	139
Résumé	139
Introduction	140
1. Une brève description de l'infrastructure	142
2. Difficultés méthodologiques rencontrées dans la recherche sur l'apprentissage ouvert en sciences et solutions qu'apporte l'infrastructure de recherche	142
3. Quelques résultats à anticiper	152
Conclusion	154
Remerciements	155
Bibliographie	155

Chapitre 7

Utilisation des simulations informatisées pour la recherche en éducation	157
Résumé	157
Introduction	158
1. Concept de simulation	158
2. Quelques approches classiques	159
3. Cinq exemples	162
Conclusion.	173
Références.	174

Chapitre 8

Les TIC dans le cadre de la recherche en enseignement des sciences et des technologies	177
Résumé	177
Introduction	178
1. Le rôle et l'importance des activités de laboratoire	178
2. La dynamique au sein des laboratoires	180
3. Les technologies d'informations et de communications (TIC) dans les laboratoires . . .	182
4. La robotique pédagogique	186
5. Vers le développement d'un environnement d'ExAO pour la recherche	187
6. Les limites	191
Conclusion.	192
Bibliographie	193

Chapitre 9

Utilisation de l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel en sciences	197
Résumé	197
Introduction	198
1. Pourquoi utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel ?	199
2. Comment utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel ?	208
Conclusion.	218
Bibliographie	219

Chapitre 10

Suivi informatique des cheminements pour la recherche en éducation scientifique.	223
Résumé	223
Introduction	224
1. Considérations technologiques	225
2. Contexte de développement.	227
3. Questions de recherche	232
4. Présentation des prototypes	234
Conclusion.	246
Bibliographie	246

Page laissée blanche intentionnellement

PRÉSENTATION DES DIRECTEURS



Martin Riopel est professeur à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Montréal. Scientifique de formation, codirecteur du *Laboratoire mobile pour l'étude des cheminements d'apprentissage en sciences*, du *Centre pour les applications des modèles de réponses aux items* et auteur de plusieurs logiciels éducatifs, ses intérêts généraux de recherche portent sur les environnements informatisés d'enseignement, d'apprentissage et d'évaluation dans le contexte des sciences, des mathématiques et des langages. Ses derniers travaux s'intéressent plus particulièrement à la production automatisée et informatisée de tâches d'évaluation en sciences.

Patrice Potvin est professeur en didactique des sciences au secondaire à la Faculté des sciences de l'éducation de l'Université du Québec à Montréal. Il a œuvré dans le développement de nombreux programmes de formation, tant au secondaire qu'au niveau universitaire. Directeur du *Laboratoire Mobile pour l'étude des cheminements d'apprentissage en sciences* et du LabUQAM en collaboration avec le *Centre des sciences de Montréal*, ses intérêts de recherche portent sur l'apprentissage des sciences en contexte ouvert, sur la neuroéducation ainsi que sur le changement conceptuel.

Jesús Vázquez-Abad est professeur en didactique des sciences à l'Université de Montréal, titulaire de la Chaire d'étude et de recherche en enseignement des sciences et des technologies en milieu scolaire et collégial, ainsi que membre fondateur et du comité de Gestion de MATI Montréal. Il a été professeur à l'Universidad Nacional Autónoma de Mexico et à Concordia University. À l'Université de Montréal, il a été responsable pédagogique des programmes de formation initiale des maîtres de secondaire et directeur du Département de didactique. Il mène présentement des recherches sur divers aspects de l'apprentissage de la physique et de la chimie à l'aide des applications des TIC, tels les simulateurs, l'apprentissage mobile et les télévotants ; il effectue également des recherches en apprentissage collaboratif distribué et en enseignement conceptuel de la physique.

Page laissée blanche intentionnellement

INTRODUCTION



Des technologies de plus en plus présentes, de plus en plus perfectionnées, de plus en plus efficaces

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal

Jesús Vázquez-Abad, Université de Montréal
et MATI-Montréal

O n a pu remarquer, ces dernières années, l'utilisation de plus en plus fréquente de technologies dans le cadre de recherches en éducation. Ces outils et dispositifs, souvent complexes, sont également de plus en plus perfectionnés et permettent de surmonter de mieux en mieux certaines difficultés méthodologiques typiques de, et exclusifs à, la recherche en éducation. En éducation aux sciences, ils permettent, par exemple, de simuler des réalités physiques à travers des micromondes, des simulations et des laboratoires virtuels en rendant possibles l'enregistrement et l'analyse des interactions que les élèves entretiennent avec eux. Les technologies favorisent également un meilleur contrôle des variables expérimentales, un meilleur accès aux sujets, l'étude de paramètres autrefois impossibles à obtenir (comme dans le cas des appareils à résonance magnétique, etc.). Finalement, ils permettent d'étudier les phénomènes sociaux liés aux derniers développements de la

technologie de pointe et qui présentent une incidence importante à la fois sur la vie quotidienne des personnes mais aussi sur la vie professionnelle et sur l'apprentissage (Internet, ordinateurs et téléphones portables, baladeurs numériques, etc.). La définition de « technologie » proposée plus haut ne se réduit cependant pas à ces exemples et autorise une qualification plus large, bien que circonscrite.

Cet ouvrage poursuit deux grands objectifs principaux, soit 1) faire connaître les résultats de recherches en éducation scientifique et en éducation en général lorsque sont utilisés des outils ou des dispositifs technologiques dans les recherches qui poursuivent l'objectif de faire progresser les connaissances et 2) mettre l'accent sur ces dispositifs et sur les difficultés particulières (et liées à la recherche) qu'ils permettent de résoudre, de surmonter ou de soulager. Nous souhaitons que le regroupement dans un même ouvrage de ces expériences de recherche qui utilisent les technologies et dont les méthodologies feront volontairement l'objet d'une présentation détaillée puissent profiter aux professeurs, aux étudiants diplômés et aux chercheurs qui s'intéressent au domaine passionnant de l'éducation aux sciences et aux technologies.

L'ouvrage est divisé en dix chapitres, dont voici un bref aperçu. Au chapitre 1, Georges Touma présente une nouvelle méthode interactive, la méthode de régression graphico-statistique, pour l'évaluer l'erreur expérimentale durant le processus de modélisation en sciences. Ses résultats démontrent que les élèves développent une attitude positive et réussissent mieux avec cette méthode. Dans le chapitre 2, Julien Mercier, Monique Brodeur, Line Laplante et Caroline Girard s'intéressent à l'analyse informatisée de traces du fonctionnement cognitif appréhendé en termes d'états mentaux séquentiels. Ils proposent ainsi des bases du fonctionnement cognitif qui rendent possibles des analyses plus écologiques des actions et des verbalisations en contexte plus authentique. Dans le chapitre 3, Fethi Guerdelli, Aude Dufresne, Odile Martial, Mohamed Droui et Jesús Vázquez-Abad présentent une application du suivi oculaire et physiologique par un tuteur informatisé conçu à des fins d'apprentissage en physique. Cette recherche en cours vise améliorer les capacités d'adaptation des tuteurs informatisés par la gestion pertinente de ces nouvelles sources d'informations. Ensuite, Mohamed Droui, Odile Martial, Sabine Kébreau, Samuel Pierre et Jesús Vázquez-Abad s'intéressent, dans le chapitre 4, à l'apport des

technologies mobiles dans un cours impliquant un apprentissage collaboratif en physique. Leurs résultats démontrent que ces technologies contribuent significativement au changement conceptuel et à la compréhension. Au chapitre 5, Martin Beaulieu, Odile Martial, Claude Carignan et Jesús Vázquez-Abad étudient l'apport des simulateurs en astronomie dans le contexte de protocoles socio-constructivistes. Ils proposent que la technologie de traçage Morae offre un grand potentiel d'investigation pour mieux comprendre les processus complexes de l'apprentissage collaboratif avec des simulateurs. Patrice Potvin, Martin Riopel et Patrick Charland présentent au chapitre 6 la structure et le fonctionnement d'une activité de recherche au *Centre des sciences de Montréal* qui utilise des technologies et qui s'intéresse à l'apprentissage ouvert. Ils insistent sur les difficultés méthodologiques ainsi que sur l'importance de maîtriser l'environnement d'expérimentation dans ce contexte. Dans le chapitre 7, Gilles Raïche, Komi Sodoké, Jean-Guy Blais, Martin Riopel et David Magis présentent les principes et les méthodologies reliés à l'utilisation des simulations en recherche. Ils illustrent ces différentes approches à l'aide de cinq exemples issus de leurs travaux en éducation. Frédéric Fournier s'intéresse au chapitre 8 à l'utilisation des ordinateurs au laboratoire de science et de technologie. Il propose la conception d'un environnement d'expérimentation assistée par ordinateur qui conserverait les traces des actions des apprenants issues de l'environnement informatisé mais aussi de webcams ou d'enregistrements sonores. Au chapitre 9, Steve Masson, Patrice Potvin et Martin Riopel expliquent comment une technique d'avant-garde, l'imagerie cérébrale, permet d'analyser la façon dont le cerveau des élèves travaille et comment cette analyse peut contribuer à l'étude du changement conceptuel en sciences. Ils présentent les avantages, les démarches ainsi que les contraintes propres à cette technique prometteuse. Dans le dernier chapitre, Martin Riopel, Patrice Potvin, François Boucher-Genesse, Valérie Djédjé et Gilles Raïche analysent le suivi informatisé des cheminements d'apprentissage dans le contexte de trois micromondes développés ou utilisés au Laboratoire mobile pour l'étude des cheminements d'apprentissage en sciences. Ils concluent que la visée, la durée et surtout la complexité de chacune de ces applications sont déterminantes pour la qualité de l'évaluation automatique des cheminements.

En terminant, sans prétendre avoir épuisé ce sujet complexe, nous espérons que la diversité des travaux présentés dans cet

ouvrage témoigne du dynamisme et de l'ampleur de ce courant de recherche qui utilise des technologies pour faire progresser les connaissances sur l'éducation scientifique. Dans tous les cas, force est de reconnaître que ces chercheurs dévoués et passionnés ne se laissent pas décourager par la complexité constamment renouvelée des technologies et relèvent avec brio ce défi important et actuel de mieux former la relève scientifique pour la société de demain.

Cette publication a été rendue possible grâce à la collaboration du Laboratoire mobile pour l'étude des cheminements d'apprentissage en sciences (LabMECAS) et de MATI Montréal (*Maison des technologies de formation et d'apprentissage Roland-Giguère*), un partenariat de recherche entre l'Université de Montréal, HEC Montréal et l'École Polytechnique de Montréal, dont font partie plusieurs auteurs ayant contribué à cet ouvrage collectif.

CHAPITRE 1



Utilisation des technologies pour la recherche sur la modélisation algébrique des phénomènes scientifiques

Georges Touma, Université d'Ottawa

RÉSUMÉ

Dans ce chapitre, nous soulevons la problématique de la modélisation algébrique en sciences expérimentales par l'élève. Nous avons proposé et validé une nouvelle méthode de Régression Graphico-Statistique (RGS, Touma 2006) pour modéliser mathématiquement les phénomènes scientifiques et évaluer son erreur-type de prédiction. Contrairement à la méthode des moindres carrés de Legendre, la méthode RGS peut être abordée aux niveaux secondaire et collégial. Les résultats de nos recherches démontrent qu'avec la méthode RGS, les élèves développent une attitude positive à l'égard du processus de modélisation algébrique des phénomènes scientifiques. Ils démontrent

aussi que les élèves réussissent mieux le processus de modélisation scientifique qu'avec la méthode traditionnelle de Gauss-Legendre.

INTRODUCTION

Depuis au moins 1998, l'une des intentions principales des programmes des ministères de l'Éducation du Québec et de la France est de favoriser la démarche scientifique de l'élève sur les phénomènes en sciences expérimentales dans une activité de laboratoire.

Au Québec, pour le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2005), l'enseignement des mathématiques, des sciences et de la technologie doit privilégier des situations d'apprentissage contextualisées, ouvertes et intégratives débouchant sur des activités diversifiées afin de donner un sens concret aux objets d'études, d'éveiller l'intérêt et de favoriser la démarche scientifique de l'élève. Dans ces situations d'apprentissage, l'élève est amené à « jouer un rôle d'investigation lors d'une expérimentation en laboratoire, d'une exploration sur le terrain ou de la construction d'un objet technique en atelier ». Ainsi, l'élève est invité à contribuer à l'élaboration et à la mise en œuvre d'une démarche scientifique. Pour ce faire, l'élève est appelé à poser une hypothèse, à expérimenter, à mesurer, à calculer, à comprendre le concept de variable et de mesure, à interpréter ses résultats, à prédire avec un modèle et à communiquer à l'aide de plusieurs langages utilisés en sciences tels que le langage mathématique.

En France, le groupe responsable du programme de physique et de chimie de l'Inspection générale de l'éducation nationale (IGEN, 1998), propose, lors d'une activité de laboratoire en physique, plusieurs objectifs majeurs qui permettront « d'augmenter réellement l'efficacité de l'enseignement des sciences physiques ». Citons-en quelques-uns :

- ◆ « prédire un phénomène, un résultat expérimental ;
- ◆ prendre conscience, grâce à une pratique réfléchie, des questions relatives à la mesure, à sa précision, au sens à donner aux résultats d'un mesurage ;
- ◆ s'initier à la démarche expérimentale : formuler une hypothèse, élaborer un protocole permettant de la tester, le mettre en œuvre, analyser les résultats, tirer des conclusions ;

- ◆ choisir des grandeurs à mesurer, décider de valeurs de paramètres, de conditions expérimentales, d'échelle, de nombre de mesures ».

1. PROBLÉMATIQUE

La mise en œuvre des deux nouveaux programmes de formation de l'école québécoise et de l'école ontarienne en mathématique révèle des aspects paradoxaux quant aux attentes qu'elle soulève.

- ◆ Le nouveau programme de chacune de ces provinces du Canada demande à l'élève d'expérimenter des phénomènes physiques, de recueillir des données, de les représenter sur un graphique, de les analyser et de les interpréter¹⁻².
- ◆ Cependant, le nouveau programme de chacune de ces provinces du Canada ne donne pas explicitement à l'élève une méthode en mathématiques appliquées avec laquelle il pourrait analyser, interpréter, justifier, prédire, et communiquer ses résultats en comprenant le processus de modélisation algébrique de ces phénomènes physiques.

Notons que les moyens actuels³ mis à la disposition de l'élève en mathématiques ne lui donnent pas accès à la compréhension du processus de modélisation algébrique. À ce sujet, Beaufile (1993, p.124) note que : « les démarches dites « du physicien » présentées aux élèves sont souvent fondées sur une mise en avant exclusive de l'expérience (découverte de loi, induction de théorie, expérience cruciale, etc.) [...] Si l'alternative centrée sur les méthodes modernes de modélisation relève d'une épistémologie plus satisfaisante en ce qui concerne la relation théorie/expérience, elle reste problématique au niveau de l'enseignement secondaire dès lors qu'elle se place sur un plan **quantitatif et mathématique**. Elle ne peut en effet être mise en œuvre de façon immédiate du fait, en particulier, de la limitation de la complexité des modèles mathématiques et des méthodes informatiques ».

1. Curriculum de l'Ontario de la 11^{ième} année, p. 43.

2. Programme de formation de l'école québécoise, vision systémique de liens interdisciplinaires, p. 326.

3. Calculatrices programmables et graphiques, Excel, Fathom, Régressi, etc.

Ainsi, comment l'élève peut-il réussir cette activité de modélisation algébrique sans avoir les outils conceptuels pour évaluer la pertinence de son modèle et la précision de ses mesures ?

1.1. Problèmes liés à la modélisation mathématique en sciences expérimentales

De nombreux auteurs ont remarqué que les élèves utilisaient peu les mathématiques comme soutien dans la résolution de problèmes pour s'expliquer des phénomènes physiques. Nonnon (1986, p. 22) notait :

les élèves manipulent la fonction linéaire du premier degré dans les cours de mathématiques à la fin du secondaire. L'approche est généralement magistrale et les élèves sont à même de calculer des valeurs de y en fonction de x , ainsi que de repérer un point sur le graphique à partir de ses projections en x et en y . Ils peuvent aussi apprendre à passer de la fonction algébrique à la fonction graphique, et inversement à identifier la fonction à partir de sa représentation. Ils sont capables par exemple de déterminer une fonction du premier degré passant par deux points. Par contre, ils sont rarement capables de l'utiliser, en dehors des mathématiques, comme support dans la résolution de problèmes.

À propos du rôle assigné à l'activité mentale de modélisation algébrique en sciences expérimentales, Astolfi et Drouin (1992, p. 66) notaient qu'

il est possible d'y établir des relations quantitatives entre grandeurs repérables ou mesurables, la construction de telles relations étant souvent contemporaine de celle des grandeurs elles-mêmes [...]. Dans de très nombreux cas, la nature mathématique de la relation restera inconnue des élèves, tant il est vrai que même la plus simple fonction mathématique (fonction linéaire) reste difficile à comprendre et à manier à ce niveau.

En France, dans sa thèse, Ayçaguer-Richoux (2000, p. 153) a mentionné que, dans une activité de laboratoire en physique, les démarches observées chez les enseignants

comportent pour la plupart une « confrontation » entre des résultats expérimentaux et un modèle théorique [...], et les incertitudes sur les mesures, sur les valeurs des paramètres obtenus pourtant « un des outils privilégiés pour cette confrontation » (Guillon, 1995, p.117), ne sont ni prises en compte ni même évoquées.

Cette auteure précise ensuite qu'« obtenir une courbe avec un palier, une droite qui passe par l'origine, une valeur ayant le bon

ordre de grandeur suffit pour valider l'accord modèle – résultats expérimentaux [...]. [...] la confrontation se réduit à une “comparaison à vue” entre résultats expérimentaux et théoriques » (Ayçaguer-Richoux, 2000, p. 154).

À notre avis, pour que l'élève puisse effectuer, réussir et comprendre le processus de modélisation algébrique en sciences expérimentales, il est nécessaire qu'il maîtrise des outils conceptuels en mathématiques appliquées.

1.2. Problèmes liés à l'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO)

Notre idée de recherche prolonge l'ensemble des travaux effectués au Laboratoire de robotique pédagogique de l'Université de Montréal. Actuellement, il existe trois types de didacticiels au laboratoire en sciences expérimentales, soit l'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO), la Simulation Assistée par Ordinateur (SAO) et le troisième qui intègre l'ExAO et la SAO dans une même application. L'ExAO consiste à réaliser des expériences réelles par l'intermédiaire des capteurs et d'un microcontrôleur afin de représenter en temps réel et sur l'écran de l'ordinateur l'évolution des variables à l'étude. La SAO consiste à simuler une expérience donnée et la représenter sur l'écran de l'ordinateur. Aucune de ces applications ne permet à l'élève d'effectuer, dans sa démarche scientifique, une activité de modélisation algébrique qui tiendrait compte des incertitudes de mesures. On peut citer les travaux récents de Riopel (2005) en ExAO et SAO, de Fournier (2001) en ExAO et de Cervera (1998) en SAO du Laboratoire de Robotique pédagogique de l'Université de Montréal.

Cervera (1998) a conçu un environnement d'apprentissage assisté par ordinateur basé sur des simulations de phénomènes complexes et abstraits en hydraulique et en pneumatique. Son environnement permet à l'élève d'observer sur l'écran de l'ordinateur l'évolution de variables impliquées dans ces phénomènes. Étant donné que ces variables sont simulées à l'aide des modèles algébriques du phénomène à l'étude, l'élève n'a pas l'occasion d'effectuer l'activité de modélisation algébrique des phénomènes hydrauliques et, bien qu'elles contiennent de « l'erreur de mesure » simulée, le modèle induit lui-même reste exempt d'incertitude.

Fournier (2002) a conçu un environnement d'apprentissage d'ExAO permettant à l'élève de construire un système de mesure. Cette activité de construction permet à l'élève d'effectuer un processus de modélisation essentiellement inductif, d'étudier la relation de causalité entre deux variables et d'utiliser celle-ci pour construire un instrument de mesure. Quant à Riopel (2005), en combinant l'ExAO et la SAO, et en gardant son environnement en contact avec la réalité, il donne à l'élève la possibilité d'effectuer les démarches inductives et déductives du processus de modélisation scientifique dans une séance de laboratoire.

Les environnements de Fournier (2002) et de Riopel (2005) empêchent l'élève d'effectuer l'activité de modélisation algébrique en tenant compte des incertitudes de mesures sur leurs données empiriques. Fournier (2002) et Riopel (2005) se contentent de superposer, en ajustant les coefficients d'une équation algébrique, la courbe symbolique et la courbe empirique pour trouver le modèle algébrique qui correspond au phénomène à l'étude. Ici, on ne fait pas d'optimisation qui permettrait, comme dans la méthode de Gauss-Legendre (régression linéaire par les moindres carrés), de minimiser les écarts entre la courbe théorique et les données empiriques. On n'évalue pas non plus l'incertitude sur la prédiction de la variable à l'étude.

Les élèves de niveau secondaire ou collégial n'ont que peu ou pas de connaissances en mathématiques appliquées et en statistique pour effectuer des régressions linéaires et non linéaires sur des données empiriques issues d'une expérience de laboratoire. Il ne suffit plus alors de rendre signifiant le caractère probabiliste des données empiriques puisque les élèves ne possèdent pas les bases mathématiques correspondantes. Les solutions pratiques qui s'offrent à nous a priori sont alors de deux ordres :

- 1) inclure dans le curriculum les méthodes de régressions linéaires et non linéaires ;
- 2) nier le caractère stochastique des données empiriques.

Ces deux solutions ne sont toutefois pas satisfaisantes. La première solution serait inconcevable puisque, comme nous l'avons déjà dit, elle fait appel à des concepts et à des méthodes, en mathématiques appliquées et en statistiques, trop avancées pour les niveaux secondaire et collégial. La deuxième solution réduit l'analyse mathématique à une simple superposition d'une courbe symbolique

que l'on place approximativement sur l'ensemble de points formés par les données empiriques. Nous préférons chercher une solution qui donnerait aux élèves une base suffisante, à la fois cognitive et visuelle, pour induire le modèle approprié à des données d'expérience, ou rendre ce modèle adéquat par rapport aux données obtenues, et ce, en imitation des méthodes et concepts plus routiniers appliqués par les chercheurs professionnels. Le caractère relativement abstrait de l'analyse en mathématique décourage les élèves qui ne voient dans ce travail qu'un exercice fastidieux. Il est vrai que la division des curriculums ne favorise pas une intégration entre les sciences et les mathématiques, ce qui a pour conséquence de présenter l'analyse mathématique comme un exercice scolaire sans utilité, sans finalité pratique. De plus, les élèves en physique sont souvent découragés par le recours obligatoire aux mathématiques pour décrire et expliciter les phénomènes, ce qui se traduit trop souvent par des applications de formules n'ayant guère de sens pour les élèves et ne leur laissant aucun rôle dans la saisie cognitive de la modélisation en jeu. Ces cours de physique donnés de manière magistrale laissent peu de place à l'expérimentation et à l'investigation scientifique et encore moins de place à l'analyse et à la modélisation mathématiques, ce qui réduit l'activité de l'élève à la seule application de formules. En occultant ainsi l'analyse et la construction des objets mathématiques, on réduit les capacités de compréhension, de généralisation et de transfert (Girouard et Nonnon, 1999) des savoir-faire de l'élève vers l'étude d'autres phénomènes scientifiques. En somme, on limite son autonomie intellectuelle en ne lui permettant pas de développer lui-même sa compréhension et son expression mathématiques, habiletés nécessaires pour expliciter et communiquer les résultats de ses propres investigations scientifiques en tenant compte du caractère probabiliste de ses résultats. Ainsi, on ne devrait plus se contenter de prédire des résultats à partir du graphique ou d'une équation, comme le faisaient Riopel (2005) et Fournier (2003), ni à partir d'une équation obtenue automatiquement par un tableur, comme Excel ou Régressi. L'élève devrait être à même de trouver ou d'optimiser son équation et de lui associer une marge de tolérance ou d'incertitude. On ne peut donner aux élèves une structure de pensée scientifique sans y intégrer, d'une manière ou d'une autre, les prérequis nécessaires en mathématiques appliquées et en calcul probabiliste. Pour donner une prééminence à la réalité dans la démarche scientifique, il nous faut ici trouver le moyen de leur donner ces concepts avant la

démarche expérimentale ou, mieux, en même temps qu'elle. Nous voulons donc, par la production tangible de cette recherche, dans le contexte de la « lunette cognitive » de Nonnon (1986), leur donner ces concepts et ces méthodes en mathématiques appliquées d'une manière visuelle et graphique, en même temps qu'ils opèrent des ajustements entre la fonction symbolique et les données empiriques.

1.3. Les questions soulevées par cette recherche et l'idée de développement

Actuellement, il n'existe aucun environnement assisté par ordinateur qui permette à un élève de secondaire ou de cégep de s'engager dans un processus complet de modélisation algébrique. C'est-à-dire un environnement qui ne soit pas comparable aux tableurs grapheurs existants, tels qu'Excel et Régressi, qui donnent à l'élève un résultat automatique et qui ne permettent pas d'accéder à la compréhension du processus mathématique sous-jacent à la modélisation algébrique.

- ◆ Serait-il possible de concevoir un tel environnement utilisable au secondaire ou au collège, dans une activité de laboratoire en sciences expérimentales ?
- ◆ Les professeurs pourraient-ils l'intégrer et l'utiliser facilement dans le cadre de cette activité de laboratoire avec des élèves ?
- ◆ Les élèves pourraient-ils l'utiliser facilement et de manière autonome pour effectuer tout le processus de modélisation algébrique ?

Pour concilier les paradigmes des nouveaux programmes et les heures limitées de présence au laboratoire, notre intention est de donner aux élèves et aux étudiants un langage approprié en mathématique, un langage de codage mathématique avec lequel ils pourront effectuer le processus de modélisation algébrique. Ainsi, notre idée de recherche est de

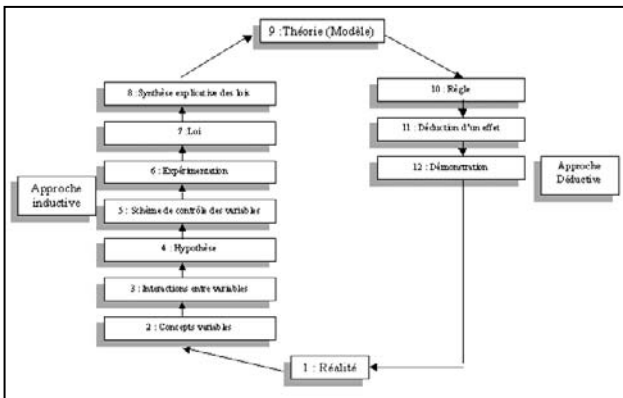
concevoir un environnement d'apprentissage informatisé qui permette à l'élève d'effectuer une modélisation algébrique, **incluant l'optimisation et l'évaluation de l'incertitude**, sans recourir formellement aux méthodes en mathématiques appliquées, telles que les méthodes de régression linéaire et non linéaire qui sont utilisées traditionnellement dans les calculatrices programmables ou les tableurs grapheurs.

2. IMPORTANCE DE LA MODÉLISATION ALGÈBRIQUE DANS LA DÉMARCHE EXPÉRIMENTALE EN SCIENCES

En sciences expérimentales, Nonnon (1986, p. 29) a détaillé les étapes de la démarche scientifique comme dans la figure 1. Nonnon (1986, p. 27), et Johsua et Dupin (1999, p. 49) semblent bien s'entendre sur les différentes étapes des phases inductive et déductive de la démarche scientifique. Selon Nonnon (1986, p.30), dans la phase inductive, en interaction avec la réalité, c'est-à-dire avec un phénomène réel en sciences, l'élève détermine les variables en jeu et prédit ensuite leur interaction sous la forme d'une hypothèse qui sera à son tour formalisée dans un schème de contrôle de variables lui permettant de planifier l'expérimentation. À partir des résultats recueillis, l'élève pourra dégager alors une ou des lois. La synthèse explicative de ces lois lui permettra de construire un modèle ou une théorie. Dans la phase déductive, l'élève tente, avec ce modèle, de répondre à une question donnée reliée au phénomène de départ. Ensuite, il formule des propositions ou des effets qui lui donneront la possibilité non seulement d'expliquer et de répondre à la question mais aussi de déduire et prédire des résultats de l'expérience. Afin de valider le modèle construit dans la phase inductive, c'est-à-dire de l'infirmier ou de le confirmer, l'élève compare les résultats prédits et déduits avec des données provenant de la réalité, des données nouvelles tirées, par exemple, d'une nouvelle expérience où l'on aurait modifié la variable indépendante.

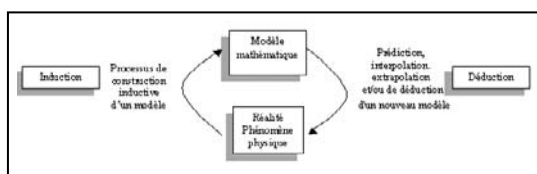
FIGURE 1

Démarche scientifique selon Nonnon (1986)



Ainsi, nous pourrions résumer l'activité mathématique dans la démarche scientifique de l'élève par le schéma suivant :

FIGURE 2
Les activités mathématiques
dans la démarche scientifique



Nous considérons que les phases inductive et déductive ne sont pas parfaitement disjointes comme la figure 2 pourrait le laisser croire. Ainsi, à l'intérieur d'une phase inductive, lors de la formulation d'une hypothèse, l'élève peut aussi avoir recours à la déduction : c'est le raisonnement hypothético-déductif, qui met à profit des lois supposées vraies ou des relations déjà étudiées pour élaborer de nouvelles suppositions, ou inductions. Pour que l'élève puisse effectuer la démarche scientifique, il doit nécessairement comprendre et réussir cette activité de modélisation mathématique. Pour ce faire, notre idée de base est donc de fournir à l'élève une méthode mathématique informatisée à forte composante visuelle, avec laquelle il pourra de façon autonome comprendre le processus de modélisation algébrique d'un phénomène scientifique.

3. MODÉLISATION ALGÈBRIQUE

Le passage de la représentation graphique d'une fonction à son équation mathématique avec un tableur grapheur, comme EXCEL©, Régressi©, etc., est souvent réalisé de manière automatique et incompréhensible pour l'élève. Avec les systèmes d'Expérimentation Assistée par Ordinateur en sciences expérimentales (ExAO), cette compréhension du passage de la représentation graphique d'une fonction à son équation algébrique est toutefois améliorée puisque l'élève ajuste lui-même, visuellement, les paramètres de l'équation de la fonction afin de superposer sa représentation graphique sur les points expérimentaux. Cette méthode, qui est devenue une

tradition dans les écoles et collèges⁴, ne permet pas à l'élève de comprendre le rationnel mathématique sous-jacent. Avec le logiciel Orge⁵ (Chauvat, 1992⁶), cette compréhension est aussi améliorée puisqu'il permet aux élèves de trouver l'équation de la fonction la plus convenable aux données expérimentales, selon le critère de Legendre (minimisation de la somme des carrés des écarts), en utilisant les capacités graphiques de l'ordinateur sans recourir au raisonnement algébrique sous-jacent.

Le problème didactique auquel nous sommes confrontés découle des deux questions suivantes :

- 1) Comment donner à l'élève la capacité de modéliser algébriquement le nuage de points d'un phénomène en sciences expérimentales, en particulier en physique ?
- 2) Comment donner à l'élève la capacité d'évaluer l'incertitude sur le modèle algébrique ?

Nous voulons donner aux élèves la possibilité d'effectuer, de réussir et de comprendre l'activité de modélisation algébrique des phénomènes scientifiques en utilisant les ressources visuelles et graphiques de l'ordinateur. Pour ce faire, nous avons entrepris une recherche de développement en éducation et conçu une nouvelle méthode informatisée à interface humaine, la Régression Graphico-Statistique (RGS, Touma, 2006). Contrairement aux méthodes traditionnelles de Gauss-Legendre qui sont programmées et utilisées automatiquement dans les calculatrices et logiciels, le niveau des connaissances préalables à la compréhension de la méthode RGS est de niveau secondaire et collégial.

4. MODÉLISATION ALGÈBRIQUE POUR LA RÉGRESSION GRAPHICO-STATISTIQUE (RGS)

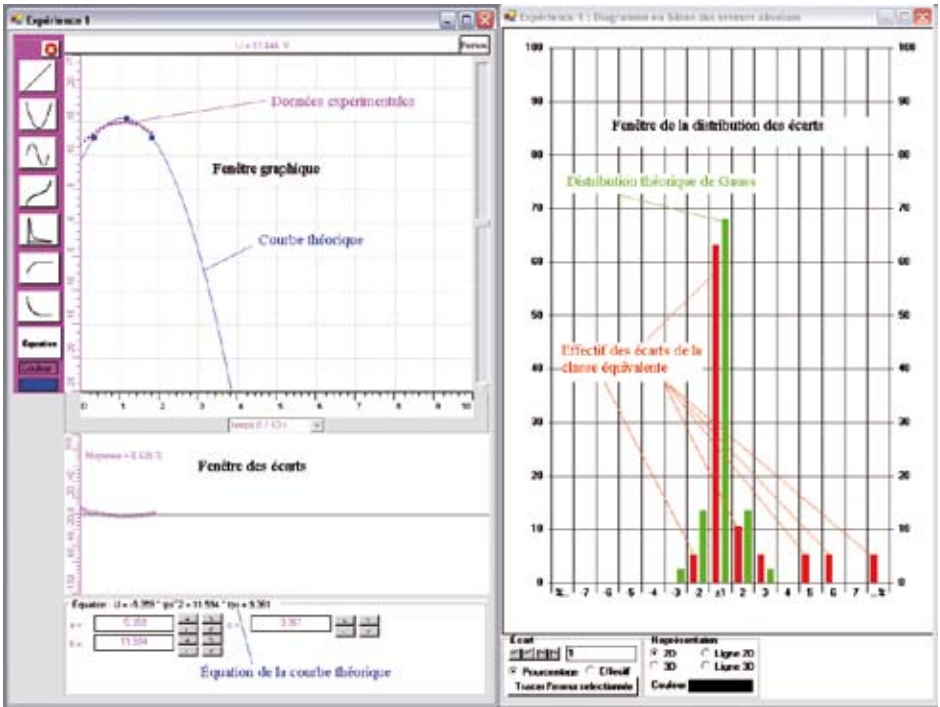
Le module de Régression Graphico-Statistique comporte essentiellement trois fenêtres (Voir figure 3) : la fenêtre graphique ; la fenêtre des écarts et la fenêtre de l'histogramme de distribution de ces écarts.

4. Notons ici que le niveau secondaire au Québec correspond grosso-modo au niveau collégial en France (de la 6^e à la 1^{ère}) alors que le niveau collège ou CEGEP correspond au niveau lycée (terminale et bac +1).

5. Téléchargeable gratuitement à l'adresse : <http://net.iut.univ-tours.fr/Geii/tpweb/geii/orgehome.htm>

6. <http://net.iut.univ-tours.fr/Geii/tpweb/geii/MC.htm>

FIGURE 3
Fenêtres du module RGS



4.1. Fenêtre Graphique

Dans la fenêtre graphique, l'élève aura initialement

- ◆ paramétré l'expérience, c'est-à-dire choisi les variables, le nombre des données et la fréquence d'échantillonnage afin de déclencher l'acquisition des données ;
- ◆ visualisé sous forme graphique l'interaction entre les différentes variables ;
- ◆ visualisé sous forme d'un tableau les données expérimentales.

Afin que l'élève choisisse le type d'équation avec lequel modéliser algébriquement cette interaction de variables, nous avons créé une barre d'outils sur laquelle nous retrouvons des fonctions prédéfinies, telles que les fonctions linéaires du premier degré, du second degré, du troisième degré, les fonctions rationnelles, sinusoïdales et exponentielles. Nous lui avons aussi donné la possibilité de défi-

nir n'importe quelle fonction algébrique en cliquant sur le bouton équation.

4.2. Fenêtre des écarts

La fenêtre des écarts consistera à visualiser les écarts entre la courbe théorique et les données expérimentales afin de les réduire et de les minimiser le plus possible. Notons que les écarts seront calculés en pourcentage de l'échelle de mesure de la variable à l'étude. Les points expérimentaux qui se trouvent en dessous de la courbe théorique auront un écart négatif, tandis que ceux qui se trouvent au dessus de la courbe théorique auront un écart positif. L'échelle par défaut de la fenêtre des écarts est de -100% à 100% . Pour mieux visualiser les écarts, nous allons donner la possibilité de les dilater, c'est-à-dire de réduire l'échelle des écarts (Figure 3).

4.3. Fenêtre d'histogramme

Pour des raisons de commodité, nous avons centré la distribution des écarts à zéro. Attendu qu'en général les incertitudes de mesures en sciences expérimentales se situent en deçà de 10% de leur valeur, nous avons limité initialement l'échelle des intervalles de classe à 14% de l'échelle totale avec des intervalles de classe fixés à 1% . Puisque la distribution est centrée à zéro, les valeurs des intervalles de classes négatives correspondront, en valeur absolue, aux écarts des points expérimentaux situés en dessous de la courbe. De même, les valeurs des intervalles de classes positives correspondront aux écarts des points situés au dessus de la courbe. Afin que soient conservés les écarts de toutes les données expérimentales, tous les écarts qui sont inférieurs à -7% se rempliront dans la classe à gauche « $\% <$ ». De même, tous les écarts supérieurs à 7% se rempliront dans la classe à droite « $\% >$ ». Toutefois, ces paramètres seront tous changés de manière dynamique lorsque l'élève changera la valeur de l'intervalle. La fréquence des écarts est aussi par défaut en pourcentage du nombre de points expérimentaux. Nous avons également affiché cinq colonnes vertes représentant la distribution théorique de Gauss. La colonne centrale indique le 68% des effectifs, deux colonnes symétriques indiquent le $13,5\%$ et le $-13,5\%$ des effectifs, et les deux autres, qui sont aussi symétriques, indiquent les $2,5\%$ et $-2,5\%$ des effectifs. Ainsi, en même temps qu'on ajuste la courbe théorique sur les points

expérimentaux, les écarts entre la courbe théorique et les données expérimentales se répartissent dynamiquement dans les classes correspondantes (de couleur rouge). Il s'agira d'abord de trouver l'intervalle le plus petit de la classe centrale qui contiendra les 100 % des effectifs des écarts. Ensuite, il suffira de diminuer, au fur et à mesure, cet intervalle et d'ajuster les paramètres de la courbe pour optimiser son équation algébrique. Il faudra alors trouver les paramètres de l'équation qui minimisent le plus possible cet intervalle et qui distribuent le plus normalement possible les effectifs de ces écarts. Notons aussi que, par cette méthode, les points singuliers (ou aberrants) de cette expérience seront ceux qui correspondent aux classes des effectifs se trouvant à l'extérieur des colonnes vertes. Nous avons aussi donné la possibilité de sélectionner une classe en affichant en même temps sur le graphique les points correspondants. Cette possibilité, qui nous sert à visualiser graphiquement la distribution des écarts, nous permettra aussi de repérer les points singuliers (ou aberrants) et de les rejeter avec un critère statistique (se situant par exemple à 3, 4 ... fois l'erreur-type). Avec le logiciel, nous donnerons alors à l'élève la possibilité de les éliminer.

Ainsi, pour que l'élève réussisse l'activité de modélisation algébrique d'un phénomène physique par la méthode RGS, il doit

- ◆ **ajuster une fonction symbolique.** Avec la fenêtre graphique, il devrait être capable de superposer visuellement un modèle fonctionnel symbolique sur les données empiriques, ce qui remplace le modèle empirique constitué des points associés aux données empiriques par un autre modèle mathématique sous forme d'une relation algébrique.
- ◆ **réduire les écarts entre la fonction et les données expérimentales.** Avec la fenêtre des écarts, il devrait être capable de réduire les écarts entre la courbe symbolique et les points expérimentaux, c'est-à-dire mieux ajuster la fonction symbolique sur les données empiriques en minimisant ces écarts.
- ◆ **optimiser la fonction symbolique.** Avec la fenêtre de distribution des écarts, il devrait être capable d'optimiser ces ajustements en tenant compte de leur distribution statistique, ce qui lui permet de prendre en compte l'occurrence des points expérimentaux pour optimiser le modèle

mathématique, de déterminer les points aberrants ou singuliers et d'évaluer l'erreur de prédiction.

5. JUSTIFICATION MATHÉMATIQUE DE LA MÉTHODE (RGS) ET UNICITÉ

Nous supposons que les écarts ont une moyenne nulle et se distribuent normalement autour de cette moyenne. Avec la méthode RGS, nous voulons déterminer l'équation de la fonction qui minimise l'erreur-type des écarts en les distribuant normalement autour de zéro.

Soient :

- ◆ $A_i(x_i, y_i)$; $i=1..n$, un ensemble de n points expérimentaux d'un phénomène scientifique dont le modèle algébrique est connu à priori ;
- ◆ $Y = f(x)$; l'équation de la fonction la plus convenable aux données expérimentales ;
- ◆ $S_{\text{écarts}} = \{e_i = y_i - Y_i ; i=1..n\}$; la série statistique des écarts en ordonnée (y_i est l'ordonnée du A_i et $Y_i = f(x_i)$) ;
- ◆ $M_{\text{écarts}}$ la moyenne des écarts e_i ;
- ◆ $E = (\sqrt{\sum (e_i - M)^2}) / n = (\sqrt{\sum e_i^2}) / n$ (la moyenne est nulle dans notre cas) ; l'erreur-type de cette série statistique.

Pour déterminer l'équation de la fonction Y la plus convenable aux données expérimentales, il suffit de trouver les valeurs de ses paramètres qui annulent la moyenne des écarts et qui minimisent l'erreur-type, ce qui assure mathématiquement les résultats de la méthode des moindres carrés, en particulier l'unicité de la solution.

Dans le cas d'une fonction parabolique, l'erreur-type ne dépend pas de la valeur de la constante de l'équation. En effet, si on translate verticalement la courbe d'une distance r , les écarts e_i et leur moyenne augmenteront ou diminueront de r , donc les différences $(e_i - M)_{i=1..n}$ ainsi que l'erreur-type de ces écarts restent constantes. Le coefficient de translation de l'équation est déterminé par la mise à zéro de la moyenne des écarts, laquelle découle de leur symétrisation par rapport à 0 dans l'histogramme. Ainsi, la première partie de la méthode RGS qui consiste à éliminer la courbure ou la pente dans la représentation graphique des écarts facilite l'optimisation

des paramètres et l'ajustement de la représentation graphique de la fonction sur les données expérimentales en réduisant les écarts ; la seconde partie permet d'ajuster la constante en symétrisant les écarts. Notons aussi que chaque fois que l'on zoome sur les écarts, la position du chiffre à optimiser de la partie décimale des paramètres de l'équation change, ce qui augmente la précision des paramètres.

6. GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE RGS AUX FONCTIONS POLYNOMIALES

Nous pouvons généraliser la méthode RGS sur toutes les fonctions polynomiales. Dans le cas de la fonction polynomiale du premier degré dont l'équation des écarts est $E(x) = (a - \alpha)x + b - \beta$, nous devons commencer par annuler d'abord le coefficient directeur de l'équation de la fonction des écarts en agissant sur a et ensuite éliminer la translation verticale en agissant sur b . Dans le cas des fonctions polynomiales du troisième degré et plus, nous devons commencer par éliminer d'abord les points d'inflexion de la fonction des écarts en agissant sur les paramètres de la fonction théorique. Prenons le cas de la fonction du troisième degré dont l'équation de la fonction des écarts est $E(x) = (a - \alpha)x^3 + (b - \beta)x^2 + (c - \gamma)x + (d - \sigma)$. Pour déterminer les coefficients α , β , γ et σ , on doit ajouter une étape aux cinq étapes du processus de modélisation des fonctions paraboliques. Cette étape est nécessaire pour déterminer α . Étant donné que la fonction des écarts est du troisième degré, sa représentation graphique contient un point d'inflexion. Ainsi, pour déterminer α , il suffit d'ajuster au fur et à mesure a pour éliminer ce point d'inflexion et obtenir une représentation graphique de type parabolique. Pour déterminer ensuite les autres coefficients (β , γ , et σ), il suffit d'appliquer les étapes du processus de modélisation algébrique de la fonction parabolique. Pour la fonction de quatrième degré, on doit éliminer en général deux points d'inflexion, et ainsi de suite.

7. RÉSULTATS DE CETTE RECHERCHE AUPRÈS DES ÉLÈVES

Nous avons expérimenté la méthode RGS avec 24 élèves d'un collège montréalais. Les résultats de cette recherche nous montrent que la méthode RGS se compare avantageusement à la méthode de Gauss-Legendre utilisée dans REGRESSI et dans EXCEL. Les élèves

ont développé une attitude positive à l'égard de la modélisation scientifique grâce à cette méthode. Les résultats ont aussi montré que la plupart des élèves ont pu appliquer toutes les propriétés de la méthode RGS afin de construire un modèle calculable et prédictif du phénomène à l'étude et comprendre le rationnel sous-jacent. Ils ont pu aussi déterminer l'incertitude de mesure de leur modèle algébrique. Les commentaires des élèves et de leurs professeurs confirment ces résultats : les élèves comprennent mieux le processus de modélisation des phénomènes scientifiques avec la méthode RGS qu'avec la méthode traditionnelle (Moindres carrés de Gauss-Legendre) utilisée automatiquement dans les calculatrices programmables et les logiciels de modélisation. Sur le plan théorique, le processus de modélisation en sciences exige de l'élève qu'il réalise une expérience, qu'il note les mesures obtenues, qu'il perçoive le caractère modélisable de ses résultats. En extrapolant les résultats de notre recherche, nous pourrions déduire que l'élève, en utilisant la méthode RGS, pourrait mieux comprendre ce processus de modélisation en sciences et le parcourir de façon plus autonome. Notons aussi que chaque élève avait ses propres données expérimentales pour les modéliser avec la méthode RGS. Le chercheur a aussi modélisé toutes leurs données avec la méthode RGS. Il a ensuite effectué une comparaison entre les résultats des élèves et ses résultats. Cette comparaison nous montre qu'à un millième près, 25% des élèves ont obtenu des coefficients identiques à ceux du chercheur, et qu'à un centième près, 60 % des élèves ont obtenu les mêmes coefficients que ceux du chercheur. Ces résultats ne sont pas étonnants, la précision du matériel utilisé étant d'un millième.

CONCLUSION

Cette recherche voulait mettre en scène et expliciter la modélisation algébrique dans un laboratoire de sciences expérimentales, au secondaire comme au collégial, et introduire l'élève à l'estimation de l'incertitude. Dans cette foulée, nous nous sommes trouvés à proposer et à concrétiser une méthode de modélisation générique à dominante sensorielle, visuo-graphique, mais néanmoins rigoureuse, la Régression Graphico-statistique (RGS).

Même si l'on peut utiliser la méthode de Gauss-Legendre de manière automatique dans les calculatrices et les logiciels comme Excel ou Régressi, la compréhension du rationnel sous-jacent reste hors de portée de l'élève, ce qui ne peut selon nous que nuire à un

apprentissage raisonné de la démarche expérimentale, et notamment du processus de modélisation scientifique. Par contre, la méthode RGS, par ses qualités didactiques, accompagne l'élève dans cet apprentissage et nécessite chez lui beaucoup moins de connaissances préalables pour être effectivement utilisée. En effet, il suffit à l'élève de maîtriser les concepts associés

- ◆ à l'effet de chaque paramètre de l'équation algébrique d'un modèle sur la superposition d'une fonction théorique à un ensemble de données expérimentales ;
- ◆ à la notion d'effectifs et à leurs fréquences ;
- ◆ à la représentation d'un histogramme ;
- ◆ au postulat de la distribution normale des écarts.

La méthode RGS facilite l'intégration des sciences avec les mathématiques afin d'investiguer et d'expérimenter un phénomène physique de manière graphique et algébrique. La méthode RGS permet à l'élève de comprendre et de justifier mathématiquement tout le processus de modélisation en incluant l'optimisation de l'équation du modèle et l'évaluation de son incertitude.

L'introduction didactique des statistiques dans ce processus de modélisation est tout à fait nouvelle et originale en ce sens qu'ici, on utilise les statistiques non seulement pour optimiser la fonction par rapport à l'ensemble des points expérimentaux, mais aussi pour estimer l'incertitude de mesure qui est attachée et pour déterminer les points singuliers ou aberrants.

En éducation, la plupart des recherches sur la modélisation algébrique des phénomènes scientifiques soulignent le bénéfice didactique de l'intégration de la technologie dans le processus de modélisation scientifique. Dans notre cas, la technologie nous a permis de créer une nouvelle méthode de modélisation algébrique dont le rationnel algébrique et statistique sous-jacents sont de niveaux secondaire et collégial. Ainsi, la technologie devient pour nous un outil essentiel à la recherche sur le processus algébrique et statistique sous-jacent à la modélisation mathématique des phénomènes scientifiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Astolfi, J - P et A-M. Drouin, (1992), *La Modélisation à l'école élémentaire. Enseignement et apprentissage de la modélisation en sciences*. INRP p. 66.
- Ayçaguer-Richoux, H. (2000), *Rôle des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au lycée*, Thèse de doctorat, Université de Paris 7, p.153-154.
- Beaufils, D. (1993), « L'ordinateur outil d'investigation scientifique au lycée : propositions et implications didactiques », dans *Didaskalia* V.1, p. 123-130.
- Cervera, D. (1998), Cervera, D. (1998), *Élaboration d'un environnement d'expérimentation en simulation incluant un cadre théorique pour l'apprentissage des fluides*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat, 151 p.
- Fournier, F. (2001), *Un environnement d'apprentissage technologique pour la compréhension du concept de mesure en sciences expérimentales*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat, 199 p.
- Johsua, S. et J-J. Dupin (1993), *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques*, Paris : Puf.
- Nonnon, P. (1986), *Laboratoire d'initiation aux sciences assisté par ordinateur*. Université de Montréal, Montréal.
- 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*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat, 326 p.
- Touma, G. (2006), *Un paradigme d'expérimentation au laboratoire de sciences pour l'identification et l'optimisation statistique d'un modèle algébrique par interaction visuo-graphique*, Montréal, Université de Montréal, Thèse de doctorat.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 2



Apport d'une infrastructure informatique dans l'analyse de trace cognitive

Julien Mercier, Université du Québec à Montréal

Monique Brodeur, Université du Québec à Montréal

Line Laplante, Université du Québec à Montréal

Caroline Girard, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

L'étude de la performance et de l'apprentissage dans une perspective cognitive présuppose d'appréhender le fonctionnement cognitif sous l'angle d'états mentaux séquentiels. Cette approche repose sur l'observation des actions et des verbalisations de l'individu au cours d'une tâche. Les moyens techniques traditionnels tendent à confiner cette méthodologie au laboratoire. Or, une infrastructure informatique permet d'étendre cette méthodologie à des contextes authentiques qui permettent d'observer l'individu dans le cadre de

son activité quotidienne, dans son milieu, à des moments dictés par le contexte, durant une période de temps prolongée. Une telle infrastructure gagnerait cependant à comporter des mécanismes de contrôle et de rétroaction relatifs à la verbalisation. Les objectifs du présent texte consistent par conséquent, d'une part, à établir les bases du fonctionnement cognitif afin de mettre en évidence la nature des données requises pour le modelage cognitif et, d'autre part, à proposer une stratégie analytique des données qui prenne en compte ces bases du fonctionnement cognitif.

INTRODUCTION

L'étude de la performance et de l'apprentissage dans une perspective de modelage cognitif présuppose d'appréhender le fonctionnement cognitif sous l'angle d'états mentaux (Anderson, 2002). Cette approche repose sur l'observation et l'enregistrement des actions et verbalisations d'un ou plusieurs individus au cours d'une tâche. Les moyens techniques traditionnels tendent à confiner cette méthodologie au laboratoire. Ainsi, les données recueillies concernent une tâche prédéterminée, réalisée dans un endroit prédéterminé, à un moment prédéterminé. À la lumière de ces limites, il s'avère impératif de valider et de compléter les modèles cognitifs élaborés en laboratoire par la prise en compte de données dont la validité écologique est plus grande.

Une infrastructure informatique permettrait d'étendre la méthodologie du modelage cognitif à des contextes authentiques qui donnent la possibilité d'observer le ou les individus dans le cadre de leur activité quotidienne, dans leur milieu, à des moments dictés par le contexte de performance, durant une période de temps prolongée. Les objectifs qui sous-tendent le présent texte consistent, d'une part, à établir les bases théoriques du fonctionnement cognitif afin de mettre en évidence la nature des données requises pour le modelage cognitif et, d'autre part, à proposer une stratégie analytique des données qui prenne en compte ces bases du fonctionnement cognitif.

1. CADRE THÉORIQUE

Le cadre théorique vise à prescrire une approche dans l'utilisation de l'infrastructure informatique basée sur les postulats suivants : 1) la cognition est séquentielle, 2) la cognition peut être

décomposée en une architecture hiérarchique, 3) la cognition est contextualisée, et 4) la compétence dans un domaine peut être décomposée en une structure hiérarchique. Une architecture cognitive est la structure et les processus essentiels à la performance, indépendamment d'un domaine (Sun, Coward et Zenzen, 2005). Selon Sun (2006), cette architecture constitue un cadre pour la modélisation plus détaillée de phénomènes cognitifs. Ainsi, une architecture est construite à travers la spécification des structures cognitives essentielles, de la division des modules et de leurs interrelations. Les structures cognitives essentielles incluent par exemple la perception, la mémoire, l'apprentissage ou le langage. Dans l'architecture ACT-R telle que Taatgen, Lebiere et Anderson (2006) la présentent, les modules peuvent être associés à la vision, à la motricité, à l'intention et à la mémoire déclarative. Ces modules interagissent entre eux exclusivement par l'entremise d'un système central de réalisation d'actions. En somme, il s'agit d'appréhender le fonctionnement cognitif à travers des théories complexes axées sur les processus, approche préconisée notamment par Sun, Coward et Zenzen (2005).

1.1. La cognition est séquentielle

Sun, Coward et Zenzen (2005) rapportent que le monde, au sens large et incluant la cognition, est constitué d'éléments de base : des entités, des activités et des mécanismes. Les entités constituent les objets qui peuplent un niveau donné de l'architecture cognitive. On peut soutenir notamment que les neurones sont des entités du niveau neurologique, que les propositions sont des entités appartenant au niveau cognitif (c'est-à-dire au niveau de la prise de décision), et que les individus sont les entités du niveau sociologique¹. Les activités représentent les façons dont les entités peuvent interagir entre elles. Ainsi, les neurones émettent des neurotransmetteurs à travers la dépolarisation, la pensée opère à partir de la manipulation de propositions, et les individus interagissent au moyen de la communication. Enfin, les mécanismes, exprimés à travers des relations causales, sont composés d'entités et d'activités. C'est l'aspect causal de ces mécanismes qui sous-tend l'aspect séquentiel de la cognition,

1. Les entités énumérées et leur comportement le sont à titre d'illustrations seulement. Une spécification exhaustive ferait appel à une théorisation qui dépasse l'objet du présent chapitre.

car le lien cause-effet de la causalité implique que la cause survient avant l'effet.

1.2. La cognition peut être décomposée en une architecture hiérarchique

Essentiellement, une architecture hiérarchique postule l'existence de plusieurs niveaux caractérisés par une quantité différente de détails reliés à son fonctionnement. Ces niveaux successifs impliquent la correspondance d'explications causales entre les niveaux (Sun, Coward et Zenzen, 2005). Les sciences cognitives ont soutenu successivement plusieurs architectures hiérarchiques. Parmi les plus populaires, on retrouve Soar, ACT-R, CAPS et GOMS (voir Lesage, ce volume pour une illustration de l'architecture GOMS dans un contexte d'évaluation adaptative). Ces architectures concernent impérativement le fonctionnement d'un système cognitif individuel, mais peuvent comporter des niveaux associés au fonctionnement d'un groupe, voire d'une société d'agents intelligents. Les écrits récents témoignent d'ailleurs d'une plus grande importance accordée à l'aspect social de la cognition, d'où la nécessité des niveaux multi-agents dans les architectures actuelles (Sun, 2006). La vision individuelle classique (Mahr, 1982 ; Newell et Simon, 1976), celle de Newell (1990) et celle, en émergence, de Sun (2006) sont présentées dans les sections qui suivent.

1.2.1. Vision individuelle classique

Tel qu'indiqué dans le tableau 1, la vision individuelle classique comporte trois niveaux : « computationnel », représentation et algorithme, et implémentation matérielle. Les visions de Marr (1982) et de Newell et Simon (1976) mettent l'accent sur la même chose, c'est-à-dire l'importance de l'analyse au niveau supérieur suivi d'un niveau inférieur, en d'autres termes, de la tâche vers les symboles et les procédures de manipulation symbolique. Cette analyse est vue comme indépendante de la réalisation physique du système qui s'ensuit (typiquement biologique ou informatique).

TABEAU 1
Niveaux classiques dans le modelage
cognitif (Marr, 1982 ; Newell et Simon, 1976)

Marr (1982)	Newell et Simon (1976)	Description
Computational	Niveau des connaissances	Détermine le traitement à accomplir, les buts et la logique des stratégies pour réaliser le traitement.
Représentation et algorithme	Niveau symbolique	Détermine la représentation de l'intrant et de l'extrant, et l'algorithme de transformation de l'intrant vers l'extrant.
Implémentation matérielle	Niveau physique	Réalisation physique de la représentation et de la transformation du niveau précédent.

1.2.2. Vision de Newell basée sur la temporalité

Newell (1990) soutient que le fonctionnement cognitif est basé sur un système hiérarchique multi-niveaux, qui représente la solution à un ensemble de contraintes fonctionnelles. Dans ce système, un niveau correspond à un ensemble de composantes qui interagissent pour produire des comportements propres à ce niveau. Le système est hiérarchique du fait que les composantes d'un niveau prennent appui sur les composantes du niveau inférieur. En progressant vers le haut de la hiérarchie et vers une plus grande complexité, les niveaux comportent davantage de composantes et leur vitesse diminue.

À partir de ces postulats, Newell (1990) élabore l'échelle temporelle de l'action humaine, dans laquelle chaque niveau requiert dix fois plus de temps que le niveau précédent pour fonctionner. Cette échelle est présentée dans le tableau 1.

TABLEAU 2
Échelles temporelles dans le modelage cognitif
(Newell, 1990)

	Unité temporelle	Description	Définition (Newell,1990)
Social	Mois		
	Semaines		
	Jours		
Rationnel	Heures	Tâche	La description de ces trois échelles en tant que niveaux de tâche réfère au fait que ces niveaux sont composés de façon à représenter la structure d'une tâche et ne sont pas indépendants du contexte, comme les niveaux précédents.
	10 minutes	Tâche	
	Minutes	Tâche	
Cognitif	10 secondes	Unité de tâche	Composent les opérateurs composés.
	Secondes	Opérations	Composent les opérateurs à partir des actes délibérés afin d'engager la recherche dans l'espace-problème.
	Dixièmes de seconde	Acte délibéré	Utilise les connaissances disponibles pour choisir une opération plutôt qu'une autre. Ce processus est automatique.
Biologique	Centièmes de seconde	Circuit neuronal	
	Millièmes de seconde	Neurone	
		Organelle	

1.2.3. Vision d'une discipline en émergence : les sciences cognitives sociales

La cognition est, en partie du moins, un processus social et culturel (Sun, Coward et Zenzen, 2005). Dans cette optique, la coordination entre individus dans le cadre de la performance d'une tâche est un phénomène critique (Sun, 2006). Cette coordination a été beaucoup étudiée dans plusieurs disciplines sous les notions d'agent et de performance (activité, action, travail, tâche), mais demeure largement méconnue. Cette approche présuppose le modelage de phénomènes sociaux en termes d'agents autonomes. Ce modelage

met l'accent sur les interactions entre agents. Le problème actuel réside dans la relative superficialité de la cognition de ces agents, que l'on dit toutefois « intelligents ». Cette superficialité est d'autant plus problématique qu'elle entrave la possibilité de résoudre la question du lien micro-macro, soit ce lien entre d'une part les intentions et actions individuelles et, d'autre part, les fonctions et le bien-être de la société. Ainsi, de meilleurs modèles de la cognition individuelle sont requis, en tant que fondations pour les modèles sociaux inter-agents. À l'inverse, le manque de connaissance des processus sociologiques peut provoquer un manque de considération d'importantes structures ou contraintes cognitives au niveau individuel.

TABLEAU 3
Échelles temporelles dans le modelage cognitif
(Sun, 2006)

Niveaux	Phénomène	Description
Processus inter-agents	Sociologique	Comportement collectif d'agents Processus inter-agents Interactions entre agents et environnements (physique et socioculturel) notamment les artefacts socioculturels
Agents	Psychologique	Comportements individuels Croyances Concepts Habilités
Processus intra-agent	Composantes	Séquences d'étapes dans le traitement à accomplir
Substrats	Physiologique	Primitives de base dont dépendent les opérations de plus haut niveau.

1.3. Interactions entre les niveaux

Toutes les architectures hiérarchiques impliquent des interactions entre les niveaux. Bien que la modélisation ne concerne généralement qu'un seul niveau, la modélisation à plusieurs niveaux (inter-niveaux [correspondance entre les niveaux] et multiniveaux [description d'un niveau à un autre]) peut s'avérer intéressante, voire essentielle (Sun, 2006).

Sun (2006) conceptualise cette interaction comme l'influence réciproque entre des niveaux adjacents. Il ajoute que la modélisation s'opère en spécifiant dans un premier temps le niveau supérieur puis en ajoutant le niveau inférieur. Une théorie correspondant à un niveau donné spécifie des entités et des relations causales qui correspondent aux données empiriques. Les entités regroupent souvent des entités de niveau inférieur de telle sorte que les relations causales peuvent être spécifiées sans référence à ces entités de niveau inférieur. Toutefois, les relations causales entre les entités de niveau inférieur doivent expliquer les relations causales de plus haut niveau (Sun, Coward et Zenzen, 2005). En fait, des inconsistances substantielles entre les niveaux invalident la théorie. Sun, Coward et Zenzen (2005) ajoutent qu'« une distinction phénoménologique est causée par, ou supportée par, ou projetée d'une distinction computationnelle correspondante » (traduction libre, p. 624). La notion de modularité est inhérente à la nature hiérarchique d'un système. La modularité se traduit par la nécessité d'une moins grande quantité d'interactions externes et d'une plus grande quantité d'interactions internes. La modularité entraîne un gain de performance attribuable à la minimisation de l'échange d'information entre modules.

L'essentiel des défis reliés au modelage cognitif consiste d'une part à caractériser le fonctionnement de chaque niveau et, d'autre part, à établir les relations fonctionnelles entre les différents niveaux. À ce chapitre, Anderson (2002) soutient trois thèses relatives à l'apprentissage : 1) celle de décomposition, selon laquelle l'apprentissage qui survient au cours d'une centaine d'heures peut être décomposé en événements cognitifs de courte durée, 2) celle de la pertinence, qui affirme que les processus cognitifs de très courte durée doivent être considérés dans la réflexion à propos de problèmes éducatifs et 3) celle du modelage, qui postule que la méthodologie nécessaire est disponible.

Ainsi, les progrès dans le modelage cognitif sont reliés notamment à la qualité des données disponibles concernant le fonctionnement cognitif. À cet égard, Erikson (2006) a défendu l'utilisation des protocoles à voix haute, qui visent à demander au participant de verbaliser ce qui lui vient en tête au cours de la réalisation d'une tâche. Si l'on convient d'associer ce type de données exclusivement aux niveaux supérieurs des architectures évoquées précédemment en raison du traitement cognitif verbal qu'elles impliquent, il faut

reconnaitre la nécessité d'autres types de données afin de parcourir les niveaux inférieurs. C'est alors qu'interviennent notamment les données associées aux substrats biologiques du fonctionnement cérébral. Ces données sont issues de techniques telles que l'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), la tomographie par émission de positrons, l'électroencéphalographie, la magnétoencéphalographie et tomographie optique (voir Masson, Potvin et Riopel, ce volume). Ces auteurs fournissent d'ailleurs un exemple d'utilisation de l'IRMf dans une de leurs études en cours.

Dans une perspective éducative, Anderson et Gluck (2001) montrent comment il est possible de tirer parti de l'interaction entre des niveaux hiérarchiques pour favoriser l'apprentissage. Prenant appui sur la vision de Newell (1990), ils démontrent l'impact de processus cognitifs d'une durée de moins d'une seconde sur des retombées d'apprentissage se déroulant sur plusieurs minutes. Leurs données concernant le mouvement des yeux durant l'utilisation d'un système tutoriel en algèbre permettent par exemple 1) d'indiquer que l'élève a déplacé son attention vers une autre partie du problème, 2) de déterminer la méthode de solution du problème à partir des traces de solution, 3) d'indiquer que des messages tutoriels n'ont pas été lus, 4) de déterminer une erreur, 5) d'indiquer que l'élève n'a pas réussi à comprendre de l'information critique pour la solution du problème, ou encore que (6) l'élève n'est plus centré sur la tâche. Anderson et Gluck (2001) soulignent par ailleurs la nécessité de raffiner les modèles cognitifs à ce haut niveau de granularité afin de pallier les problèmes actuels de non-détermination dans l'interprétation des séquences de comportements aux niveaux supérieurs. Ils ajoutent de plus que des modèles markoviens (apparentés à ceux discutés plus bas relativement à la méthode d'analyse) peuvent apporter des éléments de solution à ce problème.

La recherche de Guerdelli *et al.* (*dans cet ouvrage*) s'inscrit tout à fait dans la suite de travaux d'Anderson et Gluck (2001) en ayant notamment comme objectif de « prendre en compte le comportement de l'apprenant et le suivi oculaire pour l'évaluation des états cognitifs » en contexte d'utilisation d'une simulation en physique. La méthodologie d'analyse visant à utiliser des mesures oculométriques pour diagnostiquer les difficultés cognitives interpelle directement la problématique du lien entre les niveaux dans une architecture cognitive.

L'étude de Riopel *et coll.* (dans cet ouvrage) est un autre exemple de mise en relation des niveaux dans l'analyse de l'interaction entre un apprenant et la simulation d'un phénomène physique. La hiérarchie temporelle de Newell (1990) est très apparente à travers l'information recueillie automatiquement par le système. Le caractère automatisé de la collecte de données favorise le traitement séquentiel de ces données, en mettant l'accent, entre autres, sur l'inférence des comportements de niveaux supérieurs à partir des « patterns » observés aux niveaux de granularité plus fins.

Dans la même veine, les travaux en cours de Masson, Potvin et Riopel (dans cet ouvrage) mettent l'accent sur les niveaux inférieurs. Ces auteurs entreprennent des études visant à mettre en relation l'activation de régions cérébrales et des processus neurocognitifs sous-jacents au changement conceptuel, tels que l'inhibition des réponses inappropriées dans le contexte de tâches en physique (électricité) occupant un intervalle temporel de l'ordre de dix secondes.

1.4. D'une causalité déterministe à une causalité probabiliste

Afin de tirer parti de la nature hiérarchique d'une architecture multiniveaux, la notion de causalité doit être examinée sous l'angle de dans la correspondance fonctionnelle entre les niveaux. Les relations fonctionnelles au sein d'un niveau peuvent être mises en correspondance avec les relations fonctionnelles d'autres niveaux adjacents, inférieurs et supérieurs. Aussi, les entités, activités et mécanismes constituant un niveau donné peuvent être définis au moyen de relations causales appartenant à un niveau inférieur de l'architecture. Anderson (2002) montre bien le potentiel d'une telle approche dans le cas de l'apprentissage de l'algèbre au primaire. En effet, ses systèmes tutoriels intelligents, en assurant le suivi de la performance de résolution d'équations de l'élève à un niveau de granularité d'environ dix secondes, permettent des gains notables dans l'apprentissage, mesurés après des centaines d'heures d'utilisation. Toutefois, ces relations fonctionnelles, avec la complexité qu'elles impliquent, gagneraient à être envisagées en termes probabilistes plutôt que déterministes (Sun, Coward et Zenzen, 2005). Les stratégies analytiques séquentielles présentées plus loin en fournissent une illustration.

1.5. La cognition est contextualisée

La cognition est contextualisée par sa relation réciproque avec l'environnement (Sun, 2006). Cette relation est réciproque, car elle implique d'une part que la cognition est contrainte par l'environnement physique et social et, d'autre part, que la cognition change l'environnement par l'action. Sun (2006) envisage cette relation à travers la triade cognition – motivation – structure. Les motivations, telles que les besoins physiologiques, sont perçues comme des pré-curseurs de la cognition. Ces besoins ne peuvent être satisfaits que dans un environnement physique et socioculturel. Du fait que l'environnement n'est pas toujours favorable à la satisfaction des besoins, un effort de l'agent est souvent requis à cette fin. Par voie de conséquence, la cognition peut être vue comme ce dont les organismes se sont dotés à travers l'évolution pour satisfaire leurs besoins et les buts qui y sont associés. À l'inverse, les régularités et les structures de l'environnement physique et social conditionnent la cognition. Ainsi, les besoins et la cognition partageraient une consistance téléologique, c'est-à-dire la consistance des finalités qu'elles servent.

1.6. La compétence dans un domaine peut être décomposée en une architecture hiérarchique

La compétence dans un domaine se décompose en un ensemble de composantes, et l'apprentissage du domaine n'est que l'apprentissage des composantes individuelles (Anderson et Gluck, 2001). L'analyse de la tâche à cet égard apparaît comme critique. Le succès inégalé des systèmes tutoriels développés selon cette approche contredit une vision constructiviste radicale, selon laquelle la décomposition d'une compétence nuit à son apprentissage.

Afin de rendre la section suivante plus tangible en ce qui concerne la méthodologie d'analyse des données, le devis d'une étude en cours est présenté. Cette étude porte sur la performance et l'apprentissage de l'enseignement, qui n'échappe pas aux considérations précédentes. Les études contrôlées en laboratoire doivent être complétées par des études en milieu naturel. Plus spécifiquement, le programme vise à étudier la prise de décision entourant la planification pédagogique dans l'enseignement de la lecture. L'étude vise à modéliser le raisonnement pédagogique d'enseignants en adaptation scolaire et sociale, à travers une tâche de planification

pédagogique en orthopédagogie de la lecture. Cette étude à forte validité écologique vise à compléter, par des données en milieu naturel, des études récentes réalisées en laboratoire. Les questions examinées incluent celles qui suivent. Quel est le déroulement typique d'un épisode de raisonnement pédagogique ? Est-ce que la structure d'épisodes de raisonnement pédagogique reliés à un même élève change avec le temps ? Est-ce que le niveau d'expertise en orthodidactique de la lecture a un effet modulateur sur les questions précédentes ?

2. MÉTHODE

2.1. Participants

Les participants sont 12 enseignantes en adaptation scolaire et sociale. Six d'entre elles sont des étudiantes inscrites au baccalauréat en enseignement en adaptation scolaire et sociale, dont la durée est de quatre ans (3 en deuxième année, et 3 en quatrième année). Les six autres participantes sont des enseignantes en exercice (3 ont 5 ans d'expérience, et 3 autres ont réussi une formation de deuxième cycle spécialisée en orthodidactique de la lecture). L'échantillon est constitué afin de maximiser les variations du niveau d'expertise en enseignement de la lecture.

2.2. Tâche et contexte

Durant trois semaines, les enseignantes doivent, lorsqu'elles planifient des activités en lecture dans le cadre de leur enseignement normal (celui des stages pour les étudiantes), parler à voix haute et prendre des notes. Au besoin, elles peuvent le faire à l'aide d'un logiciel de traitement de texte. Dans le cas des étudiantes, les données comprendront des séances de planification avec leur maître-associé au cours des trois semaines subséquentes.

2.3. Procédure et outils de collecte de données

La collecte de données nécessite l'enregistrement des verbalisations des participantes au moment opportun, en concomitance avec la rédaction des planifications lorsque l'écriture est concernée. Ces verbalisations doivent parvenir intégralement aux chercheurs et doivent être horodatées à l'aide du dispositif suivant.

L'enregistrement est réalisé au moyen d'une infrastructure informatique axée sur la collecte de données processuelles. L'infrastructure comporte une flotte d'ordinateurs portables équipés notamment de logiciels d'enregistrement de l'interaction reliée à un serveur pour la transmission bilatérale de données. Cette infrastructure est complétée ici par une flotte de microphones numériques avec port USB qui permet l'envoi des enregistrements par Internet. À cette fin, chaque participante doit être en mesure d'utiliser l'équipement de manière autonome.

2.4. Analyse des données

La cognition, dans ses aspects discutés précédemment, apparaît comme séquentielle et hiérarchique. Il s'avère donc crucial d'appréhender cette nature séquentielle et hiérarchique à travers des données et leur analyse.

2.4.1. Transcription

En vue de l'analyse, les enregistrements audio sont transcrits intégralement. Une indication du temps écoulé est ajoutée, toutes les dix secondes.

2.4.2. Segmentation

En raison de la nature quantitative des analyses projetées (décrites plus bas), la segmentation des verbatims en unités de sens est déterminante. L'approche retenue consiste, préalablement au codage, à segmenter les données sur la base des pauses naturelles dans le discours. Une pause de l'ordre d'une seconde entraîne la distinction de deux segments, ce qui se traduit par un retour de chariot dans le verbatim.

2.4.3. Codage

Dans le cadre des analyses présentées plus bas, il est impératif que le codage soit réalisé sur la base d'un système de codes mutuellement exclusifs et exhaustifs (Bakeman et Gottman, 1997). De plus, tous les segments doivent pouvoir être ainsi codés par un code approprié. Cette remarque vaut pour chaque dimension du système catégoriel et l'on comprend que celui-ci peut comporter plus d'une dimension. Par exemple, on peut coder d'une part le silence

ou la prise de parole et, d'autre part, l'identité des participants dans une dyade. Le codage envisagé comporte des catégories pouvant être associées aux cinq niveaux de l'architecture temporelle de Newell (1990) qui s'étendent des opérations cognitives (de l'ordre de la seconde) aux tâches rationnelles (de l'ordre de l'heure). Ce même codage est appliqué aux niveaux intraagent (afin de comparer la performance d'individus autonomes et de dyades vues comme un seul système) et interagents (afin de comparer la performance de dyades vue comme un seul système et la performance de dyades vues à partir de la performance des paires d'individus qui les composent). Ainsi, à l'instar de Sun (2006), il semble productif de considérer ces niveaux comme un continuum d'abstraction dans l'exploration d'un même ensemble de questions fondamentales. À titre d'exemple, une de ces questions fondamentales concerne la régulation de l'action intentionnelle². Tschan (2002) considère un individu, une dyade ou une triade comme un système d'action, c'est-à-dire que la performance d'une activité comporte certaines caractéristiques incontournables, peu importe l'agent qui la réalise. Cette idée se traduit dans l'analyse, par le fait qu'un même système catégoriel, relié aux opérations nécessaires à la réalisation du raisonnement pédagogique, sera appliqué aux données individuelles et dyadiques. Il faut bien comprendre par ailleurs qu'au-delà de ces aspects de la performance pouvant être considérés comme génériques indépendamment des acteurs, d'autres aspects appartiennent exclusivement aux caractéristiques du système d'action. On peut penser notamment aux caractéristiques de la communication entre les individus composant une équipe, qu'on pourrait envisager alors selon le système de Searle (1979) relativement à l'aspect fonctionnel de la communication. Un examen complet de la performance gagne donc à considérer, et ultimement à intégrer, tant les aspects génériques que spécifiques.

3. L'ANALYSE SÉQUENTIELLE

Comme son nom l'indique, l'analyse séquentielle vise à examiner la connexion séquentielle entre des événements qui se suivent dans le temps (Gottman et Roy, 1990). Il s'agit essentiellement,

2. Pour l'éducation, les retombées appliquées de l'étude de la régulation de l'action intentionnelle sont multiples, et incluent l'apprentissage auto-dirigé, le tutorat et l'apprentissage coopératif.

comme ces auteurs le mentionnent élégamment, de réduire l'incertitude dans la prédiction d'événements futurs sur la base d'événements passés. Transposée dans le cadre du modelage cognitif, l'analyse séquentielle vise à mettre en lumière les séquences typiques d'états mentaux (et, par extension, d'états que l'on pourrait qualifier de sociocognitifs). Il est ainsi possible de prédire les états mentaux susceptibles de mener au succès ou à l'échec dans l'appropriation d'un objet d'apprentissage.

3.1. Généralités

Représenté dans sa forme séquentielle, le résultat du codage décrit précédemment peut se traduire par une série de codes telle que : Action8, Action2, Action1, Action1, Action8, Action3, Action2, Action2, etc. Cette série rend donc compte d'une séquence d'événements (ici des actions réalisées par un individu ou encore une dyade), mais renseigne peu sur l'intervalle temporel. Il est à noter que les verbatims comportent des centaines d'états mentaux ou sociocognitifs.

La fenêtre temporelle dynamique (*moving time window*) est nécessaire afin d'étudier statistiquement l'aspect séquentiel d'une suite d'événements qui s'étale dans le temps. Il s'agit de considérer une séquence de n codes et de dénombrer les fréquences pour chaque type de séquence. Une fenêtre temporelle dynamique de deux unités de largeur et appliquée à la séquence précédente peut être illustrée comme suit, à la manière de Gottman et Roy (1990) :

(Action8, Action2), Action1, Action1, Action8, Action3, Action2, Action2, etc. ;
 Action8, **(Action2, Action1)**, Action1, Action8, Action3, Action2, Action2, etc. ;
 Action8, Action2, **(Action1, Action1)**, Action8, Action3, Action2, Action2, etc. ;
 Action8, Action2, Action1, **(Action1, Action8)**, Action3, Action2, Action2, etc. ;
 Action8, Action2, Action1, Action1, **(Action8, Action3)**, Action2, Action2, etc. ;
 Action8, Action2, Action1, Action1, Action8, **(Action3, Action2)**, Action2, etc. ;
 Action8, Action2, Action1, Action1, Action8, Action3, **(Action2, Action2)**, etc..

Ainsi, cette méthode fournit les informations suivantes :

Action8 précède Action2
 Action2 précède Action1
 Action1 précède Action1
 Action8 précède Action1
 Action3 précède Action8
 Action2 précède Action3
 Action3 précède Action2
 Action2 précède Action2

La fenêtre peut être de largeurs variées. Plus la fenêtre est large, plus grande est la quantité d'informations utilisées pour prédire l'événement suivant. Ainsi, un monogramme est l'événement précédent, un digramme est constitué des deux événements précédents, alors qu'un trigramme comprend les trois événements précédents, et ainsi de suite. Il faut comprendre que la plus grande quantité d'informations entraîne aussi la multiplication des probabilités conditionnelles à estimer.

3.2. Analyse séquentielle lag

Le « lag » peut être vu comme la distance, en événements, entre l'événement à prédire et le ou les événements utilisés pour la prédiction. Dans cette optique, le lag 1 signifie qu'on examine le lien entre un événement et l'événement qui le précède immédiatement. De la même manière, le lag 2 fait référence au lien entre un événement et l'événement survenu antérieurement à l'événement qui le précède immédiatement. Les lags sont illustrés dans la séquence suivante, en supposant que l'on s'intéresse à la prédiction de l'événement Action3 :

Lag 5 Lag 4 Lag 3 Lag 2 Lag 1
Action8, Action2, Action1, Action1, Action8, **Action3**, Action2, Action2, etc.

Le lag s'applique de la même façon si l'on considère des séquences différentes des monogrammes. L'exemple suivant montre les lags associés aux digrammes :

Lag 4 Lag 3 Lag 2 Lag 1
Action8, Action2, Action1, Action1, Action8, **Action3**, Action2, Action2, etc.

Dans cette séquence, la paire Action1 suivie d'Action8 constitue le lag 1, la paire Action1 suivie d'Action1 est le lag 2, et ainsi de suite. Ainsi, il ne faut pas confondre la largeur de la fenêtre et le lag, mais reconnaître la multiplicité des combinaisons possibles entre largeur de fenêtre et lags dans l'analyse.

3.3. Analyses statistiques reliées à l'approche séquentielle

Le dénombrement précédent peut être soumis à des analyses ultérieures. À cet effet, plusieurs approches fournissent des rensei-

gnements complémentaires, « time-budget », probabilités conditionnelles, complétées chacune par des analyses log-linéaires.

Les analyses propres à l'approche séquentielle peuvent être réalisées au moyen du programme GSEQ 4.2 (Bakeman et Quera, 2008), disponible actuellement à l'adresse suivante : <http://www2.gsu.edu/~psyrab/sg.htm>. À partir d'un fichier de données au standard SDIS, GSEQ permet de dériver automatiquement les probabilités conditionnelles, les lags, ainsi que de multiples statistiques séquentielles additionnelles et qui dépassent l'objet du présent texte (voir Bakeman et Quera (1997) pour la description détaillée de GSEQ). Les analyses log-linéaires peuvent quant à elles être faites avec les versions récentes de SPSS, mais gagnent à être réalisées dans SAS lorsque le devis est complexe.

3.3.1. De la description vers la comparaison dans l'approche séquentielle : le devis contextuel

Les distributions de fréquences évoquées précédemment peuvent être réparties selon les niveaux des variables indépendantes considérées dans le devis, à la manière de l'analyse de variance conventionnelle. Il est ainsi envisageable de comparer des individus, ou des groupes d'individus, sur la base de facteurs prenant la forme de variables discrètes.

Les études de Tschan (2002) sont un exemple d'analyse au niveau des processus intra- et interagents au cours d'une tâche de résolution de problème. Mercier et Frederiksen (2008) présentent quant à eux une étude qui met l'accent sur la réalisation d'une tâche de résolution de problème par des dyades d'agents, la dyade étant considérée comme un système, sans égard aux deux personnes qui la composent alors que Mercier et Frederiksen (2007) discutent, dans le même contexte, des différences « individuelles » entre les dyades.

L'expérimentation de Couture et coll. (2009), qui vise à comprendre comment les apprenants appréhendent une simulation à travers leurs connaissances disciplinaires, pourrait s'inscrire dans cette approche séquentielle. À la suite de l'apparition des aspects disciplinaires dans les protocoles à voix haute, l'examen séquentiel des antécédents de cet événement contribue à « cerner à quel moment et de quelle façon les aspects disciplinaires font leur apparition dans

les perceptions et les interprétations des apprenants ». La manipulation de la simulation en quatre conditions expérimentales constitue le devis contextuel.

3.3.2. Quelques commentaires sur la question de généralisabilité des résultats

Il est bien connu que les résultats obtenus à partir des données des échantillons peuvent être généralisés à la population lorsque le nombre de participants dans l'échantillon est suffisamment grand. Dans le cadre des analyses précédemment décrites, il convient d'examiner conjointement la question de l'aspect généralisable des résultats avec la notion d'unité d'analyse.

L'unité d'analyse se traduit par le nombre d'observations considérées dans un test statistique. Il s'agit communément du nombre de participants à une étude. Dans le cas qui nous occupe, l'unité d'analyse peut être envisagée à travers plusieurs niveaux, soit celui du segment, du participant, ou de la dyade. Ainsi, les résultats obtenus peuvent être généralisés au corpus de segments, dont le nombre est typiquement très élevé. Si le nombre de participants ou de dyades est paramétrique ($n > 30$), les résultats peuvent aussi être généralisés à la population d'où proviennent les participants (pour un exemple et une argumentation plus détaillée notamment au niveau du problème connexe de l'indépendance des observations, voir Mercier et Frederiksen, 2008).

CONCLUSION

La qualité des données recueillies repose en majeure partie sur la compréhension des consignes par les participantes et leur volonté de s'y conformer. L'infrastructure gagnerait à comporter des mécanismes de contrôle et de rétroaction relatifs à la verbalisation, axés sur l'automoniteurage.

Les possibilités étendues de collecte de données au moyen de l'infrastructure, notamment en ce qui concerne des tâches et des contextes plus complexes, viennent accentuer le problème de non-détermination tel qu'il est évoqué par Anderson et Gluck (2001) dans l'interprétation interniveaux des observations. Au-delà de la modélisation du comportement, la définition du contexte d'une manière compatible avec le modelage cognitif et la prise en compte de son influence demeurent un problème important. Une piste de

solution reliée à l'analyse séquentielle présuppose une extension multiniveaux de cette méthode.

L'infrastructure présentée permet donc de mener des études cognitives à plus grande validité écologique. De ce fait, elle donne la possibilité d'appréhender empiriquement les problèmes relatifs à la collecte de données et d'envisager des pistes de solution.

Selon Anderson et Gluck (2001), l'interprétation des comportements permet d'orienter les interactions éducatives de trois façons : elle rend possible la provision d'aide adaptée à l'étudiant, elle autorise l'élaboration des critères de compétence cognitifs et elle aide à identifier les erreurs chez l'étudiant et à lui fournir un enseignement approprié.

Les auteurs désirent souligner l'appui du CRSH et du FQRSC dans le cadre de la recherche discutée dans ce chapitre.

RÉFÉRENCES

- Anderson, J.R., et K. Gluck (2001), « What role do cognitive architectures play in intelligent tutoring systems ? » dans S.M. Carver et D. Klahr (Éds.). *Cognition and instruction : twenty-five years of progress*. Mahwah, NJ : Laurence Earlbaum Associates.
- Anderson, J.R. (2002), « Spanning seven orders of magnitude : A challenge for cognitive modeling », dans *Cognitive Science*, 26, p. 85-112.
- Bakeman, R. et J.M. Gottman (1997), *Observing interaction : An introduction to sequential analysis*. New-York, NY : Cambridge University Press.
- Bakeman, R. et V. Quera. (2008), GSEQ 4.2. Logiciel informatique.
- Dufresne, A., F. Guerdelli, O. Martial, M. Droui, et J. Vázquez-Abad, « Un dispositif de suivi oculaire pour l'analyse de l'attention et des processus cognitifs des apprenants en physique », dans cet ouvrage.
- Ericsson, K. A. (2006), « Protocol analysis and expert thought : Concurrent verbalizations of thinking during experts' performance on representative task », dans K. A. Ericsson, N. Charness, P. Feltovich, and R. R. Hoffman, R. R. (Eds.). *Cambridge handbook of expertise and expert performance*, Cambridge, UK : Cambridge University Press, p. 223-242..
- Gottman, J.M. et A. K. Roy (1990), *Sequential analysis : a guide for behavioral researchers*. New-York, NY : Cambridge University Press.
- Lesage, M. « Développement de normes d'interfaces usager dans un contexte d'évaluation adaptative par ordinateur soutenant des situations d'apprentissage », dans cet ouvrage.

- Mahr, D. (1982), *Vision*. New York : W.H. Freeman.
- Masson, S., P. Potvin, et M. Riopel, , « L'utilisation de l'imagerie cérébrale pour la recherche en éducation », dans cet ouvrage.
- Mercier, J. et C. Frederiksen, (2008) , « The structure of the help-seeking process in using a computer coach in problem-based learning », dans *Computers & Education*, 51(1), p.17-33.
- Mercier, J. et C. Frederiksen, (2007), « Individual differences in graduate students' help-seeking process in using a computer coach in problem-based learning », dans *Learning and Instruction*, 17 (2), p. 184-203.
- Newell, A. (1990), *Unified Theories of Cognition*. Cambridge, MA : Harvard.
- Newell, A. et H. A. Simon, (1976), « Computer science as empirical enquiry : symbols and search », dans *Communications of ACM*, 19, p. 113-126.
- Riopel, M., P. Potvin, F. Boucher-Genesse, , V. Djédjé, et G. Raïche, . « Suivi informatique des cheminements d'apprentissage pour la recherche en éducation », dans cet ouvrage.
- Searle, J. R. (1979), *Expression and Meaning : Studies in the Theory of Speech Acts*. Cambridge, UK : Cambridge University Press.
- Sun, R. (2006), « Prolegomena to integrating cognitive modeling and social simulation », dans R. Sun (Éd.), *Cognition and multi-agent interaction*. New-York, NY : Cambridge University Press.
- Sun, R., L. Coward, et M. J. Zenzen (2005), « On levels of cognitive modeling », dans *Philosophical Psychology*, 18 (5), p. 613-637.
- Taatgen, N., C. Lebiere, et J. R. Anderson (2006) "Modeling paradigms in ACT-R" dans R. Sun (Éd.), *Cognition and multi-agent interaction*. New-York, NY : Cambridge University Press.
- Tschan, F. (2002), « Ideal cycles of communication (or cognitions) in triads, dyads, and individuals », dans *Small Group Research*, 33 (6), p. 615-643.

CHAPITRE 3



Un dispositif de suivi oculaire pour l'analyse de l'attention et des processus cognitifs des apprenants en physique

Fethi Guerdelli, Université du Québec à Montréal

Aude Dufresne, Université de Montréal

Odile Martial, Université de Montréal

Mohamed Droui, Université de Montréal

Jesús Vázquez-Abad, Université de Montréal

RÉSUMÉ DU PROJET

Dans ce chapitre, nous présentons une recherche qui tente de tenir compte de plusieurs facteurs humains pour offrir plus de facilité et d'aide à l'apprenant. On se placera dans le cadre d'un cours en sciences physiques fondé sur l'expérimentation dans un simulateur et d'une pédagogie fondée sur le conflit cognitif. Plusieurs informations décrivant l'état de l'apprenant peuvent être recueillies durant

ses interactions. Nous comptons utiliser le suivi oculaire, les mesures physiologiques de même que les enregistrements des mouvements et des actions de la souris. L'analyse de ces traces d'utilisation permettra de mieux comprendre et prédire le comportement de l'apprenant afin de donner des indicateurs permettant d'ajuster le cours et de procurer du soutien quant à la stratégie pédagogique proposée. Durant les préexpérimentations, un tuteur humain sera utilisé comme modèle pour analyser les stratégies naturelles de soutien à l'apprentissage. L'ensemble des informations enregistrées sur l'interaction avec l'environnement d'apprentissage et le tuteur humain nous servira de base de données que nous allons analyser pour en extraire des paramètres et des règles pertinentes. Les règles serviront à établir le modèle comportemental d'un agent logiciel de soutien qui, en plus d'être capable d'interpréter les réponses de l'apprenant, sera doté de la capacité d'interprétation de ses réactions non verbales.

INTRODUCTION

Le domaine des environnements informatiques pour l'apprentissage humain fait intervenir plusieurs disciplines et expertises comme la psychologie cognitive, les sciences de l'éducation, l'intelligence artificielle et l'informatique. Certes, un système de soutien informatisé à l'apprentissage est un système complexe, qui repose sur plusieurs éléments de modélisation comme ceux de l'usage, de l'expertise du domaine, de la stratégie pédagogique, du développement de l'environnement d'apprentissage et de la matière à enseigner. La réussite de l'apprentissage dépend de toutes ces composantes. Or, le comportement humain est subjectif et difficile à modéliser. Il n'est pas évident de simuler le comportement d'un tuteur humain dans le but de concevoir un tuteur automatisé. L'humain manipule beaucoup d'informations et de connaissances en même temps, il utilise des heuristiques qui sont le produit d'un ensemble d'expériences antérieures. Il est donc difficile de modéliser l'analyse des situations et le choix de stratégies pour aider l'apprenant selon le contexte.

Dans notre recherche, nous allons tenter d'assister le tuteur humain dans sa tâche et de reproduire certaines fonctions de soutien qui sont automatisables. Le fait de dégager le tuteur humain de certaines fonctions « mécanisables » est profitable aussi bien à lui, qui aura plus de temps et d'énergie pour accomplir ses fonctions « humaines », qu'aux apprenants, qui auront la chance d'être dou-

blement assistés. De plus, et contrairement au tuteur automatisé, le tuteur humain ne peut être disponible en tout temps pour répondre aux besoins de l'apprenant. Il est également incapable de suivre chaque apprenant d'une façon individuelle, étant donné que plusieurs cours se font en groupes et que l'apprenant doit souvent compléter son apprentissage après les cours.

Ce travail de recherche vise l'amélioration des technologies de l'information et de la communication en éducation (TICE) afin de promouvoir un meilleur apprentissage. Les utilisateurs peuvent être des étudiants qui suivent des cours faisant partie de leur scolarité ou des personnes qui veulent tout simplement apprendre par elles-mêmes. L'utilisation des TICE est devenue une solution sérieuse pour le soutien à l'apprentissage, et elle a introduit des changements aussi bien chez les apprenants que chez les tuteurs et les concepteurs pédagogiques. La notion de distance entre tuteur et apprenant n'est plus la même, un cours pouvant se donner aussi bien en face à face qu'à distance. Le cours étant souvent mal adapté aux besoins et au rythme de chaque apprenant, sa conception doit être renouvelée. Les tuteurs voient alors leur rôle changer car, au-delà du fait qu'ils doivent s'adapter aux nouveaux environnements d'apprentissage, ils doivent aussi concevoir leurs cours en tenant compte de l'ergonomie, des outils utilisés et de la distance entre les apprenants. Le rôle de l'apprenant a également bien changé, car les TICE l'incitent désormais à devenir plus autonome et plus actif, et à mieux tirer profit de l'opportunité d'un apprentissage individualisé et adapté à ses besoins d'apprentissage.

1. PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

1.1. Interaction personne-machine et TICE

Cette recherche s'inscrit dans le domaine de la communication personne-machine, et plus spécifiquement dans celui de l'assistance à l'utilisateur et de l'extraction des connaissances à partir des données. Comme on l'a cité précédemment, on note des faiblesses dans le dialogue personne-machine, qui est moins évolué que le dialogue entre humains. La machine manque d'outils pour nous comprendre et utilise des langages moins évolués que le nôtre. Nous sommes en effet encore bien loin de réussir le test de Turing (Stuart, 2004) qui préconise une interaction personne-machine plutôt naturelle. En revanche, les interactions interpersonnelles se basent sur des

communications verbales et non verbales, comme des gestes ou des expressions faciales (Richmond et coll., 2004). L'apprenant peut s'exprimer de différentes façons lors d'une tâche d'apprentissage : le tuteur, grâce à ses capacités humaines, peut interpréter et comprendre son état et ses intentions. Le tuteur humain gère une quantité impressionnante d'informations multimodales et peut prendre des décisions et réagir convenablement pour expliquer, corriger ou sanctionner, selon la façon qu'il juge adéquate. L'analyse psychologique du comportement du tuteur peut guider le développement de modèles par son expertise, son dialogue et ses stratégies pédagogiques (Frederiksen, 2001). Ces modèles peuvent être utilisés pour concevoir des tuteurs artificiels imitant le comportement naturel du tuteur humain. L'étude du comportement du tuteur humain a fait l'objet de plusieurs recherches pour la conception des systèmes tuteurs informatisés. Plusieurs systèmes ont découlé de ces recherches et couvrent un grand spectre de domaines aussi variés que la physiologie (Shah et coll., 2002), la physique (VanLehn et coll., 2003) ou les statistiques (Frederiksen et coll., 2005). Ces systèmes tuteurs assistent l'étudiant dans sa tâche d'apprentissage et lui offrent l'aide nécessaire.

L'introduction de l'ordinateur s'accompagne de changements comportementaux aussi bien chez l'apprenant que chez le tuteur, car la communication médiatisée devient indirecte. Une partie de l'attention et du regard de l'apprenant est affectée plus à l'écran qu'à la personne qui est en train d'enseigner. Certains liens se brisent entre tuteur et apprenant. Si un tuteur peut bien reconnaître un acte d'étonnement ou d'incompréhension de l'apprenant sans que ce dernier ne l'exprime verbalement, il ne peut malheureusement pas suivre individuellement tous les apprenants ni interpréter correctement tout ce qui est non verbal. Pourtant, les actions et les émotions de l'apprenant peuvent être très utiles au tuteur pour juger de son état cognitif et agir en conséquence. Les émotions ont une influence sur la motivation (Petri, 1996) et, par conséquent, sur la qualité de l'apprentissage. Les vertus de la dimension affective de l'interaction en contexte d'apprentissage humain avec l'ordinateur sont bien indiquées dans Nkambou et coll. (2008). Cependant, le tuteur, même dans un cours particulier face à l'apprenant, est incapable d'avoir tous les indices sur le déroulement des processus cognitifs de l'apprenant. Par exemple, il ne peut pas savoir si le texte présenté a été réellement lu ni sur quel mot ou section l'apprenant s'est attardé. De plus les émotions des apprenants ne sont pas

toujours visibles. Il est utile de reconnaître les états affectifs (Lisetti, 2004) et d'analyser le regard de l'apprenant (Baccino, 2004) pour mieux le « comprendre » et bien le « servir ».

Le tuteur ou l'expert est une ressource précieuse et coûteuse. Faciliter ses tâches et le doter d'un maximum d'informations sur le déroulement de l'apprentissage et les états des apprenants contribueraient à l'amélioration de la qualité d'apprentissage et à la diminution de sa durée. Pour généraliser l'accessibilité de l'apprentissage ou du téléapprentissage en tout temps, on ne peut plus compter sur la présence continue du tuteur humain. Un agent tutoriel pourrait effectuer certaines tâches planifiées, mais est-il possible d'utiliser les informations captées pour offrir une aide au bon moment, pour comprendre les intentions de l'apprenant et pour adapter l'apprentissage à son rythme et à ses préférences ? La majorité des systèmes d'aide se contentent de faire un diagnostic et une évaluation de la situation, puis déclenchent le mécanisme d'aide programmé, mais cette aide n'est pas toujours adéquate ou utile pour l'apprenant. Il est pertinent de connaître l'impact réel de cette aide et la manière dont l'apprenant y a réagi. Un agent peut-il intégrer les rétroactions à l'aide proposée pour l'adapter, en tenant compte du profil de l'apprenant ainsi déduit ?

1.2. Le système visuel humain

Notre système visuel a la capacité de sélectionner rapidement les informations les plus pertinentes de son environnement. Lors de l'observation de plusieurs objets, une attention particulière est attribuée à certains objets plus qu'à d'autres. Cette sélection par l'attention diminue les informations à traiter et, par la suite, contribue à accélérer le processus de vision. Le monde qui nous entoure est très complexe, chaque objet étant composé d'autres objets et pouvant représenter d'autres liens ou informations reliés à d'autres objets. On ne perçoit pas uniquement l'objet qui existe dans notre champ de vision, mais beaucoup plus que cela. La vision est étroitement liée à la mémoire et, en fonction de ce qu'on observe, on fait des liens avec le déjà-observé, donc on effectue des comparaisons dans notre mémoire entre les éléments qu'on observe. Ce qu'on voit n'est en fait qu'une représentation mentale de la réalité, on essaie de faire des liens entre les objets et de leur associer des noms et des fonctions. La vision invoque, en plus de l'image observée, des souvenirs. Bien que la vision soit complexe, sa modélisation demeure

un défi en informatique et en intelligence artificielle. Depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs ont tenté de concevoir des systèmes visuels autonomes. Certes, différentes avancées ont été constatées, mais on est de plus en plus convaincu de la complexité du problème : le système visuel ne peut se réduire à un problème calculatoire. Il existe une collaboration entre l'imagerie, l'intelligence artificielle et la gestion des connaissances. Le système visuel est constitué de cellules neurales complexes. Il a la propriété de détecter et de différencier les éléments. L'observation est faite globalement, mais l'accent est mis sur certains endroits ou objets plus que d'autres. Ce qu'on observe est généralement lié à un contexte. Un objet isolé n'a pas forcément une signification particulière, sauf ce qu'il est. D'un contexte donné à l'autre, il peut avoir une signification complètement différente. L'objet observé n'est pas ce qu'il est, mais ce qu'il représente pour chacun. La vision ne se limite pas à la représentation d'objets. Elle est aussi une activité d'exploration, de collecte d'informations et d'acquisition de connaissances.

1.3. Le regard

Les yeux ont une grande capacité de bouger et ne demandent que très peu d'effort physique. Il n'est possible de suivre le mouvement des yeux qu'avec des dispositifs de pointe comme l'oculomètre. L'oculomètre, en sa version récente, permet de connaître à tout instant la direction du regard du lecteur en analysant le reflet cornéen de la lumière infrarouge projetée sur l'œil. L'œil joue habituellement le rôle de récepteur d'information, mais dans notre étude il va jouer le rôle d'émetteur d'information. Avec l'oculomètre, en version caméra sur table (système ASL¹), le lecteur sera déchargé du matériel encombrant limitant ses mouvements. Une étude menée par Jakob Nielsen en 1997 a démontré que, devant des pages web, les internautes ne lisent pas tous les mots, mais en survolent quelques-uns et font généralement une lecture en diagonale. Les pages web contiennent parfois plus d'informations que ce dont on a besoin. Plusieurs pages web sont mal conçues ou mal présentées, on présente peu d'information et on propose plusieurs liens hypertextes pour aller chercher davantage d'informations. On est généralement victimes de ces présentations. On peut alors se questionner sur la meilleure manière de présenter des pages d'information. En réalité,

1. <http://www.a-s-l.com>

une manière n'est pas meilleure qu'une autre, mais plusieurs facteurs entrent en jeu comme le profil de l'internaute, son âge, son niveau d'éducation, ses préférences, sa culture, son état émotionnel, les connaissances qui peuvent lui permettre de lire plus vite ou, au contraire, plus lentement si les explications ne suffisent pas à la compréhension. De plus, dans le contexte de l'apprentissage dans une simulation, les regards sur les paramètres affichés sont pertinents pour comprendre la réflexion de l'apprenant. On va donc chercher à analyser le regard de l'utilisateur pour diagnostiquer et comprendre ce qui attire son attention, ce qu'il regarde et comment il passe d'une zone d'intérêt à l'autre.

Lorsqu'on lit un document électronique, souvent multimédia incluant du texte, des images et des tableaux, on opère à plusieurs niveaux : la perception, la compréhension et l'interprétation. On effectue généralement un survol global du document présenté, sa structure est perçue. Certains éléments sont analysés, ensuite on effectue une lecture fine des parties jugées pertinentes. Ces deux phases peuvent d'ailleurs interférer de manière itérative. Selon le « eye-mind hypothesis » émise par Just et coll. (1980), c'est lors de la fixation de l'œil sur le mot que son traitement se déroule. Les informations portées par la trajectoire du regard permettent de repérer les points de focalisation, les zones d'intérêt qui peuvent donner des renseignements sur l'attention. Le suivi des points de fixation, leur durée et les retours en arrière donnent des indicateurs sur la compréhension. Selon Rayner (1992), les mouvements des yeux sous forme de sauts d'une zone à l'autre (saccades) jouent un rôle primordial dans la compréhension de la perception des mots ou des images.

Cependant, l'œil du lecteur ne fait pas des mouvements uniformes ou linéaires, il fait des bonds ou des saccades d'une zone à l'autre. Le suivi oculaire démontre que l'œil ne fixe pas une lettre ou un mot, il fixe toute une zone.

2. OBJECTIF DE LA RECHERCHE

Notre projet vise à concevoir un système informatique basé sur l'utilisation du suivi oculaire et physiologique dans le but de prendre en compte l'état de l'apprenant et son comportement pour mieux l'assister avec des agents intelligents durant le processus d'apprentissage. Le système sera inspiré de celui d'un tuteur humain en

observant ses interventions et en cherchant à reconnaître les indices probables qui en ont été les déclencheurs. Cette modélisation nous servira à déterminer quelles actions devraient être faites par un tuteur informatisé dans les mêmes conditions.

Plusieurs informations seront recueillies durant l'apprentissage : les mouvements de la souris pour manipuler les contrôles de la simulation, les données physiologiques et spécialement les données oculométriques. Nous procéderons à une analyse de ces informations afin d'en extraire des connaissances utiles à la compréhension des activités humaines de l'apprenant dans le but de mieux l'aider.

Notre objectif global est d'améliorer la qualité de l'interaction afin de faciliter et de favoriser un meilleur apprentissage par l'apprenant. Il s'agit d'offrir à ce dernier un système efficace qui s'adapte à son profil cognitif et comportemental lors d'une activité d'apprentissage. Pour y arriver, plusieurs objectifs spécifiques doivent être atteints :

- ◆ Mettre en évidence l'importance des informations issues du regard de l'apprenant quant à la description de ses intentions et de sa compréhension.
- ◆ Concevoir une base de données comportementale pouvant contenir les données issues de l'oculomètre, de la souris et des capteurs physiologiques, de même que des données reliées à l'aide du tuteur. Elle sera utilisée lors de l'analyse de données.
- ◆ Chercher des règles d'association ainsi que des motifs (*patterns*) dans les données enregistrées ou des corrélations entre des données et des actions du tuteur ou de l'apprenant.
- ◆ Concevoir un agent tutoriel inspiré du comportement naturel du tuteur humain et qui réponde aux réactions physiologiques et au parcours oculaire de l'apprenant.
- ◆ Évaluer l'intégration des règles extraites pour imiter le comportement du tuteur humain et tester les capacités de l'agent à détecter les faiblesses de l'apprenant et à décider du moment adéquat pour proposer de l'aide.

- ◆ Enregistrer les réactions de l'apprenant à l'aide proposée, pour évaluer l'efficacité du système d'aide et éventuellement en tenir compte dans le système d'aide.

3. ÉTAT DE LA QUESTION ET TRAVAUX RELIÉS

Les mouvements oculaires peuvent être utilisés dans les interactions humain-machine. En effet, en IHM, on étudie les différentes façons de pouvoir interagir avec l'ordinateur. Il est évident qu'on utilise essentiellement les mains, que ce soit pour taper sur le clavier ou bien pour déplacer la souris. Les mains sont aussi utilisées pour manipuler les stylets optiques ou des écrans tactiles (Hix, 1993). Le clavier et la souris sont les organes d'entrées les plus populaires et les plus utilisés, mais on se rend bien compte qu'ils sont incapables de bien exprimer des attentions ou des émotions. Des recherches ont permis d'analyser la voix et de développer des interfaces qu'on peut commander avec la voix, après une phase d'apprentissage pour bien réagir à la prononciation des différents individus (Caelen, 1996). Dans cette recherche, l'accent est mis sur l'utilisation des yeux lors des interactions avec la machine. Ce type d'interactions est bien particulier, l'enregistrement des mouvements oculaires génère une quantité impressionnante de données étant donné la vitesse des yeux. Le nettoyage et l'analyse de ces données demeurent une tâche assez complexe. On utilisera les mouvements oculaires pour mieux comprendre l'état de l'apprenant en récoltant des indices qui ne peuvent pas être exprimés par les mains. Argyle (1969) a estimé que, lors d'une communication verbale entre deux personnes, seulement 30 % du processus de communication est verbal, et que les 70 % restants représentent une communication non verbale. Le regard joue un rôle crucial dans les communications sociales (Kendon, 1967).

3.1. Le suivi oculaire

Les yeux sont en mouvement continu pour se rendre compte de l'environnement. Les mouvements ne cessent pas même quand on fixe un objet, il y a toujours des micro-mouvements pour rafraîchir et transmettre l'image perçue. Ces mouvements qu'on appelle aussi saccades assurent la continuité de la vision et, en leur absence, l'image ne sera plus perçue (Pritchard, 1961). La disparition de l'image s'effectue graduellement. Ces mouvements des yeux ne sont

pas effectués sous forme de glissement mais sous forme d'un déplacement brusque (saccade) et d'une immobilité de courte durée (fixation).

Pour le traitement d'une image dans le cerveau, l'ordre et la durée des fixations dépendent non seulement de la nature de l'image perçue, mais aussi de ce que le sujet a déjà mémorisé (Duchowski, 2002, Engbert, 2004). Le sujet sélectionne les éléments les plus importants (ce qui est très subjectif) pour aller chercher par la suite les moins importants.

En 1900, Raymond Dodge a pu mettre en place un appareil de mesure des mouvements oculaires. Il consistait à placer un rayon lumineux sur la cornée et à photographier le mouvement de la réflexion. Il a pu classer les mouvements oculaires en cinq types (Collewyn, 1999) : les saccades, la poursuite, les mouvements compensateurs, les mouvements compensateurs réactifs et la convergence. Son dispositif s'avérait moins intrusif que celui de Huey et était à l'origine des oculomètres utilisant le reflet cornéen. Il lui a aussi permis de conclure qu'il n'y a pas de perception visuelle lors des saccades.

La partie suivante de ce chapitre présente un historique des recherches effectuées et des techniques utilisées pour la mesure des mouvements oculaires ainsi que les méthodes employées pour les enregistrer. Y sont mis en évidence les indices qu'on peut mesurer lors d'une activité de lecture électronique.

3.2. L'oculométrie

Bien que l'oculométrie ne soit pas encore très répandue, plusieurs travaux et recherches se sont concentrés sur son utilisation dans des domaines très variés. En effet, l'oculométrie n'est pas un domaine très récent ; il a été abordé par Cattell (1886) et repris par Huey (1908) et a connu un grand essor grâce aux travaux de Rayner (1992), qui a effectué plusieurs études sur les mouvements oculaires. Ce dernier a démontré la possibilité de les observer, de les enregistrer, et de déduire, par l'analyse, la capacité de lecture et de compréhension des sujets : les mouvements oculaires reflètent les processus cognitifs engagés. Les mouvements oculaires ont été utilisés en sciences humaines comme des indices des opérations mentales pour observer des activités mentales de traitement des

informations visuelles et pour tester des modèles psycholinguistiques (Just et coll., 1980).

L'oculomètre fournit des informations sur ce que l'utilisateur est en train de regarder. Cette technique a été utilisée dans des nombreux domaines comme les sciences humaines, le militaire, le commercial, l'industriel et le médical. En effet, il est possible actuellement de commander des appareils par le regard. Cela peut servir, par exemple, à combler une défaillance chez une personne. Les personnes handicapées ont bien bénéficié de l'oculométrie : Hutchinton (1989) a mis au point un système qui assure l'interaction par le regard grâce à sur un clavier virtuel. Son système ERICA (Eye-gaze-Response Interface Computer Aid) permettait d'appeler des infirmières, et il s'est étendu à l'utilisation des traitements de textes, des programmes éducatifs et des jeux vidéo. Un temps de fixation de 2 secondes correspond à la sélection d'une commande et, si elle demeure encore fixée pendant une autre seconde, on simule l'appui sur la touche « entrée ». Le traitement de texte a connu plusieurs problèmes, entre autres, la taille de l'écran, qui ne permettait pas de saisir le clavier en entier avec les menus et le texte en cours d'écriture. La résolution de l'écran a dû tenir compte des limites de l'oculomètre, une forte résolution rendant impossible l'identification des caractères du clavier virtuel et des commandes. Alors qu'il fallait environ une heure et demie pour saisir juste une page, ce temps a été amélioré par l'intégration des phrases courantes dans des menus et par l'implantation d'un algorithme de prédiction des mots en fonction des deux dernières lettres tapées (Frey et coll., 1990). D'autres recherches ont pu améliorer ce système, comme celle de Istance et coll. (1996), qui propose plusieurs claviers virtuels en fonction du contexte.

L'oculométrie a été aussi utilisée dans des situations où les mains étaient occupées. Charlier et coll., (1992) ont mis au point un microscope guidé par le regard. Un chirurgien dont les deux mains sont occupées par la manipulation des instruments lors d'une opération ne peut déléguer le déplacement du champ visuel du microscope à une autre personne, vu la lenteur et les risques d'erreurs élevés. Il ne peut commander le déplacement par la voix, car elle est discontinue donc inadéquate et inefficace pour des réglages fins. L'utilisation des pieds va augmenter les charges cognitives, puisque les mains sont aussi en mouvements, ce qui augmente la fatigue et les risques de mouvements maladroits. Avec la commande par le

regard, les commandes du microscope se faisaient d'une manière naturelle, simple et précise.

L'utilisation des données oculométriques en temps réel a été abordée par Jakob (1998), qui voyait la possibilité de commander des menus et d'effectuer des sélections par le regard. Ces idées ont été reprises par Salvucci (2000) pour concevoir le IGO (Intelligent Gaze-added Operating-system), un système commandé par les yeux. Dans cette même voie, Hornof (2004) a conçu le système EyeDraw pour que les enfants atteints d'une déficience motrice puissent dessiner des images par le mouvement des yeux.

Les expériences précédentes nous prouvent que les yeux peuvent dépasser leur rôle sensoriel pour devenir un organe essentiel en situation d'interaction et capable de commander des claviers ou des instruments, comme les doigts le font. Ainsi, le système que nous comptons développer pourrait de la même façon susciter une explication, en raison du regard persistant de l'apprenant sur un résultat, ou une suggestion s'il n'y a pas eu de regard sur un élément pertinent.

Le domaine d'évaluation des interfaces web est un autre domaine qui témoigne de nombreuses expérimentations de l'oculométrie. Cette technique a permis d'améliorer la conception des interfaces. Les travaux de Nielsen (2008) et les expériences faites sur des utilisateurs du web, ont permis de montrer l'importance des informations issues du suivi oculaire. Il affirme que la manière de lire et d'explorer une page web est fortement influencée par les buts de l'utilisateur. Il a pu identifier quelles zones de la page ils regardent en premier lieu et comment ils réagissent aux informations publicitaires. Il a pu démontrer, après de nombreuses expériences avec des utilisateurs du web, que les endroits les plus fréquentés ont la forme de la lettre « F ». La majorité des utilisateurs commencent par lire la bande horizontale du haut, ensuite une bande horizontale du milieu et enfin ils parcourent la zone verticale gauche. Une autre zone a aussi des chances d'être consultée, c'est la zone horizontale du bas, et on aura une forme qui ressemble plus à un « E » qu'à un « F ». L'étude du comportement des lecteurs vis-à-vis des pages web a démontré que les utilisateurs ne lisent pas les pages mot à mot, mais sautent d'un endroit à l'autre. Pour faire passer un message qui sera visible par la majorité des lecteurs, il est judicieux d'organiser les pages web de façon à présenter les phrases contenant les informations les plus importantes aux endroits les plus consultés.

Grâce à ses recherches, Nielsen (2008) a pu démontrer l'existence d'une grande différence entre la lecture d'un document imprimé et d'un document en ligne. Il affirme que ses recommandations « d'écrire pour le web » doublent la facilité d'utilisation d'un site web et augmentent de façon spectaculaire le transfert d'informations à l'utilisateur. Cela a mis l'accent sur l'ergonomie cognitive, son apport pour l'amélioration des interfaces et la communication entre humain et ordinateur.

D'autres travaux, qui ont été entamés par Baccino (2004), se sont concentrés sur l'interprétation et la modélisation de l'exploration visuelle dans la recherche d'informations sur le web et la lecture électronique. Il a utilisé l'oculométrie cognitive pour la conception et l'évaluation des interfaces utilisateurs (Baccino, 2005) et pour pister en temps réel l'activité cognitive des utilisateurs du web dans le but d'évaluer la prise d'information. Ces recherches démontrent que le regard, ce mouvement naturel et fluide, peut être un élément enrichissant lors des interactions humain-ordinateur.

Cristina Conati, chercheuse dans le domaine de l'intelligence artificielle, s'intéresse à la modélisation de l'utilisateur, aux interfaces adaptatives et aux interfaces entre humain et machine. Elle a consacré plusieurs de ses recherches à établir des modèles de l'utilisateur d'un point de vue cognitif en déterminant ses connaissances, ses buts et ses préférences. Elle a aussi étudié les réactions émotionnelles dans le but de réaliser des systèmes qui s'adaptent automatiquement aux besoins de l'utilisateur. Dans de nombreuses expériences, elle a utilisé des mesures des mouvements des yeux. Conati et coll. (2007) ont décrit une expérience utilisant des données oculométriques en temps réel, dans le but d'estimer le comportement métacognitif de l'utilisateur durant ses interactions avec un environnement d'apprentissage basé sur l'exploration.

Conati a exploité les données issues de l'oculomètre pour alimenter le modèle utilisateur dans le but d'évaluer le comportement métacognitif de l'utilisateur durant ses interactions avec un environnement d'apprentissage par l'exploration (Exploratory Learning Environment). Cet environnement éducatif permet d'apprendre par l'exploration et par l'autoexplication, ces deux habilités n'étant pas forcément développées chez tous les apprenants. Conati et coll. (2000) ont proposé un système qui modélise le comportement auto-explicatif en utilisant des données sur l'attention issues d'un oculomètre. Il s'agit d'utiliser ces données dans un environnement

d'apprentissage des mathématiques, où l'apprenant peut effectuer des essais et des découvertes, le but n'étant pas d'offrir uniquement un environnement d'essais, mais de retracer les intentions et le raisonnement de l'apprenant. Une étude de Monty et coll. (1976) a démontré que le regard peut renseigner sur la partie de l'interface captant l'attention de l'utilisateur.

Conati et coll. (2007) ont effectué des expériences sur l'apprentissage des mathématiques avec le système ACE (Adaptive Coach for Exploration), destiné à des étudiants ayant des notions de base en mathématiques, et avec lequel l'apprenant peut faire varier l'équation d'une fonction et regarder sa courbe ou, inversement, modifier la courbe et voir sa nouvelle équation. Ce système comporte un assistant (« coach ») qui fournit des indications dès que le modèle de l'apprenant détecte des difficultés d'exploration chez l'apprenant (Bunt et coll., 2003). Le modèle de l'apprenant utilisé par ACE, basé sur des réseaux bayésiens dynamiques, aide les étudiants à mieux apprendre, mais il a souvent tendance à surestimer leurs comportements. En effet, si une courbe est déplacée plusieurs fois de suite dans son repère sans lien avec la variation de son équation, le système suppose que plusieurs explorations ont été faites, ce qui n'est pas le cas. L'absence d'information qui décrit si l'étudiant a bien regardé (exploré) le résultat d'une variation d'un élément quelconque a incité Conati et coll. (2007) à inclure des données issues de l'oculomètre pour combler cette lacune. Le temps passé à l'exploration est mesuré et sert à évaluer si un processus d'autoexplication est en cours. Le temps seul n'est pas un bon indice de l'auto-explication : il n'est pas facile de distinguer le temps passé à l'autoexplication du temps d'inaction. L'oculomètre permet de confirmer si l'utilisateur regarde bien l'effet d'une action, donc renseigne si des processus cognitifs sont en cours pour expliquer cet effet.

3.3. Les techniques d'enregistrement des mouvements des yeux

Il existe plusieurs techniques d'enregistrement des mouvements oculaires qui ne cessent d'évoluer pour être moins invasives et plus précises. Nous décrivons :

- 1) La technique galvanométrique (Scleral search-coil technique). Elle se base sur l'installation d'une lentille qui doit être collée à l'œil, et utilise une bobine d'induction à l'in-

térieur de la lentille ; la position de l'œil est déterminée par le champ électromagnétique autour de la tête du sujet. Malgré sa précision, cette technique nécessite une bonne dextérité quant à la manipulation des lentilles et cause de l'inconfort à l'utilisateur (Robinson, 1963).

- 2) La technique électro-oculographique « Electro-oculography (EOG) ». C'est une technique établie par Fenn et coll. (1934), peu coûteuse, qui utilise des électrodes cutanées placées autour de l'œil dans le but de suivre les variations des potentiels électriques (bioélectrique) sur la peau entourant l'œil. L'œil est une pseudosphère chargée positivement en avant et négativement en arrière. Le mouvement provoque le déplacement de l'emplacement des charges électriques, d'où l'existence d'un champ électrostatique. Bien que cette méthode enregistre les mouvements des deux yeux, elle demeure peu précise et inadéquate pour l'étude de la lecture. Elle est inconfortable et peut provoquer des irritations de la peau.
- 3) La réflexion de la lumière. C'est une technique qui profite de la réflexion de la lumière par l'œil. Elle utilise une lumière souvent infrarouge projetée sur l'œil du sujet, d'où l'appellation de technique oculographique infrarouge. Les rayons réfléchis sont captés et servent à déterminer l'endroit fixé par l'œil. Il existe plusieurs variantes de cette technique :
 - ◆ la technique basée sur la poursuite du limbus, qui est la frontière entre la sclérotique (blanc de l'œil) et l'iris (partie sombre). Elle se base sur la mesure de la lumière réfléchie après l'éclairage du limbe. Sa simplicité lui assure un coût faible, mais elle est très sensible aux mouvements de la tête et à la variation de la lumière environnante.
 - ◆ la technique de la poursuite de la pupille, qui utilise les réflexions de la pupille.
 - ◆ la poursuite de l'image de Purkinje. Les rayons émis éclairant l'œil sont réfléchis par quatre parties de l'œil : l'extérieur de la cornée, son intérieur, l'extérieur du cristallin et son intérieur. On obtient quatre reflets qu'on appelle « image de Purkinje ».

Plusieurs modèles d'oculomètre existent, certains doivent être portés sur la tête, d'autres imposent l'immobilité de la tête, et on trouve actuellement des modèles n'imposant aucun contact avec le sujet.

3.4. Les différents types de mouvements oculaires

Les images projetées sur la fovéa sont perçues avec la meilleure qualité, celle-ci se dégradant progressivement en s'éloignant de la fovéa. Il est évident que l'œil va chercher à obtenir des images de meilleure qualité, ce qui explique ses mouvements continus. Une autre contrainte vient justifier ses mouvements, c'est la limitation du champ visuel. On ne peut voir que les objets situés dans un champ de 130 ° verticalement et 180 ° horizontalement. L'œil est très agile grâce aux six muscles qui l'actionnent et lui assurent des rotations et des torsions.

Un objet est fixé après l'exécution des étapes préattentive et attentive qui déterminent l'emplacement de l'objet. L'œil se déplace vers la cible pour avoir la meilleure acuité visuelle ; ce saut est une saccade. Ce n'est pas le seul type de mouvement que l'œil peut effectuer. Une liste de ses mouvements a été établie grâce aux recherches de Jacob (1995) et de Bruce et coll. (1990), citées par Miellet (2004) qu'on peut résumer ainsi.

La convergence : elle est causée par le mouvement des deux yeux en même temps pour s'assurer que l'objectif est bien visé par les deux yeux. Plus la distance de l'objectif est réduite plus les yeux s'orientent l'un vers l'autre. Il s'agit d'un mouvement volontaire (Humphreys, 1989).

Les mouvements torsionnels « rolling » : il s'agit des mouvements de rotation des yeux autour d'un axe traversant la fovéa et la pupille. Ces mouvements sont involontaires et dépendent de l'angle du cou (Jacob, 1995).

Les saccades : ce sont des déplacements très rapides du regard dans le but d'explorer l'environnement ou une scène. Une saccade prend entre 100 et 300 ms pour s'initier (temps de latence) à compter de la manifestation du stimulus au déplacement des yeux. Une saccade est complétée après 30 à 120 ms. Les saccades peuvent se déclencher involontairement, et on compte environ 150 milles saccades par jour (Dodge, 1900), soit environ entre 3 et 5 saccades par

seconde. Vu la vitesse des saccades, qui varient entre 300 et 700 degrés par seconde, les informations perçues entre deux saccades n'ont pas le temps d'être analysées. Il en résulte qu'aucune information n'est perçue lors des saccades (Rayner et coll., 1989). Une saccade se programme après une décision du cerveau qui commande les muscles oculaires pour se fixer sur l'objectif.

- ◆ La poursuite : les yeux peuvent poursuivre le mouvement d'un objet, qui doit atteindre la zone fovéale et y rester. Ces mouvements sont plus lents et moins brusques que les saccades. Il s'agit d'un mouvement involontaire qui n'existe qu'en présence d'un objet mobile.
- ◆ Le nystagmus : ce mouvement apparaît pour compenser le mouvement de rotation de la tête. L'information est obtenue grâce à l'oreille interne. Le phénomène de la fenêtre du train illustre bien ce cas : on est en mouvement et on regarde à travers la fenêtre en fixant un objet qu'on suit avec le regard. Une fois que l'objet n'est plus disponible, on déplace le regard rapidement vers une nouvelle position.
- ◆ Les décalages et microsaccades : ils sont observables durant les fixations. Ces mouvements consistent en des glissements du regard suivi d'une microsaccade qui a un rôle de correction. Il s'agit d'un mouvement involontaire (Barber et coll., 1976).
- ◆ Le nystagmus physiologique : l'image qui est projetée sur la rétine a besoin d'être rafraîchie, faute de quoi elle ne sera plus perceptible. Ce type de mouvement est une oscillation de haute fréquence de l'œil favorisant la projection continue des images observées sur la rétine. Ce mouvement est involontaire et se passe durant les fixations. Il est de l'ordre de 1 degré.

La vision est une composition de ces différents mouvements. Les saccades et les fixations sont des bons indicateurs de la mesure de l'attention.

3.5. La lecture et la compréhension

Pour garder une empreinte des événements passés et pour sauvegarder son histoire et sa culture, l'humain a depuis toujours

enregistré ses traces sur différents supports. Une évolution impressionnante des technologies a permis le développement de l'imprimerie et le support de stockage de l'information textuelle, image, son et vidéo. Ce qui a été enregistré est destiné à être consulté et lu par d'autres personnes. Ce passage de l'information rencontre certainement plusieurs obstacles entre le concept écrit (les idées de l'écrivain) et l'interprétation du lecteur (ce qu'il a compris). Peu importe le support de l'information, il n'existe pas une manière unique de décrire ou d'interpréter une action, compte tenu de la richesse du langage naturel et des connaissances de chacun. Pour comprendre une même action, on est souvent mené à la comparer à celles vécues dans le passé ; chacun ayant son propre capital de connaissances, on ne comprend pas la même chose de la même manière.

Lors d'une activité de lecture d'un document, plusieurs niveaux de traitement de l'information sont mis en jeu. En effet, les traitements vont de la perception lumineuse d'un mot jusqu'à sa compréhension. Dès le jeune âge, nous commençons à apprendre à lire, cette activité est familière et elle devient spontanée et très courante dans notre société. Bien qu'elle soit évidente, il nous est difficile de bien comprendre les mécanismes qui se déroulent lors d'une activité de lecture et de compréhension. Il faut étudier les aspects élémentaires de la lecture (reconnaissance lexicale) et le processus psycholinguistique impliqué dans la compréhension (traitement syntaxique et sémantique). Des études menées par Strahm et Baccino (2006) ont utilisé l'enregistrement des mouvements oculaires pour reconnaître précisément ce que le lecteur est en train de regarder, dans quel ordre, et la durée des fixations. Les données recueillies informent sur les processus perceptifs et cognitifs traitant la prise des informations. Le traitement du sens relève de l'étude des systèmes de mémoire sémantique. La compréhension du texte consiste à lier des informations linguistiques avec des connaissances du monde réel. Un mécanisme de sélection va choisir les objets, événements et états invoqués par le texte. Les connaissances du lecteur sont représentées sous forme de base de connaissances (Schank, 1977) c'est-à-dire sous forme de concepts liés par le sens. Le lecteur construit des liaisons entre le document et ses connaissances en mémoire. Il s'agit de l'intégration des informations faite par l'intermédiaire d'une représentation mentale épisodique construite au fur et à mesure de la lecture. Selon Kintsch (1988), la

représentation mentale construite possède trois niveaux de représentation de l'information :

- ◆ un niveau de surface, qui exprime l'information lexicale et syntaxique ;
- ◆ un niveau sémantique, qui représente la signification locale et globale des phrases ;
- ◆ un niveau situationnel, qui englobe les connaissances antérieures et les aspects contextuels.

La compréhension de texte ne s'effectue pas seulement au niveau sémantique, elle est rattachée à la manière dont il est présenté. Un même texte présenté sous des formes différentes touche, en plus de la perception visuelle, la compréhension et la mémorisation. Le changement de versions des logiciels impliquant des modifications des interfaces utilisateurs cause souvent des difficultés de manipulation. Il s'agit de rétablir les liens entre les icônes ou menus et les traitements associés.

3.6. Indices utilisés dans l'étude de la lecture

L'objectif du suivi oculaire est d'obtenir des mesures des coordonnées des yeux sur l'écran, les temps de fixations et le passage d'une zone à une autre. Parmi les indices mesurables cités par Miellet (2004), nous en retenons sept qu'il convient de définir.

- ◆ La régression, ou « skipping ». Cela désigne la saccade faisant passer le regard de la cible actuelle vers une cible précédente car, pour différentes raisons, on peut avoir besoin de revisiter une cible qu'on a déjà fixée auparavant. Cela révèle l'existence de mécanismes internes demandant plus de précisions sur une information déjà observée, mais une révision est aussi nécessaire pour comprendre ou établir un lien entre les différents éléments en cours d'observation. Dans le cas de la lecture, il s'agit d'une saccade vers le point précédent celui en cours de fixation. Il peut s'agir du mot précédent ou d'une partie d'un mot.
- ◆ Le lieu initial de fixation, ou « initial landing site ». Lors de la lecture d'un mot, le regard se fixe la première fois sur un lieu qui n'est pas le début du mot mais, situé entre le début et le centre, comme Rayner (1979) l'a démontré (il

appela ce lieu favori « *preferred viewing location* »). Il peut être exprimé par le nombre de lettres par rapport au début du mot (sens positif) ou la fin du mot (sens négatif).

- ◆ La refixation Il s'agit de fixer la même zone plusieurs fois avant de passer à une autre zone.
- ◆ La distance du lieu de départ de la saccade, ou distance de lancement, ou « *launch distance* ». C'est la distance entre la fixation précédente et le début du mot fixé. Cette distance est donnée en nombre de caractères. Elle est différente de la longueur de la saccade (distance entre les points de départ et d'arrivée d'une saccade).
- ◆ La durée de la première fixation, ou « *First Fixation Duration* ». Cette action très particulière fait en sorte que, face à une nouvelle scène, on a tendance à commencer à explorer et à essayer de déterminer ce qui est devant les yeux. Elle peut être associée à une exploration ou à un jugement de familiarité des éléments observés. Dans le cas de la lecture d'un texte, la durée du regard est associée à la reconnaissance des mots. Les mécanismes de compréhension du sens du mot dans son contexte sont enclenchés une fois lu l'ensemble des mots concernés.
- ◆ La durée totale de fixation, ou « *Total Fixation Duration* ». C'est la somme des durées de toutes les fixations sur un mot en incluant les régressions.
- ◆ La durée du regard, ou « *Gaze Duration* ». C'est la somme des durées des refixations sur un mot avant de le quitter pour regarder un autre mot.

Comme les mouvements des yeux sont saccadés, certains mots peuvent être lus sans pour autant être fixés. Bien que cela puisse paraître problématique, la vision ne fixe pas des points, mais plutôt un champ dont le centre est projeté sur la zone fovéale, et les alentours, dans la zone parafovéale. Donc, des mots sautés peuvent être « lus » sans être fixés. Le saut des mots ne nous donne aucune indication sur la durée de fixation (elle est nulle), ils peuvent être déduits du contexte et par conséquent n'influent pas sur la compréhension. Le sens du mot peut avoir une bonne probabilité d'être compris lors du passage du regard sans arrêt sur le mot en question. Ceci est, en étroite liaison avec le contexte global. En fonction de la familiarité

avec le sujet, différents lecteurs ne consacreront pas la même durée de lecture. Une fois le contexte connu, le lecteur fera appel à sa mémoire pour mettre en relation des notions qui peuvent avoir un lien. Le titre d'un article ou le nom de son auteur donne déjà des indicateurs favorisant la compréhension du reste du document. De plus, la connaissance du langage et de la grammaire favorise le saut de mot, vu qu'on s'attend aux termes qui vont suivre. La connaissance du style de l'auteur facilite la compréhension de ses écrits et diminue la durée de la lecture. Au fur et à mesure qu'on poursuit la lecture, certains concepts et structures deviennent de plus en plus faciles à reconnaître, ce qui peut accélérer la lecture et augmenter les sauts de mots tout en gardant la compréhension du sens. Des associations entre les termes se construisant tout au long de la lecture, ces liens peuvent être utilisés pour prédire un mot qui pourra suivre. Ces mécanismes rappellent le principe de l'analyse sémantique latente (Deerwester et coll., 1990) qui suppose que l'appariement des termes est lié à la probabilité de trouver ces termes dans des contextes similaires, donc, la présence d'un terme induit automatiquement la présence de ceux qui lui sont sémantiquement similaires, comme l'a cité Firth (1957) : "You shall know a word by the company it keeps."

Les mots qu'on peut prévoir sont généralement plus courts que les autres, donc, ont plus de risque d'être sautés. Bien que le contexte semble très important pour prédire les mots qui suivront, Brysbaert (1998) affirme que la longueur du mot demeure le meilleur indice de saut de mots.

Des situations semblables peuvent apparaître quand l'auteur relit son propre texte, des erreurs pouvant passer inaperçues. En fait, ce n'est pas exactement ce qui est écrit qui est analysé. Les mots ne sont pas analysés un à un mais, derrière, il y a le sens global de la phrase. Il est difficile de corriger ses propres erreurs, tout simplement car on ne les voit pas correctement : la représentation mentale qui se forme ne correspond pas forcément à ce qui est présenté. Un conducteur distrait peut heurter la voiture qui le précède, il pourra justifier cet accident par le fait « qu'il ne l'a pas vue », pourtant une voiture ne passe pas inaperçue. Les mots sautés représentent environ 17 % des mots de contenu (c'est le cas des noms, des verbes, des adverbes ou des adjectifs) contre 62 % de mots de fonction (articles, quantificateurs, prépositions, conjonctions) selon Carpenter et coll. (1983).

Autour du point fixé, l'œil est capable de cerner environ 3 à 4 lettres de part et d'autre du point de fixation, il s'agit de l'empan perceptif qui a été mesuré par Rayner (1979) entre 7 et 11 lettres. La vision parafovéale permet un prétraitement des mots suivants et donc peut accélérer la lecture. En parallèle avec les mouvements des yeux, des mécanismes sous-jacents sont en exécution pour l'interprétation et la compréhension de ce qui est dans le champ visuel.

En utilisant ces paramètres, il sera possible d'évaluer les sections du texte explicatif que l'apprenant a vraiment lu avec attention, et sans doute compris, et d'utiliser cette information pour interpréter ces manipulations de la simulation et ces résultats aux tests de connaissances.

4. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Nous avons déjà développé un système tuteur associé à un système d'ExAO² (Nonnon, 2004) et nous y avons intégré un module d'aide basé sur un ensemble de règles définies et gérées par un système expert. Des expérimentations sont aussi en cours sur le simulateur de physique Phet³ qui nous servira comme environnement pour cette recherche. Le système Phet est un environnement d'apprentissage des sciences physiques (Phet, 2009). Il s'agit d'un simulateur offrant un micromonde qui permet d'effectuer des expérimentations et des tests en imitant un environnement de travail réel. La simulation est un outil didactique puissant dont l'enseignement de la physique doit tirer profit. Elle permet la visualisation de phénomènes scientifiques et la construction des modèles scientifiques (Richoux et coll., 2002). Les simulations sont également importantes dans le cas d'expériences de laboratoire qui sont impraticables, coûtent cher ou sont trop dangereuses (Strauss et coll., 1994). Les simulations peuvent contribuer au changement conceptuel (Windschitl et coll., 1998), fournir des expériences ouvertes aux étudiants (Sadler et coll., 1999), fournir des outils pour l'enquête scientifique (Windschitl, 2000) et des expériences de résolution de problèmes (Howse, 1998). Notre prototype se greffe au système Phet

2. ExAO : Expérimentation Assistée par Ordinateur

3. Physics Education Technology <http://phet.colorado.edu/new/index.php>

et comporte en plus les modules suivants : un contenu de cours, un module de Questions/Réponses et un module de clavardage.

Pour les expériences, une vingtaine de candidats seront choisis parmi des étudiants qui n'ont pas de connaissances profondes dans la matière à présenter. Une première sélection consistera à chercher des candidats n'ayant pas suivi le cours objet de notre expérimentation. De cette manière, on restreint les candidats potentiels. Une deuxième étape consiste à faire un prétest pour s'assurer que les candidats ont les connaissances préalables requises.

Le cours de physique à présenter traite de l'effet photoélectrique vu sous l'angle de la physique classique et, ensuite, sous l'angle de la physique quantique. Il sera découpé en plusieurs pages, et chaque page sera découpée en zones en fonction du contenu à étudier. Le contenu sera simplifié pour pouvoir interagir avec le cours de façon autonome. Au besoin, l'apprenant pourra dialoguer avec son tuteur par le biais du clavardage.

Chaque candidat sera placé devant un ordinateur, et il lui suffira de lire le contenu des pages, de suivre les directives (quand il y en a), de faire l'effort de comprendre, et de répondre aux questions à la fin de chaque section. Les questions seront à choix multiples pour accélérer la saisie des réponses et faciliter l'interprétation et la correction.

Tout au long du suivi du cours, les dispositifs suivants seront mis en place :

- ◆ L'oculomètre enregistrera les coordonnées des endroits fixés par les yeux, ce qui nous permettra de déterminer le texte lu ainsi que les durées de lecture.
- ◆ Les capteurs physiologiques enregistreront la conductance de la peau « *Galvanic Skin Reponse* », la température, l'électromyographie, la respiration et les battements du cœur. Les données issues de ces capteurs informeront sur certaines émotions et certains états physiologiques de l'apprenant.
- ◆ Les mouvements et actions de la souris seront enregistrés et serviront à retracer les actions effectuées dans l'environnement, ainsi que la durée entre les évènements.

Notre approche expérimentale s'inspire de la technique du magicien d'Oz (Amalberti, 1992). Ainsi, le tuteur humain sera placé dans un autre local pour simuler un environnement d'apprentissage en ligne. Il aura la possibilité d'échanger des messages avec l'apprenant au moyen d'un système de clavardage, de voir l'apprenant grâce à une caméra qui le filmera (une caméra web) et de visualiser l'écran de l'apprenant ou d'en prendre le contrôle avec un logiciel de contrôle à distance (VNC⁴).

Le tuteur dispose ainsi d'une masse d'informations qui lui permet un meilleur suivi individuel de chaque apprenant. Il devra interagir aux moments jugés adéquats pour assister son apprenant, et ce, sous plusieurs formes : intervention corrective, explicative, encouragement ou sanction, etc.

Le tuteur intervient dans les cas suivants.

- ◆ Demande explicite d'aide : l'apprenant est en situation nécessitant de l'aide (par exemple, s'il n'arrive pas à comprendre un concept ou s'il veut plus de détails ou un exemple) et en fait une demande explicite au tuteur.
- ◆ Réponses erronées : une mauvaise réponse devra être corrigée par le tuteur à l'apprenant en lui fournissant plus d'explications, des exemples ou en le renvoyant vers d'autres ressources, notamment celles qui, suivant l'analyse de l'interaction, n'ont pas été suffisamment explorées.
- ◆ Jugement du tuteur : le tuteur peut intervenir quand il juge que c'est profitable pour l'apprenant, même si aucun signe ne révèle le besoin. Il peut, par exemple, attirer l'attention de l'apprenant ou le préparer pour la suite ou tout simplement pour attirer son attention sur un concept donné.

4.1. Analyse initiale des données et extraction des connaissances

Nous justifions cette approche d'extraction des connaissances de la manière suivante : même si l'intérêt de l'orientation du regard

4. <http://www.realvnc.com/>

a été établi en situation d'interaction personne-machine (Collet, 1999), il n'est pas possible de formaliser des règles qui gouvernent ces gestes dans un contexte d'interaction en général et dans un contexte d'apprentissage en particulier. Nous ne pouvons donc pas de manière absolue demander aux tuteurs humains d'adapter leur intervention en fonction de la gestion du regard de l'apprenant en situation d'apprentissage. À notre connaissance, il n'existe pas de théorie en éducation ou en psychologie qui établisse formellement des principes liés à l'orientation du regard lors de la résolution de problèmes ou qui régit le comportement d'un tuteur en réponse à ces orientations. Il est donc nécessaire de procéder à une expérimentation particulière qui permettrait de déduire de tels principes.

4.2. Conception du tuteur artificiel

La phase suivante consistera à modéliser le tuteur artificiel qui agira dans le même environnement que le tuteur humain. Nous reprendrons ensuite la même expérience, mais en remplaçant le tuteur humain par le tuteur artificiel. Ce dernier ne disposera pas de la caméra filmant l'apprenant ni de la visualisation de son écran, et il devra être capable de déterminer le besoin d'aide de l'apprenant et de la lui fournir. Il aura à sa disposition l'analyse des données issues des capteurs physiologiques, de l'oculomètre et des mouvements de la souris. Pour tester ce tuteur, on utilisera le même environnement d'apprentissage que celui destiné à l'expérimentation avec d'autres étudiants ayant le même profil que ceux du premier groupe. Le système devra reconnaître les indicateurs du besoin d'aide et offrir de l'aide, mais il devra également mesurer la réponse et l'efficacité de cette aide, par la réaction physiologique, pratique de l'apprenant et un questionnaire d'évaluation de la pertinence de l'aide apportée lors de l'apprentissage. Un mécanisme d'ajustement de l'aide tiendra compte de ses réactions pour les prochaines interventions.

Le système d'aide sera basé sur un ensemble de règles qui seront définies grâce aux observations du tuteur humain lors des expérimentations avec les étudiants. Une probabilité est associée à chaque règle pour contrôler son déclenchement. Les règles sont de la forme « *Si condition Alors Action* ». Le tuteur artificiel dispose de plusieurs informations et l'analyse de ces données va lui permettre d'établir des liens entre causes (constatations) et effets (actions), et de prédire ce qu'un tuteur humain pourrait proposer comme aide

dans ces mêmes situations. Le système utilisera les données suivantes :

- ◆ le modèle usager, qui informe sur le profil de l'apprenant ;
- ◆ le modèle pédagogique, qui présente l'orchestration du cours ;
- ◆ le modèle expert, qui représente les connaissances de l'expert en se limitant à la liste des réponses valides aux différentes questions ;
- ◆ les informations issues de l'analyse des mouvements de la souris, qui renseignent sur les actions effectuées en fonction du contexte (ajustement d'un contrôle de la simulation, choix d'une explication), sur le temps passé entre les actions et sur les zones parcourues par la souris (affichage des informations sur un contrôle) ;
- ◆ les informations issues de l'analyse des données physiologiques, qui informent sur l'état de l'apprenant, par exemple sur son niveau de stress ;
- ◆ les informations issues de l'analyse des mouvements oculaires, qui informent si le temps de lecture est insuffisant ou trop long, sur les zones sautées ou non lues et sur les oscillations entre zones, la concentration (grandeur de pupille), etc.

4.3. L'analyse croisée des données recueillies

La découverte des connaissances à partir des données (Knowledge Discovery in Databases ou KDD) vise à extraire des informations utiles comme des régularités, des associations ou des règles à partir des données brutes (Han, 2001). Nos expériences vont nous générer des quantités impressionnantes de données. On cherche à comprendre une activité humaine à partir des données numérisées. Pour cela, on va déterminer l'organisation des données en vue des les interpréter et d'en extraire des informations et les connaissances utiles. En effet, les données brutes sont peu significatives, et c'est grâce à une analyse de données qu'on pourra déterminer des règles d'association (Pasquier, 2000). Les règles extraites seront présentées à un expert pour en juger la pertinence et leur donner une signification.

Les données oculométriques et physiologiques recueillies à l'état brut seront nettoyées en premier lieu. Ce nettoyage consiste à éliminer le bruit et les données non significatives (Fayyad, 1996). Les données ainsi traitées nous serviront de base de données de travail pour effectuer une analyse de données et pour dégager des informations et des connaissances.

Tout d'abord, on procédera à une recherche de règles d'associations afin de repérer les propriétés qui apparaissent ensemble : X est présent alors Y est présent, donc X donne Y. On va calculer une probabilité ou facteur de confiance pour qualifier les associations. Cela nous informera sur les chances d'avoir une règle d'association. Ainsi, on aura recours à des techniques appropriées (Agrawal et coll., 1993, Zaki, 2000, Garcia et coll., 2007) que l'on adaptera dans notre contexte. Ces adaptations pourront donner lieu à une contribution au niveau fondamental par l'amélioration de ces techniques.

Ensuite, on cherchera certaines régularités en découvrant des motifs fréquents qui pourraient, par exemple, être indicateurs de certaines difficultés chez une catégorie d'apprenants. Ainsi, on pourrait observer que, pour une majorité d'utilisateurs, la séquence de parcours oculaire du texte était similaire (c'est-à-dire qu'un patron de parcours a été détecté pour ces apprenants), ce qui pourrait indiquer un point commun entre eux et permettre ainsi une généralisation. Pour mettre en œuvre cette partie de notre travail, on explorera les algorithmes offerts pour la recherche des motifs séquentiels et on les adaptera dans notre contexte particulier ou on en proposera de nouveaux. Plusieurs algorithmes sont déjà proposés pour la résolution de ce type de problème (Agrawal et coll., 1995, Zaki, 2001, Pei et coll. 2004, Kum et coll., 2007) mais on jugera de leur pertinence dans notre contexte.

Les données oculométriques vont nous indiquer les coordonnées (en x et y) de la position de l'œil, le diamètre de la pupille ainsi que le temps de l'évènement. Vu que l'œil bouge rapidement, on pourra éliminer les fixations qui sont inférieures à un certain seuil (Baccino, 2004). Les données peuvent contenir des informations hors contexte, par exemple l'apprenant regarde à l'extérieur de l'écran, ou ses yeux sont fermés. L'écran étant découpé en zones d'intérêts, si le candidat regarde en dehors de ces zones, il sera inutile de garder cette information. Cela va réduire considérablement la taille de la base de données et accélérer l'analyse.

Se limiter à l'utilisation du clavier et de la souris implique forcément une perte d'information très utile pour estimer l'état dans lequel l'apprenant se trouve. Les indices recueillis par le système pourraient être communiqués au fur et à mesure et ils ne sont pas facilement détectables par un tuteur humain même s'il est en contact direct avec l'apprenant. L'oculomètre a l'avantage de reconnaître ce que l'apprenant regarde à tout moment, et contribue à définir une aide contextuelle qui soit plus appropriée, sans perturber l'apprentissage. Le tuteur artificiel peut exploiter ces informations afin d'estimer l'état cognitif de l'apprenant et de l'assister dès qu'il y a un besoin. Il peut également mettre en question la qualité du cours et détecter les zones difficilement compréhensibles ou du moins celles qui conduisent l'apprenant à des ambiguïtés ou provoquent un ralentissement de son apprentissage. Cela devra aider les concepteurs à raffiner l'organisation des scénarios pédagogiques.

CONCLUSION

La majorité des interfaces entre humain et machine se limitent à l'utilisation d'une unité de commande, généralement le clavier ou la souris. Il s'avère donc difficile de s'exprimer naturellement face à des ordinateurs. Avec l'évolution technologique, les ordinateurs peuvent présenter des informations sous forme multimédia incluant des textes, des sons, des images et des animations. Par contre, il existe moins de moyens pour les humains de communiquer avec les machines, et on sent bien l'existence d'un certain déséquilibre de dialogue. Bien que l'être humain soit doté de plusieurs organes de production et de réception d'information, les interfaces humain/machine sous-exploitent ces capacités sensori-motrices. Plusieurs potentialités pour communiquer avec la machine sont négligées, faute d'outils adaptés ou à cause de leurs coûts souvent élevés. Parmi ces outils, nous avons choisi l'oculomètre pour mener des expérimentations dans un environnement naturel qui ne soit pas intrusif et qui ne perturbe pas le comportement de l'apprenant. Les informations générées seront complétées par des données issues des capteurs physiologiques, des mouvements de la souris et de la réponse aux questions de connaissance, afin d'enrichir le diagnostic cognitif et motivationnel de l'apprenant. En s'inspirant du comportement d'un tuteur humain et en effectuant une analyse dans les données enregistrées pour chercher des règles d'associations et des patrons, on va concevoir un système de soutien hautement adapta-

tif prenant en compte une multitude de dimensions liées au comportement de l'apprenant et à ses réactions en situation d'apprentissage. Ce système de soutien sera ensuite évalué auprès d'apprenants.

Cette recherche devra donc 1) permettre de démontrer la pertinence d'utilisation de l'oculomètre et des capteurs physiologiques pour améliorer le dialogue entre humain et ordinateur, et 2) améliorer les capacités d'adaptation d'un tuteur artificiel par la gestion de nouvelles sources d'information pertinente (les données oculométriques et physiologiques).

RÉFÉRENCES

- Agrawal, R., T. Imielinski, & A. Swami (1993), *Mining Association Rules Between Sets of Items in Large Databases*, SIGMOD Conference, p. 207-216.
- Agrawal, R., & R. Srikant (1995), *Mining Sequential Patterns*. Proc. of the 1995 Int. Conf. on Data Engineering, p. 3-14.
- Argyle, M. (1969), *Social Interaction*. London : Methuen
- Baccino, T. (2004), *La lecture électronique*, PUG. Coll. Sciences et Technologies de la connaissance.
- Baccino, T., C. Bellino, & T. Colombi (2005), *Mesure de l'utilisabilité des Interfaces*, Hermès Science Publisher : Paris.
- Barber, P. J., & D. Legge (1976), *Perception and Information*, Methuen, London, chapter 4 : Information Acquisition, p. 54-66.
- Bruce, V., & P. R. Green (1990), *Visual Perception : physiology, psychology and ecology*, 2nd édition, Lawrence Erlbaum Associates Ltd., Hove, UK.
- Brysbaert, M., & F. Vitu (1998), *Word skipping : Implications for theories of eye movement control in reading*. In : Eye guidance in reading and scene perception, pp. 125-47, ed. G. Underwood. Elsevier.
- Bunt A., & C. Conati (2003), *Probabilistic Student Modeling to Improve Exploratory Behaviour*. Journal of User Modeling and User-Adapted Interaction 13 (3), p. 269-309.
- Caelen J. A. (1996), *L'écoute de la parole humaine*, dans La Recherche, n° 285, mars 1996, p. 62-65.
- Carpenter, P.A., & M. A. Just (1983), *What your eyes do while your mind is reading*. In K. Rayner (Ed.), *Eye Movements in Reading : Perceptual and Language Processes*, New York : Academic Press, p. 275-307.

- Charlier J., P. Sourdille, M. Behague & C. Buquet (1992), *Commande par le Regard d'un Système de Visualisation 2D : exemple du Microscope Opérateur*. Actes d'Interface des Mondes Réels et Virtuels, Montpellier, France, p. 659-666. <http://www.useit.com/eyetracking/>
- Collet, C. (1999), *Capture et suivi du regard par un système de vision dans le contexte de la communication homme-machine*. Thèse de doctorat en informatique. École Normale Supérieure de Cachan.
- Collewyn, H. (1999), *Eye movement recording*. In R.H.S. Carpenter & J.G. Robson (Eds.), *Vision Research*, New York : Oxford University Press, p. 245-285.
- Conati C., & K. Vanlehn (2000), *Toward Computer-Based Support of Meta-Cognitive Skills : A Computational Framework to Coach Self-Explanation*. *International Journal of Artificial Intelligence in Education* 11.
- Conati C., & C. Merten (2007), *Eye-Tracking for User Modeling in Exploratory Learning Environments : an Empirical Evaluation*. *Knowledge Based Systems*, Volume 20 , Issue 6 (August 2007), Elsevier Elsevier Science Publishers B. V. Amsterdam, The Netherlands
- Deerwester, S., S.T. Dumais, G.W. Furnas, T.K. Landauer & R. Harshman, (1990), *Indexing by latent semantic analysis*. *Journal of the American Society for Information Science*, 41(6), p. 391-407.
- Dodge, R. (1900), *Visual perception during eye movement*. *Psychological Review* 7, p. 454-465
- Duchowski, A. (2002), *A Breadth-First Survey of Eye Tracking Applications*. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers (BRMIC)*, 34(4)
- Dufresne, A. (1992), *Ergonomie cognitive, Hypermédias et Apprentissage*, dans B. d. LaPassardière, & G. L. Baron (Ed.), *Actes des premières journées scientifiques Hypermédias et Apprentissage*, Chatenay-Malabry, Paris, p. 121-132.
- Dufresne, A. (2003), *Interfaces et intégration des environnements pour le soutien aux activités de téléapprentissage*, dans A. Senteni & A. Taurisson (Eds.), *Pédagogies.net : L'essor des communautés virtuelles d'apprentissage*, Les Presses de l'Université du Québec, p. 139-166.
- Dufresne, A., & G. Paquette (2000), *ExploraGraph : A flexible and adaptive interface to support distance learning*. *Proceedings of the EdMedia'2000*. Montreal : AACE, p. 269-274.
- Dufresne, A., M. Rouatbi, E. Villiot-Leclercq, & F. Guerdelli (2005), *Architecture Intégrée pour l'Accès et le Soutien à l'Utilisation des Ressources pour l'Apprentissage*, dans S. Pierre (Ed.), *Développement, intégration et évaluation des technologies de formation et d'apprentissage*, chapitre 3, Presses Internationales Polytechnique/ Polytechnic International Press, p. 63-88.

- Engbert R., A. Longtin, & R. Kliegl (2004), *Complexity of Eye Movements in Reading*. International Journal of Bifurcation and Chaos in Applied Sciences and Engineering, Vol. 14, N° 2.
- Fayyad U. M., G. Piatetsky-Shapiro, & P. Smyth (1996), *From Data Mining to Knowledge Discovery : An Overview*. Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, p. 1-34.
- Fenn, W.O., & J. B. Hursh, (1934), *Movements of the eye when the lids are closed*, American Journal of Physiology, 118, p. 8-14.
- Firth, J. R. (1957). *A Synopsis of Linguistic Theory, 1930-1955*. In Studies in Linguistic Analysis. Special volume of the Philological Society. Oxford : Basil Blackwell.
- Frederiksen, C. H., J. Donin, & M. Roy (2001), *Human tutoring as a model for computer tutors : Studying human tutoring from a cognitive perspective*. Workshop presented at the 5th International Conference on Intelligent Tutoring Systems, ITS 2000, Montreal, Quebec, Canada.
- Frederiksen C. H., J. Donin (2005)., *Coaching and the Development of Expertise : Designing Computer Coaches to Emulate Human Tutoring in Complex Domains*, in Pierre (Ed.), Innovations et tendances en technologies de formation et d'apprentissage, Montréal, Presses Internationales Polytechnique, 2005, p. 179-219.
- Frey L. A., Preston White Jr. & T. E. Hutchinson (1990), *Eye-Gaze Word Processing*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, vol. 20, n° 4, juillet/août 1990, p. 944-950.
- Garcia, E., C. Romero, S. Ventura & T. Calders (2007), *Drawbacks and solutions of applying association rule in learning management systems*, Proc. Intern. Workshop ADML'07, p. 13-22.
- Han J. & M. Kamber (2001), *Data Mining : Concepts and Techniques*. Morgan Kaufmann.
- Hix, D. & H.R. Hartson (1993), *Developing User Interfaces : Ensuring Usability through Product & Process*, Wiley.
- Hornof A. J., A. Cavender & R. Hoselton (2004), *Eyedraw : A System for Drawing Pictures with Eye Movements*, in : ASSETS 2004" The Sixth International ACM SIGACCESS.
- Howse, M. A. (1998), *Student ecosystems problem solving using computer simulation*. Washington D.C. : Office of Educational Research and Improvement. (ERIC Document Reproduction Service N° ED419679).
- Humphreys, G. W. & V. Bruce (1989), *Visual Cognition : Computational, Experimental, and Neuropsychological Perspectives*, Lawrence Erlbaum Associates Ltd., Hove, UK.

- Istance H., C. Spinner & P. Howarth (1996), *Providing motor-impaired users with access to standard Graphical User Interface (gui) software via eye-based interaction*. Proc. of 1st European Conf. on Disability, Virtual Reality and Associated Technologies, éd. par Sharkey (Paul M.), Maidenhead, UK, p. 109-116.
- Jacob, R. J. K. (1995), *Eye tracking in advanced interface design*, in W. Barfield & T. Furness, eds, 'Advanced Interface Design and Virtual Environments', Oxford University Press, Oxford, p. 258-288.
- Nielsen, J. & K. Pernice (2008), *Eyetracking Web Usability*, Pearson Education (28 June 2008 - Indianapolis, United States) ISBN-13 : 9780321498366 ; ISBN-10 : 0321498364
- Jakob, R. (1998), *The Use of Eye Movements in Human-Computer Interaction Techniques : What You Look at Is What You Get*, in Readings in Intelligent User Interfaces, ed. M.T. Maybury and W. Wahlster, Morgan Kaufmann, San Francisco, p. 65-83.
- Just, M. A., & P. A. Carpenter (1980), *A Theory of Reading, From Eye Fixation to Comprehension*, Psychological Review, p. 329-354.
- Kendon, A. (1967), *Gaze direction insocial interaction*. *Acata Psychologia* 26, p. 1-63.
- Kintsch, W., (1988), *The role of knowledge in discourse comprehension : A construction-integration model*, Psychological Review, p. 163-182.
- Kum, H., J.H. Chang, & W. Wang (2007), *Benchmarking the effectiveness of sequential pattern mining methods*, Data and Knowledge Engineering (DKE), Elsevier, vol. 60, n° 1, p. 30-50.
- Lisetti, C. L., & F. Nasoz (2004), *Using Non-invasive Wearable Computers to Recognize Human Emotions from Physiological Signals*, EURASIP Journal on Applied Signal Processing - Special Issue on Multimedia Human-Computer Interface, vol. 2004, n° 11, 2004, p. 1672-1687.
- Miellet, S. (2004), *Médiation phonologique, Accès lexical et contrôle oculomoteur en lecture*, Thèse de Doctorat en Psychologie, Université Charles-De-Gaulle Lille III, France.
- Monty, R.A., & J. W. Senders (1976), *Eye Movements and Psychological Processes*. Lawrence Erlbaum Associates : Hillsdale, New Jersey.
- Nkambou, R., E. Delozanne & C. Frasson (2008), *Les dimensions émotionnelles de l'interaction dans un EIAH*. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour la Formation (STICEF)*, Vol. 14.
- Nonnon, P., G. Touma, A. Dufresne, F. Guerdelli & M. Rouatbi (2004), *Des environnements informatisés d'apprentissage*. Paper presented at the ACFAS'2004, Montréal, QC.
- Pasquier, N. (2000), *Extraction de bases pour les règles d'association à partir des itemsets fermés fréquents*. In Proceedings of the 18th INFORSID'2000, Lyon, France, p. 56-77.

- Pei, J. & J. Han (2004), *Mining Sequential Patterns by Pattern-Growth : The PrefixSpan Approach*. IEEE Trans. Knowledge and Data Engineering, vol. 16, n° 10, p. 1-17.
- Petri, H. L. (1996), *Motivation : theory, research and applications* (4th ed). Pacific Grove, CA : Brooks/Cole.
- PhET (Physicis Education Technology), Photoelectric Effect Simulator [en ligne]. Disponible à l'adresse : http://phet.colorado.edu/new/simulations/sims.php?sim=Photoelectric_Effect . Dernière consultation le 9 janvier 2009.
- Pritchard, R. M. (1961), *Stabilised image on the retina*, Scientific American, 204, p. 71-78.
- Rayner, K. & A. Pollatsek (1992), *Eye Movements and Scene Perception*, Canadian Journal of Psychology, 46, p. 342-376.
- Rayner, K. & A. Pollatsek (1989), *The psychology of reading*. Prentice Hall.
- Rayner, K. & J. H. Bertera (1979), *Reading without a fovea*. Science, 206, p. 468-469.
- Richmond, V. P. & J. C. Croskey (2004), *Non Verbal Behavior in Interpersonal relations*. Fith Edition., Pearson Education Inc.
- Richoux, B., C. Salvetat & D. Beaufiles (2002), *Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions*, Bulletin de l'Union des Physiciens, n°842, p. 497-522.
- Robinson, D. A. (1963), *A method of measuring eye movement using a scleral searchcoil in a magnetic field*. IEEE Transactions on Bio-Medical Electronics, 10, p. 137-145.
- Salvucci, D. & J. Anderson, (2000), *Intelligent Gaze-Added Interfaces*, in SIGHCI Conference on Human Factors in Computing Systems.
- Schank, R. C. & R. P. Abelson (1977), *Scripts, plans, goals, and understanding*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Sadler, P. M., C. A. Whitney, L. Shore, & F. Deutsch (1999), *Visualization and Representation of Physical Systems : Wavemaker as an Aid to Conceptualizing Wave Phenomena*. Journal of Science Education and Technology, 8, p. 197-209.
- Shah, F., M. Evens, J. Michael & A. Rovick (2002), *Classifying student initiatives and tutor responses in human keyboard-to-keyboard tutoring sessions*. Discourse Processes, 33, p. 23-52.
- Strahm, M. & T. Baccino (2006), *L'impact des schémas non analogiques conceptuels dans la compréhension de textes expositifs : stratégies visuelles selon l'expertise*, Psychologie française, 51(1), p. 25-40.
- Strauss, R.T. & M. B. Kinzie (1994) *Student achievement and attitudes in a pilot study comparing an interactive videodisc simulation to conventional dissection*. The American Biology Teacher 56(7), p. 398-402.

- Stuart, S (2004), *The Turing test : verbal behavior as the hallmark of intelligence*. Cambridge, Mass. : Mit Press.
- VanLehn, K., S. Siler, C. Murray & W. B. Baggett (2003), *Why do only some events cause learning during human tutoring ?* *Cognition and Instruction*, 21, p. 209–249.
- Windschitl, M. (2000), *Supporting the development of science inquiry skills with special classes of software*. *Educational Technology Research & Development*, 48, p. 81–95.
- Windschitl, M. & T. Andre (1998), *Using computer simulations to enhance conceptual change : The roles of constructivist instruction and student epistemological beliefs*. *J. of Research in Science Teaching*, 35(2), p. 145-160.
- Zaki, M. (2000), *Generating non-redundant association rules*, Proc. of International conference on Knowledge Discovery in Databases (KDD).
- Zaki, M. (2001), *SPADE : An Efficient Algorithm for Mining Frequent Sequences*. *Machine Learning Journal*, vol. 42, n° 1-2, p. 31-60.

CHAPITRE 4



Les technologies mobiles pour mieux comprendre l'apprentissage coopératif dans un cours de physique

Mohamed Droui, Université de Montréal
et MATI-Montréal

Odile Martial, MATI-Montréal

Sabine Kébreau, École Polytechnique de Montréal

Samuel Pierre, École Polytechnique de Montréal
et MATI-Montréal

Jesús Vázquez-Abad, Université de Montréal
et MATI-Montréal

RÉSUMÉ

Les technologies mobiles offrent aujourd'hui un grand potentiel pour l'apprentissage ; on parle d'apprentissage mobile ou « M-Learning ». Les expériences menées jusqu'à présent démontrent les avantages qu'apportent ces technologies dans des situations de

formation individuelle à distance, surtout lorsque la motivation et l'importance d'un apprentissage contextuel jouent un rôle central. De plus, les technologies mobiles peuvent favoriser l'acquisition de connaissances et le développement de compétences dans des situations plus académiques et surtout en apprentissage collaboratif. Dans cette présentation, nous explorons l'apport d'une telle technologie, l'ordinateur de poche avec connectivité WiFi dans un cours de physique de niveau postsecondaire impliquant un apprentissage collaboratif à l'aide d'un simulateur de l'effet photoélectrique.

INTRODUCTION

Les connaissances et les compétences qui doivent être maîtrisées par les jeunes lors de leur formation initiale, notamment en sciences, sont de plus en plus nombreuses pour qu'ils puissent faire face à l'évolution des savoirs et des technologies, tant à l'université que dans la vie professionnelle. Dans ce contexte, et selon une approche socioconstructiviste en didactique des sciences, nous menons actuellement une recherche visant à évaluer l'impact de l'utilisation d'un simulateur de l'effet photoélectrique pour favoriser le changement conceptuel dans un cours de physique de niveau postsecondaire. Pour la mise en œuvre de notre scénario pédagogique, nous envisageons de profiter des possibilités offertes aux apprenants par les technologies mobiles, et notamment l'ordinateur de poche (« Pocket-PC » dit aussi « Personal Digital Assistant » ou PDA). Dans l'étape actuelle de la recherche présentée ici, nous explorons en laboratoire - en y reproduisant les conditions d'un cours de physique - et afin d'en préciser les avantages et les limites, les usages de l'ordinateur de poche, tant en ce qui concerne sa manipulation que ses fonctions de communication. Après avoir présenté la problématique et résumé le cadre théorique de cette recherche, nous précisons notre objectif et nos hypothèses avant d'aborder les résultats de cette recherche exploratoire ainsi que ses conclusions actuelles.

1. PROBLÉMATIQUE

Selon une approche constructiviste en didactique des sciences, il est important de partir des conceptions antérieures des apprenants pour les amener à un changement conceptuel, ce qui permet un meilleur ancrage des connaissances scientifiques acquises ou favo-

rise la construction de nouvelles connaissances (Duit, 1991). De plus, plusieurs recherches ont démontré les apports de l'apprentissage collaboratif dans le domaine de l'enseignement des sciences (Dillenbourg, 1999). C'est dans ce contexte que se situe notre recherche, qui vise à évaluer l'impact de l'utilisation d'un simulateur de l'effet photoélectrique pour favoriser le changement conceptuel dans un cours de physique de niveau postsecondaire. Cependant, et depuis plusieurs années déjà, les limites du partage d'un ordinateur personnel (PC) par un groupe d'apprenants menant des activités en face à face, ont été mises en évidence (Myers et coll., 1998 ; Stewart et coll., 1999). En effet, lorsque des apprenants travaillent en équipe sur le même ordinateur, habituellement seule une personne est assise devant la machine, agit au clavier et voit correctement ce qui se passe à l'écran, reléguant les autres à un rôle plus passif. Si, en revanche, chaque étudiant dispose de son ordinateur, c'est alors la communication (visuelle et gestuelle surtout) qui est gênée, ce qui nuit à la collaboration. De fait, Kreijns et coll. (2002) ont montré que les environnements d'apprentissage collaboratif soutenu par ordinateur (« Computer Supported Collaborative Learning » ou CSCL) évalués ne répondent pas aux attentes qu'ils avaient créées chez les pédagogues, notamment comme supports à l'interactivité, à l'apprentissage coordonné du groupe et à la construction sociale de la connaissance. Parallèlement, l'usage des technologies mobiles, téléphones portables, baladeurs numériques et ordinateurs de poche notamment, est sans cesse croissant, en particulier chez les jeunes qui se les approprient au point de les considérer même parfois comme des prolongations d'eux-mêmes (Caron et coll., 2005). Dans ce contexte, il nous paraît tout à fait approprié d'explorer comment l'ordinateur de poche, appelé PDA dans ce chapitre, peut être intégré au processus de changement conceptuel et d'apprentissage collaboratif dans un cours de physique.

2. CADRE THÉORIQUE

Le cadre théorique sur lequel s'appuie cette recherche comporte trois axes : le rôle de la simulation pour l'enseignement et l'apprentissage des sciences ; l'apprentissage collaboratif pour la construction des connaissances, et l'apprentissage mobile pour l'interaction individuelle et naturelle de l'étudiant avec l'ordinateur et le groupe.

2.1. Simulation et enseignement des sciences

En enseignement des sciences, la simulation peut jouer un rôle important en créant des expériences virtuelles, ce qui permet aux étudiants de contrôler les paramètres, d'examiner de nouveaux modèles et d'améliorer leur compréhension intuitive des phénomènes complexes (Alessi et Trollip, 1985). Selon Roth and Roychoudhury (1993), les simulations peuvent activer les compétences procédurales de base des étudiants en science, comme celles d'observer, de mesurer, de communiquer, de classer et de prédire, ainsi que des compétences procédurales spécifiquement intégrées à la démarche scientifique, comme celles de contrôler des variables, de formuler des hypothèses, d'interpréter des données, et d'expérimenter et de formuler des modèles. Selon Windschitl et Andre (1998), les simulations peuvent aussi contribuer au changement conceptuel et une étude de Zietsman et Hewson (1986) a montré que, si l'on tient compte des conceptions alternatives des étudiants, la simulation peut produire un changement conceptuel crucial chez eux. En effet, dans un environnement d'apprentissage constructiviste supporté par une simulation, l'insatisfaction surgit lorsque l'étudiant se trouve confronté à des résultats en conflit avec ses propres prédictions. En demandant aux étudiants de faire et d'expliquer ces prévisions, on peut activer leurs connaissances antérieures et les forcer à élaborer des explications. La prédiction, la manipulation et la vérification font une place importante au « discours interne » dans l'esprit de l'étudiant (Perkins et Simmons, 1988) : en stimulant la vérification de l'hypothèse par l'étudiant, la simulation sur ordinateur permet de mettre en évidence un conflit conceptuel (Osborne et Squires, 1987) entre les hypothèses initiales et les observations (confrontation empirique), source d'insatisfaction intellectuelle. La résolution de ce conflit peut alors mener à la construction de nouvelles connaissances.

2.2. Apprentissage collaboratif

Plusieurs recherches en didactique des sciences, basées sur les travaux de Vygotski (Vygotski, 1978) montrent que cette construction de nouvelles connaissances peut être facilitée par la collaboration entre les pairs (Dillenbourg, 1999 ; Henri et Lundgren-Cayrol, 2001 ; Zurita et Nussbaum, 2004) : le travail collaboratif, en dyade ou en équipe, favorise différents aspects de l'apprentissage, comme la négociation de sens, la confrontation des idées, l'apprentissage et

l'acquisition d'habilités sociales, l'optimisation de la performance dans une tâche complexe, ainsi que l'échange d'idées, de compétences et d'expériences. La collaboration suscite l'engagement de l'apprenant, et le groupe joue alors le rôle de catalyseur (Henri et Lundgren-Cayrol, 2001). Ces auteures présentent trois composantes essentielles à un apprentissage collaboratif : la communication entre les apprenants, l'engagement individuel pour une contribution cognitive et sociale, ainsi que la coordination des activités du groupe. Selon Salomon (1992), l'apprentissage coopératif est une relation entre les étudiants, à l'intérieur d'un groupe, qui nécessite une interdépendance positive, une responsabilité individuelle, des compétences interpersonnelles et une interaction en face à face. Ce type d'apprentissage exige que les interactions à propos des objectifs pédagogiques impliquent une participation authentique. L'apprentissage collaboratif, souvent couplé avec l'utilisation de la technologie éducative, s'emploie davantage aux niveaux collégial et universitaire (Brufee, 1993), mais des applications scolaires dans le cadre des sciences ont aussi été menées (Vázquez-Abad et coll., 2004, 2006). L'apprentissage collaboratif basé sur ordinateur ou « CSCL » offre, en effet, les conditions essentielles pour le succès de l'apprentissage collaboratif : l'interactivité exigée pour réaliser les buts partagés, la possibilité de discussions au sujet des buts, le soutien de l'exécution des résultats pour l'individu et pour le groupe, la coordination des rôles des participants et des règles, ainsi que la synchronisation et le partage des tâches (Zurita et Nussbaum, 2004).

Plusieurs expériences ont mis en évidence les avantages du CSCL et rapportent des effets positifs sur l'apprentissage et l'interaction sociale des pairs sur ordinateur (Gutwin et coll., 1996). Cependant, des chercheurs ont aussi souligné les limites de ces environnements (Curtis et Lawson, 1999 ; Kreijns et coll., 2002 ; Scott et coll., 2000) car l'utilisation d'ordinateurs personnels (PC) peut présenter une contrainte dans le cas où l'environnement CSCL tente de soutenir des activités en face à face (avec contact visuel et langage gestuel) lors des interactions entre étudiants ou entre les étudiants et le professeur, ainsi que pour la coordination du groupe. En effet, dans des situations d'apprentissage collaboratif soutenu par les ordinateurs personnels, deux cas se présentent. Dans le premier cas, chaque apprenant dispose de son propre ordinateur et la collaboration peut alors être importunée par l'espace physique séparant les PC des étudiants ; les échanges verbaux sont moins

naturels et la désignation à l'écran peu aisée. Dans le second cas, un groupe d'apprenants partage le même ordinateur, mais un seul étudiant, assis devant l'ordinateur, peut véritablement interagir avec la technologie. Cet étudiant se trouve à rapporter ce que les autres lui dictent pendant que ceux-ci sont plus passifs ou attendent leur tour pour effectuer la tâche demandée. Nous pouvons ainsi constater que, d'une certaine façon, la technologie constitue une entrave aux interactions sociales (au face à face, notamment) dans la construction des connaissances, et donc un obstacle à une collaboration optimale.

2.3. Apprentissage mobile

L'apprentissage mobile ou m-Learning est un concept relativement récent ayant émergé avec la croissance rapide des dispositifs mobiles, et qui recouvre un ensemble complexe de possibilités offertes par la convergence de nouveaux dispositifs mobiles, des infrastructures sans fil et des applications développées. Selon Winters (2006), l'apprentissage mobile peut être défini selon quatre grandes perspectives différentes, soit 1) un prolongement de l'apprentissage en ligne ou « e-learning » ; 2) un apprentissage qui utilise les dispositifs mobiles, tels que les PDA, les téléphones mobiles, les iPods, les stations des jeux portables, etc. ; 3) un complément et un prolongement de l'enseignement traditionnel ; et 4) un apprentissage focalisé sur la mobilité de l'apprenant plutôt que sur les dispositifs mobiles (O'Malley et coll., 2003). Dans un rapport, produit par Futurlab du National Endowment for Science Technology and the Arts (Nesta), Nasmith et coll. (2005) présentent six grandes catégories d'activités avec des dispositifs mobiles, et basées sur des théories d'apprentissage (théories behavioristes, constructivistes, situées, collaboratives, informelles ou apprentissage à vie). En effet, plusieurs caractéristiques des technologies mobiles ont été identifiées comme des éléments favorables à l'apprentissage : la portabilité des dispositifs, la possibilité de facilitation des interactions sociales, de personnalisation, de sensibilité au contexte, de connectivité, de création d'un lien entre les mondes numériques et physiques (Milrad, 2003). Attewell et Savill-Smith (2003) stipulent aussi que les ordinateurs de poche augmentent la motivation des étudiants et améliorent leurs compétences d'organisation. De plus, ces outils encouragent leur sens des responsabilités, aident à soutenir l'apprentissage collaboratif et agissent comme outils de référence ; ils

permettent également de suivre la trace du progrès des étudiants et aident à leur évaluation. Cependant, ces technologies mobiles présentent des limites, qui sont autant de barrières au développement d'applications pédagogiques : mémoire et capacités de stockage limitées, petite taille des écrans, modalités de saisie contraignantes (stylets, claviers minuscules), fiabilité et vitesse de la connexion variables et limitées (McLean, 2003). De plus, les coûts restent encore peu abordables, et le développement continu de la technologie nuit à sa stabilité.

2.4. Technologies mobiles et apprentissage collaboratif

Les travaux concernant les environnements mobiles d'apprentissage collaboratif, ou « Mobile Computer Supported Collaborative Learnin » (MCSCCL) sont eux aussi récents. Zurita et Nussbaum (2004) ont mis en évidence que l'utilisation de l'ordinateur de poche en classe présentait l'avantage de ne pas créer d'entraves aux interactions sociales (au face à face, notamment) dans la construction des connaissances, offrant un environnement naturel de collaboration. Chaque étudiant, disposant de son propre dispositif, personnel et maniable, a le contrôle physique du matériel (à la différence des étudiants qui attendent leur tour sur un même PC), ce qui favorise son engagement dans les activités et aide à fournir la synchronisation et l'interactivité nécessaires aux apprentissages. Ainsi les dispositifs mobiles offrent-ils des possibilités éducatives que d'autres outils d'apprentissage rendent plus difficilement présentes. Ils permettent à l'enseignant et aux étudiants d'accéder aux contenus éducatifs de n'importe où et en tout temps, et de vivre de nouvelles situations d'apprentissage en différents lieux, et pas seulement à l'école. Selon Luchini et coll. (2002), les ordinateurs portatifs ont aussi un impact positif sur le travail collaboratif en classe : la facilité qu'éprouve un étudiant à faire communiquer simplement son PDA avec celui des autres pour faire circuler (recevoir ou émettre) l'information, a transformé certaines activités typiquement individuelles en opportunités d'apprentissage comportant des discussions constructives en face à face. Les membres du groupe mettent à profit leur propre mobilité et celle de leurs dispositifs pour coordonner leur collaboration, alors qu'ils échangent l'information par l'intermédiaire du réseau sans fil qui les relie (Stanton et Neale, 2002). Ainsi, Jipping et coll. (2001) croient que les ordinateurs de poche peuvent être utilisés avec des méthodes traditionnelles d'enseignement en classe

et qu'ils peuvent également être à la base du développement de nouvelles plateformes pour des méthodes d'enseignement audacieuses et uniques. C'est sur ces travaux que repose notre hypothèse, selon laquelle les technologies mobiles pourraient s'avérer intéressantes à la fois pour favoriser l'intégration des connaissances et pour mieux comprendre le changement conceptuel dans le cadre d'un apprentissage collaboratif en sciences basé sur la simulation. La question n'a jusqu'à présent encore jamais été étudiée sous cet angle.

3. OBJECTIFS

Dans ce cadre, notre recherche vise donc à explorer le potentiel des technologies mobiles pour l'amélioration de l'apprentissage des sciences. Nous cherchons surtout à étudier :

- ◆ l'impact, sur l'apprentissage et le changement conceptuel, d'une situation d'apprentissage basée sur la simulation, la collaboration et les technologies mobiles ;
- ◆ la nature et l'importance de la collaboration, notamment des interactions, entre les étudiants, dans la situation d'apprentissage créée ;
- ◆ le rôle de la technologie (simulateur et ordinateur de poche) dans cette situation d'apprentissage.

En effet, la simulation permet, plus particulièrement, de manipuler des modèles et de construire des représentations, tant graphiques que mentales. Par ailleurs, l'ubiquité des technologies mobiles présente une occasion et un défi pour découvrir une manière de construire et déployer des environnements de support à l'apprentissage. La présente étape de recherche s'inscrit dans le cadre plus large d'une recherche-action visant à mettre en évidence le rôle d'un simulateur de l'effet photoélectrique sur la compréhension du modèle quantique de la lumière, lors d'un apprentissage collaboratif dans un cours de physique de niveau collégial.

L'effet du simulateur dans le processus de changement conceptuel et le protocole d'apprentissage collaboratif ayant déjà été évalués en classe, de façon plus traditionnelle avec des ordinateurs PC, l'objet de la présente étude est maintenant d'explorer en détail l'usage de l'ordinateur de poche avec connectivité WiFi, dans un tel contexte. Plus particulièrement, nous voulons préciser les compor-

tements et les besoins des étudiants. Comment les étudiants se comportent-ils en face de leur PDA ? Ont-ils des difficultés avec l'interface, notamment avec le petit écran et le clavier ? Se le prêtent-ils comme si c'était un game-boy ? Comment synchronisent-ils leurs activités individuelles dans le groupe, notamment si certains vont plus vite que d'autres ? Sont-ils satisfaits du PDA ?

Rappelons que, dans cette recherche, nous prenons comme point de départ les difficultés rencontrées par les étudiants à vraiment comprendre l'effet photoélectrique et le modèle quantique de la lumière (Knight, 2004 ; Steinberg et coll., 2000 ; McKagan et coll., 2007). Compte tenu des caractéristiques des technologies mobiles, nous avons émis l'hypothèse que l'usage d'une simulation par chaque étudiant grâce à un ordinateur de poche (PDA), pourrait favoriser la compréhension conceptuelle du modèle quantique de la lumière par la facilitation de l'apprentissage collaboratif des sciences.

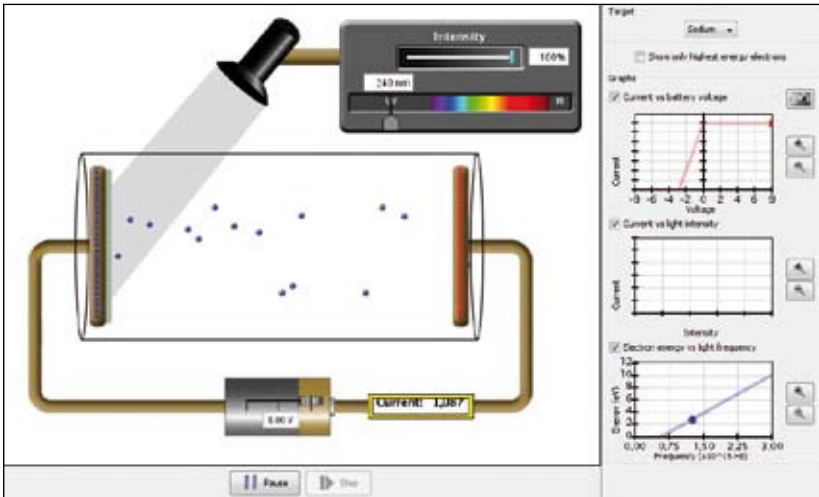
4. MÉTHODOLOGIE

Dans notre recherche, une classe expérimentale sera composée de trois groupes de 9 étudiants chacun, soit 27 étudiants, de niveau collégial, en sciences, dont nous comparerons les résultats (mêmes prétests et post-tests) avec un groupe témoin d'étudiants ayant suivi un cours traditionnel sur l'effet photoélectrique. Afin, d'une part, de préparer cette classe expérimentale en complétant et en validant le scénario d'apprentissage, la plateforme et l'interface du simulateur, et, d'autre part, d'explorer en détail le rôle des technologies mobiles dans l'apprentissage, nous avons mené une étude de cas exploratoire avec un groupe de 8 étudiants (l'activité avait été planifiée pour 9 étudiants, mais un de ceux-ci est tombé malade) de premier cycle universitaire de l'École Polytechnique et de l'Université de Montréal. Cette étude exploratoire constitue la première étape de l'exploration du rôle des technologies mobiles dans l'apprentissage des sciences.

4.1. Description et potentialités d'une simulation de l'effet photoélectrique

Pour expliquer l'effet photoélectrique aux étudiants dans une approche socioconstructiviste, nous avons choisi de leur faire effectuer une expérimentation virtuelle avec la simulation de l'effet photoélectrique *PhET* de l'Université du Colorado à Boulder (PhET, 2007), disponible sur Internet (figure 1).

FIGURE 1
 Simulateur PhET de l'Université du Colorado à Boulder



Cette simulation Phet (figure1), basée sur les travaux de Lenard (1902) pour étudier l'effet photoélectrique, représente un montage formé d'un tube en quartz, vidé d'air afin d'éviter le choc des électrons émis sur des molécules. Un tel montage s'est révélé très efficace pour l'analyse de l'effet photoélectrique. Ce tube contient deux électrodes : une plaque de métal sensible à la lumière, appelée photocathode et une électrode métallique, appelé anode, destinée à collecter les électrons émis. La plaque est éclairée par une lumière monochromatique émise par une source lumineuse dont la puissance (ou l'intensité lumineuse) et la longueur d'onde sont réglables à l'aide des curseurs. Une batterie permet d'appliquer entre la photocathode et l'anode une tension réglable V . Le courant d'intensité I , détecté par l'ampèremètre, ne peut provenir que d'une circulation d'électrons émis par la plaque (effet photoélectrique) et attirés par l'anode. Les courbes correspondant aux variations des paramètres se construisent en temps réel sur l'écran pour l'intensité du courant électrique en fonction de la tension, l'intensité du courant électrique en fonction de l'intensité lumineuse (ou la puissance lumineuse) et l'énergie cinétique des électrons émis en fonction de la fréquence de l'onde lumineuse. Le simulateur nous offre la possibilité de faire l'expérience avec des métaux différents (cuivre, sodium et zinc) et de visualiser le mouvement des électrons entre les deux électrodes, caractéristique qui ne peut être visible lors de l'expérimentation

réelle ; il s'agit d'un aspect particulièrement utile pour aider les étudiants à visualiser l'effet du changement de la tension, de la fréquence ou de l'intensité lumineuse.

Cette représentation visuelle dynamique du phénomène aide les étudiants à surmonter les difficultés conceptuelles en électricité, comme celle de la relation entre la vitesse des électrons et le courant électrique, ou celle de la signification physique du potentiel d'arrêt. La simulation du phénomène de l'effet photoélectrique fournit aux étudiants l'opportunité d'observer une expérience réelle et d'interagir avec elle, ainsi que de construire, en temps réel, les graphes correspondant à la variation des paramètres de l'expérience, ce qui leur permet de comprendre, visuellement, la relation entre les graphes et l'expérience, plus clairement que lorsqu'ils utilisent des images statiques. En effet, des chercheurs (Knight, 2004 ; Steinberg et coll., 2000) ont montré que les étudiants ont des difficultés à comprendre le diagramme du circuit utilisé dans le manuel scolaire pour représenter l'effet photoélectrique. L'expérimentation virtuelle, avec le simulateur PhEt comme matériel didactique, nous paraît un moyen efficace de faire comprendre l'effet photoélectrique à des étudiants, surtout parce que nous ne pouvons pas vraiment réaliser une expérimentation conventionnelle en laboratoire dans ce cas.

4.2. Pré-expérimentation et mise au point du scénario d'apprentissage

Afin de mettre au point le scénario d'apprentissage et les éléments qui l'accompagnent (rappels théoriques, questions du prétest et du post-test, questionnaire, durée et séquence de chaque activité, etc.), une pré-expérimentation a été effectuée avec 17 étudiants dans le cadre du cours « DST1055 » donné au Département de didactique des sciences de l'Université de Montréal. Le scénario d'apprentissage, élaboré selon une approche socioconstructiviste de l'apprentissage, est dans l'ensemble le même que celui de notre étude expérimentale, à la différence que les apprenants disposent d'un ordinateur PC au lieu d'un PDA. Chaque étudiant passe un prétest pour évaluer ses connaissances antérieures, et un post-test à la fin de la séance d'apprentissage. Après de brefs rappels théoriques sur le modèle ondulatoire de la lumière et une description du dispositif expérimental, le professeur remet aux étudiants un document décrivant le protocole expérimental et la mise en situation, et résumant les différentes considérations théoriques et historiques, ainsi qu'un

petit guide d'utilisation de la simulation. Les prédictions et les explications des résultats sont élaborées en collaboration, en équipe de trois étudiants, une par métal (cuivre, zinc ou sodium). L'expérimentation virtuelle, dans laquelle chaque étudiant fait varier individuellement trois paramètres pour obtenir les courbes correspondantes, est effectuée avec la version du simulateur de l'effet photoélectrique *PhET* disponible sur Internet. À la seconde étape, trois nouvelles équipes sont formées avec un étudiant de chacune des trois équipes initiales (un étudiant pour chaque métal) pour une mise en commun et l'élaboration d'un modèle complet du phénomène de l'effet photoélectrique.

Nous avons accordé une attention particulière au document remis, aux questions du prétest et du post-test, à la durée consacrée par chaque étudiant à chacune des activités, aux difficultés rencontrées, aux échanges, etc. Cela nous a montré que la période de trois heures qui avait été prévue était trop courte. Aucune équipe n'a pu rédiger le rapport demandé à la fin de l'activité. Les apprenants ont souligné l'insuffisance du temps mis à leur disposition pour l'activité : « le temps pour réaliser les activités est suffisant pour la manipulation du simulateur, mais la lecture du document demande plus de temps », « les consignes du protocole étaient suffisamment claires mais assez du temps ». Par ailleurs, la comparaison des résultats du prétest et du post-test montre que les apprenants n'ont pas vraiment tiré profit de cette activité, car les scores ne se sont pas significativement améliorés (la valeur moyenne des scores des étudiants passe de 50,42 % au prétest à 61,32 % au post-test, avec un écart-type qui diminue de 4 %). De plus, une analyse plus fine des réponses aux questions a montré que la majorité des étudiants n'avait pas changé sa conception sur la lumière. Nous avons également constaté que, dans les équipes, les 3 étudiants assis l'un à côté de l'autre devant leur PC respectif avaient éprouvé des difficultés à communiquer entre eux et à partager leurs résultats de la simulation pour élaborer une explication, surtout pour les deux étudiants qui se trouvaient aux extrémités. Une analyse des observations de l'activité des apprenants montre un manque remarquable de motivation et d'engagement, tant cognitif que social, des apprenants dans le processus d'apprentissage. Nous avons, par exemple, pu observer que certains étudiants consultaient leur courriel ou surfaient sur Internet plutôt que d'écouter les informations données par le professeur ou de lire les documents qui leur avaient été remis.

Certains discutaient entre eux sur de sujets divers sans rapport avec le cours.

Après cette pré-expérimentation, nous avons été conduits à améliorer le scénario d'apprentissage, notamment en attribuant plus de temps aux activités, en réduisant les informations présentées lors des rappels théoriques, en révisant le nombre et la formulation des questions du prétest et du post-test.

4.3. Scénario d'apprentissage

Les étudiants, recrutés sur la base de leur niveau d'études postsecondaires, sont mis dans une situation d'apprentissage réaliste, analogue à celle qui pourrait être vécue en classe ; il s'agit d'une classe expérimentale. Après passation d'un prétest de connaissances, le scénario d'apprentissage comprend plusieurs étapes :

- ◆ rappels théoriques, description du dispositif (simulateur) et du protocole expérimental par le professeur ;
- ◆ formation de trois équipes (deux équipes de trois étudiants et une équipe de deux étudiants), une par métal (cuivre, sodium et zinc) ;
- ◆ par équipe, détermination des variables jugées pertinentes et prédictions des résultats attendus ;
- ◆ remise à chaque étudiant d'un ordinateur de poche (HP Ipaq avec Windows Mobile 6) sur lequel une version locale, développée spécialement dans le cadre de cette recherche, du simulateur de l'effet photoélectrique *PhET* a été préalablement téléchargée, et avec lequel il fait ses propres expériences (figure 2) ;
- ◆ par équipe, étape de comparaison, de discussion des résultats et de proposition d'une explication et d'un modèle ; les résultats individuels sont transférés des PDA sur un ordinateur portable mis à disposition de l'équipe pour la rédaction d'une première synthèse par métal ;
- ◆ exploitation de la mobilité des apprenants pour la mise en commun finale, qui consiste à la formation de trois nouvelles équipes, chacune composée d'un étudiant ayant fait son expérimentation avec un métal différent (le professeur a fourni les résultats du métal manquant à l'équipe de deux)

pour l'élaboration d'une explication et d'un modèle complet ;

- ◆ passation individuelle d'un post-test de connaissances.

En fin de séance, un questionnaire final ouvert, facultatif, est aussi proposé à chaque étudiant.

4.4. Recueil des données

Dans le contexte de cette classe expérimentale, le recueil de données s'est effectué, non seulement par observations et prise de notes par le professeur-chercheur, ainsi que par les questionnaires remplis par les apprenants, mais aussi par enregistrements vidéo des activités des apprenants, en équipe et individuellement (une caméra numérique par équipe de 3). De plus, nous avons effectué l'enregistrement de toutes les actions et de tous les échanges des étudiants lors des mises en commun et de la rédaction de leurs explications.

FIGURE 2
Simulateur sur IPAQ 210



5. RÉSULTATS

Les résultats de cette étude exploratoire sont présentés selon trois dimensions :

- ◆ changement conceptuel et compréhension de l'effet photo-électrique

- ◆ apprentissage collaboratif/coopératif
- ◆ rôle du simulateur sur ordinateur de poche.

5.1. Changement conceptuel et compréhension de l'effet photoélectrique

Notre premier objectif consistait à évaluer l'impact sur l'apprentissage et le changement conceptuel d'une situation d'apprentissage basée sur la simulation, la collaboration et les technologies mobiles. Pour évaluer l'acquisition de connaissances et la compréhension conceptuelle, nous avons analysé et comparé les résultats aux prétest et post-test de connaissances. Cette comparaison montre une augmentation de la valeur moyenne des scores des étudiants de 41,7 %, le score moyen des étudiants au prétest étant de 16,67 sur 100 alors que la moyenne du post-test est de 58,35 sur 100. Nous constatons également que la médiane a augmenté de 12,50 % au prétest à 58,35 % au post-test. On note aussi une diminution de l'écart-type de 9,6 %, celui-ci passant de 21,37 à 11,78 d'un test à l'autre (tableau 1).

TABLEAU 1

Comparaison des scores (sur 100) au prétest et au post-test Statistiques descriptives

	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Mediane
Prétest	8	,00	66,70	16,6750	21,37721	12,5000
Post-test	8	41,70	75,00	58,3500	11,78849	58,3500
N valide (« listwise »)	8					

Nous avons ensuite effectué le test de Wilcoxon sur les médianes afin de vérifier si les résultats sont dus au hasard. Nous avons alors émis les deux hypothèses suivantes :

H0 : les médianes des scores au prétest et au post-test ne sont pas significativement différentes ;

H1 : les médianes des scores au prétest et au post-test sont significativement différentes.

Les résultats de ce test sur les médianes (tableau 2) montrent que nous pouvons rejeter l'hypothèse H_0 et que les médianes des scores des étudiants au prétest et au post-test sont donc significativement différentes avec un risque d'erreur $p < 0,05$.

TABLEAU 2
**Résultat du test de Wilcoxon pour la comparaison
 des pré-test et post-test**

Post-Test – Prétest	N	Rang moyen	Somme des rangs
Rangs négatifs	0 ^a	,00	,00
Rangs positifs	7 ^b	4,00	28,00
« Ties »	1 ^c		
Totale	8		

Post-Test < Prétest

Post-Test > Prétest

Post-Test = Prétest

Statistiques du test ^b

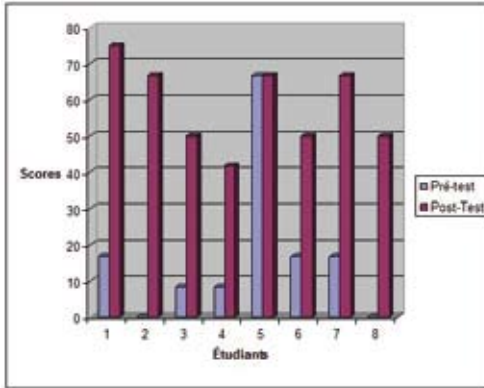
	Post-Post-Test - Prétest
Z	-2,371 ^a
Asymp.Sig	,018

a. Basé sur les rangs négatifs

b. Test signé des rangs de Wilcoxon

Nous nous sommes intéressés aux scores de chaque étudiant individuellement, et la figure 3 représente graphiquement, pour chacun des huit étudiants, le score au prétest (en bleu) et le test au post-test (en mauve). Nous pouvons constater (figure 3) que les scores des étudiants ont tous augmenté, à l'exception de ceux de l'étudiant 5.

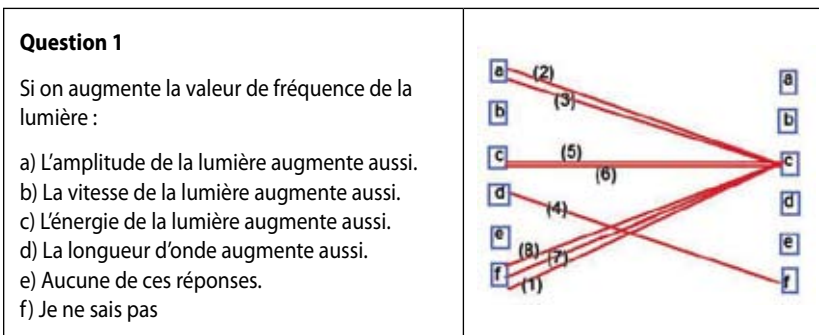
FIGURE 3
Scores au pré-test et au post-test pour chacun des 8 étudiants



Pour illustrer cet aspect de l'apprentissage, nous présentons comme exemple les résultats de deux des douze questions à choix multiple :

La première question (Question 1 - figure 4) porte sur la loi d'Einstein, et comporte quatre réponses possibles représentant les différentes conceptions que peuvent avoir les étudiants sur la relation entre la fréquence de la lumière et son énergie. Nous constatons que les réponses de presque tous les étudiants convergent vers la bonne réponse (c), à l'exception de l'étudiant 4 qui fait une confusion entre la notion de longueur d'onde et celle de fréquence.

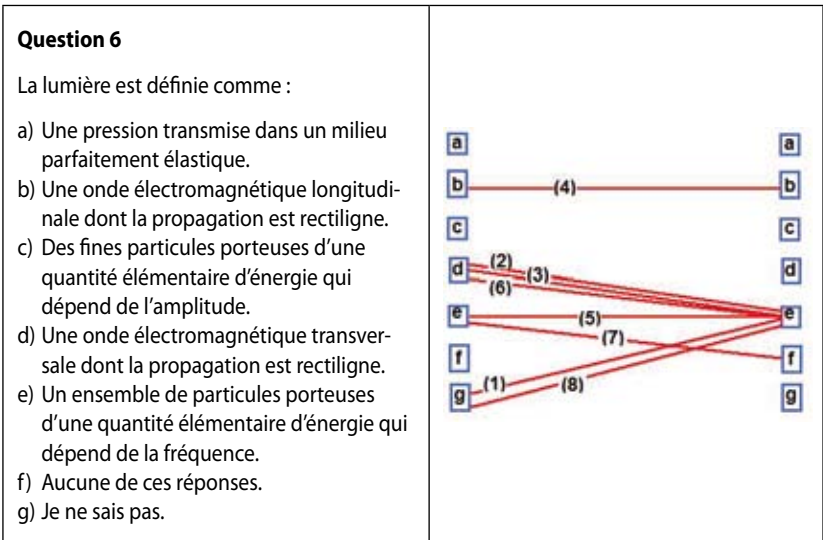
FIGURE 4
Diagramme des réponses des étudiants au prétest et au post-test (Question 1 sur la loi d'Einstein)



La deuxième question (Question 6 - figure 5) porte sur la nature de la lumière et comporte quatre réponses possibles représentant les différentes conceptions que peuvent avoir les étudiants sur la nature de la lumière. Nous remarquons que les réponses de six étudiants convergent vers la bonne réponse (e) Cependant, l'étudiant 4 a gardé sa conception initiale de la lumière, et l'étudiant 7 n'a pas bénéficié de l'activité d'apprentissage.

FIGURE 5

Diagramme des réponses des étudiants au prétest et au post-test (Question 6 sur la définition de la lumière)



Ces résultats nous permettent de constater qu'en majorité, les étudiants ont acquis une meilleure compréhension de l'effet photoélectrique et effectué un véritable changement conceptuel.

5.2. Apprentissage collaboratif/coopératif

Le deuxième objectif de cette recherche exploratoire était d'étudier la nature et l'importance de la collaboration entre les étudiants, notamment de leurs interactions dans la situation d'apprentissage créée. Nous avons donc prêté une attention particulière à ces interactions, et c'est l'analyse des enregistrements

vidéo qui nous renseigne sur la durée et le type des communications entre les étudiants, et que nous avons pris en considération étape par étape. Nous remarquons tout d'abord que l'ensemble de l'activité a duré plus longtemps que prévu : 242 minutes au lieu de 180. Par ailleurs, la durée des interactions entre les étudiants est importante (185 minutes) par rapport à celle de l'ensemble des activités (242 minutes) (tableau 3). Les étudiants ont activement participé à toutes les activités, tant individuelles (simulateur, questionnaires) que collectives (prévisions, mises en commun, explications) et sont restés au-delà du temps prévu pour terminer ce qu'ils avaient à faire.

Nous pouvons constater que les étudiants ont mis le double du temps prévu pour faire leurs prévisions (50 minutes au lieu de 25 minutes), ce qui peut être interprété comme le signe d'un engagement cognitif effectif des étudiants dans le processus d'apprentissage. Pendant cette activité de prédictions, les étudiants ont eu plusieurs fois recours aux documents théoriques remis. Ils ont discuté longtemps au début de l'activité avant de commencer à faire la première prévision, le temps de prise de parole étant relativement équilibré entre les membres de chaque équipe. Cependant nous avons remarqué, dans chaque équipe, un étudiant « leader » qui prenait l'initiative de régler les conflits lors de la discussion et à qui les autres étudiants demandaient souvent de l'aide.

Concernant la simulation sur le PDA, nous avons noté que sa durée effective ne différait pas de celle que nous avons prévue. Elle a été réalisée individuellement avec quelques ruptures pour demander de l'aide sur l'utilisation de l'interface ou, parfois par des désignations, pour expliquer ou échanger un point de vue. Dans chaque équipe, nous avons constaté qu'un des trois étudiants avait tendance à souvent montrer l'écran de son PDA : c'est le cas de l'étudiant 3 pour l'équipe du cuivre, de l'étudiant 6 pour l'équipe du zinc et de l'étudiant 5 pour l'équipe du sodium.

TABLEAU 3
Temps prévu et temps effectif
pour chacune des activités proposées

(En italique : activités demandant des interactions entre étudiants)

Activités	Temps prévu en minutes	Temps effectif en minutes
Pré-test	20	20
Rappel théoriques	15	20
<i>Formation des groupes</i>	5	4
<i>Prédictions</i>	25	50
<i>Simulation sur PDA et Discussion (résolution du conflit)</i>	40	41
<i>Rédaction (rapport préliminaire)</i>	20	47
<i>Changement du groupe</i>	5	3
<i>Mise en commun et Rédaction du rapport final</i>	30	40
Post-test	20	15
Durée totale	180	242

L'activité de rédaction du rapport préliminaire a également pris plus de temps que prévu. Les étudiants de chaque équipe se sont organisés pour le rédiger, un étudiant étant installé devant l'ordinateur portable et chargé de rédiger, pendant que les deux autres étudiants fouillaient dans les documents théoriques, recouraient de temps en temps à la simulation sur PDA et lui dictaient quoi écrire. Nous avons pu observer que le PDA a facilité la coordination entre les étudiants pour effectuer la tâche demandée.

Lors du changement d'équipe pour la mise en commun avec les résultats des trois métaux, nous avons pu noter que l'étudiant responsable de la rédaction dans chacune des trois premières équipes est resté assis à sa place devant l'ordinateur portable, alors que les autres étudiants ont changé d'équipe et de place. Tout se passe comme si un rôle, qui perdure pendant tout le reste de l'activité et même après la formation de nouvelles équipes, était induit par l'usage de l'ordinateur portable lui-même.

Par ailleurs, l'analyse du comportement des étudiants durant ces interactions nous indique qu'ils se sont montrés motivés, participants et impliqués dans l'apprentissage proposé : au total dans les six équipes (les trois de la première phase et les trois de la deuxième), une dynamique différente a pu être observée, avec des discussions plus ou moins animées selon les équipes, mais aucun des étudiants n'est resté complètement passif et à l'écart. Dans les équipes, les communications se déroulent de façon tout à fait naturelle, avec des interactions à la fois verbales, visuelles et gestuelles, comme si la technologie était absente. Dans l'approche socioconstructiviste adoptée, nous soulignons ainsi le rôle des interactions sociales dans l'apprentissage, mais il nous paraît également important de rappeler que l'aspect de construction individuelle et collective des connaissances a été mis en évidence lors de l'analyse des enregistrements vidéo. En effet, les étudiants, tout en discutant, ont fréquemment recours aux documents disponibles ou à la simulation : la construction des connaissances ne se fait pas de façon linéaire pour chacun, ni de façon identique pour les différents étudiants.

5.3. Rôle du simulateur sur ordinateur de poche

Notre troisième objectif consistait à explorer le rôle de la technologie (simulateur et ordinateur de poche) dans la situation d'apprentissage créée. C'est d'une part l'analyse des enregistrements vidéo et, d'autre part, les commentaires des étudiants dans le questionnaire final, qui nous donnent des indications sur le rôle du simulateur sur ordinateur de poche.

Nous pouvons tout d'abord noter que les étudiants sont très attirés par le PDA : au moment de sa remise, ils ont montré une grande curiosité pour découvrir le simulateur sur l'ordinateur de poche, presque tous les étudiants abandonnant leur tâche en cours pour se précipiter sur le PDA afin de l'ouvrir et de l'essayer. Toutefois, nous remarquons que, sur l'ensemble de la séance, le temps passé par chaque étudiant avec le PDA est peu important : 41 minutes auxquelles s'ajoutent quelques recours ponctuels pendant la mise en commun et la rédaction des explications. Nous pouvons aussi noter que tous les étudiants se comportent de la même façon : ils prennent quelques minutes pour se familiariser avec le PDA et l'interface du simulateur et ils utilisent ensuite le PDA pendant toute l'activité de simulation. L'usage du PDA hors

connexion Internet a évité aux étudiants d'être divertis, ce qui a impliqué un plus grand engagement actif de leur part.

La plateforme et la version du simulateur sur PDA utilisées dans cette étude exploratoire étaient encore en développement et non optimisées. Une évaluation ergonomique préalable de l'interface du simulateur avait montré plusieurs problèmes majeurs qui n'avaient pas pu être corrigés avant la tenue de notre étude exploratoire, comme l'impossibilité de rafraîchir l'affichage des courbes, l'absence de graduation sur les axes, etc. (Martial, 2008). Or, seuls deux étudiants ont mentionné la piètre qualité de l'interface et aucun n'en a semblé gêné dans son apprentissage : les étudiants ont passé outre et contourné les difficultés liées à l'affichage, parfois de mauvaise qualité sur le petit écran, au dispositif de pointage et à la navigation sur un PDA.

Dans le questionnaire final, les apprenants ont exprimé leur intérêt pour ce type d'apprentissage et les avantages de la simulation sur PDA : « la simulation m'a aidé à comprendre le sujet ... avoir un PDA pour les simulations m'a permis de faire des hypothèses et de vérifier en pratique. », « La simulation aide à la compréhension... C'est une bonne idée d'utiliser l'ordinateur de poche en plus il y en avait un pour chaque étudiant. » , « J'ai beaucoup appris et assez facilement avec le PDA ». Les étudiants ont fortement apprécié l'utilisation de la simulation pour l'apprentissage de l'effet photoélectrique du fait qu'elle permet de visualiser le phénomène et de manipuler les concepts théoriques. Le côté ludique de l'application a également été souligné.

Comme nous l'avons déjà signalé, au changement de groupe pour la mise en commun finale, les étudiants de chaque équipe qui ont rédigé le premier compte rendu sur l'ordinateur portable, n'ont pas changé de place tandis que les autres membres de l'équipe se sont déplacés pour changer d'équipe, tout en gardant leur PDA à la main. La technologie mobile permet aux étudiants de se déplacer librement dans la classe pour aller rejoindre une autre équipe, tout en apportant avec eux les résultats qu'ils ont obtenus sur un métal donné (cuivre, zinc ou sodium) lors de l'expérimentation virtuelle. Cela leur permet d'explorer l'effet du changement du métal sur les résultats de l'expérience de l'effet photoélectrique.

Il nous apparaît que l'ordinateur de poche a en fait été utilisé comme une calculatrice scientifique, que les étudiants en sciences

sont habitués à utiliser de façon ponctuelle dans un cours, son utilisation étant complètement intégrée aux activités d'apprentissage. Le fait que chacun puisse, au moment où il en a besoin et à sa façon, interagir avec le simulateur, favorise l'engagement cognitif individuel des étudiants. L'usage des PDA a un rôle d'attraction en focalisant l'attention des étudiants.

6. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Avant de conclure, il nous paraît important de souligner les limites et les biais de cette étude exploratoire, et surtout d'évoquer les perspectives qu'elle ouvre, notamment grâce à la plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM.

6.1. Limites et biais de cette étude exploratoire

C'est, d'une part, l'analyse des enregistrements vidéo et, d'autre part, les commentaires des étudiants dans le questionnaire final, qui nous donnent des indications sur le rôle du simulateur sur ordinateur de poche.

Nous sommes conscients que cette étude exploratoire présente des limites, notamment en raison du petit nombre d'étudiants, de leur profil (tous des garçons, étudiants de niveau universitaire et non collégial, habiles avec les technologies), de leur mode de recrutement et des conditions de l'apprentissage ayant pu influencer la motivation et l'engagement des étudiants. Par ailleurs, les étudiants qui forment les équipes ne se connaissent pas et ne sont pas impliqués dans des relations préalables de collaboration ou dans un même programme éducatif, ce qui modifie probablement la nature de leurs interactions. De plus, beaucoup de nos analyses, faites à partir de données, sont qualitatives et mériteraient d'être plus approfondies et complétées par un recueil de données quantitatives. Cette étude exploratoire nous permet cependant de mieux comprendre le processus de l'apprentissage collaboratif des sciences.

Par ailleurs, les trois niveaux d'analyse que nous avons adoptés pour présenter les résultats de cette étude exploratoire (changement conceptuel et compréhension de l'effet photoélectrique, apprentissage collaboratif/coopératif et rôle du simulateur sur ordinateur de poche) sont relativement artificiels, tant il est difficile de les distinguer l'un de l'autre au sein du processus même d'apprentissage.

6.2. Perspectives : la plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM

Les résultats de cette étude exploratoire, sans être définitifs et tout en méritant d'être confirmés, nous laissent présager des développements intéressants.

Tout d'abord, l'expérience est actuellement en train d'être reproduite avec un échantillon plus important d'étudiants, tous de niveau collégial en sciences. Nous disposons maintenant, pour notre analyse, de l'enregistrement vidéo de toutes les activités, individuelles et collaboratives ; du suivi de toutes les actions faites par chaque étudiant avec le simulateur sur son PDA (« logs ») et des traces des mises en commun effectuées sur l'ordinateur portable (grâce au logiciel MORAE). Des entrevues semi-dirigées de tous les étudiants participants seront enregistrées et retranscrites pour des analyses de contenu détaillées. Les résultats des étudiants au prétest et au post-test vont alors être comparés avec ceux d'un groupe témoin recevant un enseignement traditionnel en classe sur l'effet photo-électrique. À cette occasion et à la suite de notre étude exploratoire, l'interface et le fonctionnement du simulateur ont été améliorés, mais surtout nous disposons maintenant d'une véritable plateforme d'apprentissage mobile, à la fois pour les étudiants et pour le professeur. La figure 6 illustre cette plateforme que nous avons nommée MobileSim.

La plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM, qui est accessible par Internet et aussi localement en Wifi, repose sur une architecture complète et permet au professeur (qui dispose d'un code et d'un mot de passe) de :

- ◆ saisir les listes de ses étudiants ;
- ◆ créer des groupes, des laboratoires virtuels et des activités ;
- ◆ attribuer des activités à des groupes d'étudiants en particulier (dans notre cas, celles reliées à chacun des trois métaux, cuivre, sodium et zinc) ;
- ◆ faire le suivi en temps réel de « qui fait quoi » dans sa classe ; d'avoir accès à l'enregistrement de toutes les actions de chacun des étudiants lors de la simulation.

Cette dernière fonction de la plateforme ouvre des perspectives très intéressantes, autant pour la recherche qui consiste à mieux comprendre le processus individuel de l'apprentissage, que pour l'évaluation personnalisée de chaque étudiant. L'étudiant, de son côté, se connecte lui aussi à la plateforme MobileSIM avec un code d'accès personnel qui lui a été attribué par le professeur. Cet accès personnalisé à la plateforme (installée sur l'ordinateur portable du professeur pour une connexion en wifi dans la classe) est possible à la fois à partir de son PDA et de l'ordinateur portable qui est utilisé pour les rapports après mises en commun ; il est aussi possible par Internet, en tout temps, en dehors de la classe. Avec une telle plateforme, divers scénarios d'apprentissage vont pouvoir être élaborés par le professeur, basés sur d'autres simulations, par exemple, et intégrant des activités en classe et hors de la classe. Cela ouvre à la didactique des sciences un important champ d'investigation pour la recherche et l'innovation pédagogique,.

FIGURE 6

Illustration de la plateforme d'apprentissage mobile MobileSIM (écran d'accueil et liste des activités)



CONCLUSION

Après avoir rappelé la problématique de l'utilisation d'une simulation dans des environnements mobiles et ce qu'elle peut apporter à l'apprentissage collaboratif et à la compréhension des phénomènes scientifiques, en particulier l'effet photoélectrique, nous avons présenté brièvement le cadre théorique sur lequel s'appuie notre recherche. Nous avons ensuite décrit la méthodologie adoptée et les résultats notre étude exploratoire. Ils nous ont permis de mettre en évidence, qu'intégrées à un scénario d'apprentissage complet, les technologies mobiles contribuent au changement conceptuel et à la compréhension de l'effet photoélectrique grâce à l'effet combiné de plusieurs éléments :

- ◆ la mise dans une situation de conflit cognitif et d'expérimentation concrète avec détermination préalable de variables et prédictions, puis vérification d'hypothèses et élaboration d'explications ;
- ◆ la visualisation du phénomène sur le simulateur, permettant aux étudiants de faire des liens entre la variation des paramètres et ses effets, avec construction des courbes correspondantes ;
- ◆ l'engagement cognitif de l'individu par l'interaction, à son rythme, avec le simulateur ;
- ◆ l'engagement dans l'activité de collaboration/coopération qui se déroule naturellement et sans l'entrave des technologies ;
- ◆ des communications naturelles entre les apprenants et avec le professeur (verbales, visuelles et gestuelles) et des déplacements dans la classe, facilitant la coordination du groupe ;
- ◆ le recours possible aux ressources disponibles (documents, simulation, etc.) au moment où l'étudiant en a besoin pour construire ses nouvelles connaissances.

Chaque étudiant, ayant son propre ordinateur de poche, a pu l'utiliser à son rythme, comme une calculatrice scientifique, et rester actif pendant toute la durée de l'apprentissage. De plus, nous avons pu noter que l'aspect ludique et la nouveauté de la technologie mobile semblent avoir un effet positif sur la motivation, l'intérêt et l'engagement des étudiants.

Cette étude de cas exploratoire nous a permis également de :

- ◆ décrire certains comportements (ou les catégories de comportements), certaines difficultés et les besoins des étudiants avec le PDA (écran, clavier, navigation, fonctions, fiabilité technique) ;
- ◆ spécifier les améliorations à apporter, tant à l'interface (notamment la version portable du simulateur et les fonctions de communication) et à la plateforme qu'au protocole d'apprentissage collaboratif avec le PDA.

Ainsi, nous pouvons considérer que cette étude exploratoire valide notre hypothèse selon laquelle les technologies mobiles peuvent s'avérer adéquates à la fois pour favoriser la compréhension de l'effet photoélectrique et pour mieux comprendre l'apprentissage collaboratif en sciences basé sur la simulation.

Il convient de souligner que les technologies – pas seulement l'ordinateur de poche, mais aussi la simulation, l'ordinateur portable, l'enregistrement vidéo et les traces sur MORAE, l'enregistrement audio, la retranscription et le traitement automatiques des entrevues – jouent un rôle essentiel, à plusieurs niveaux, tout au long de notre recherche pour :

- ◆ favoriser et mieux comprendre le processus d'apprentissage collaboratif, notamment comme un processus continu, non linéaire, et variable selon les étudiants : recours ponctuels aux documents, à la simulation et aux échanges avec les pairs ; pas de réelle rupture entre les étapes ; rôles dans les groupes selon le profil (l'étudiant qui « montre » son PDA aux autres) et selon l'utilisation des technologies (l'étudiant qui reste assis devant le portable pendant que tous les autres se déplacent avec leur PDA) ;
- ◆ simuler et visualiser les effets de la variation de paramètres ;
- ◆ permettre aux étudiants d'être mobiles et de communiquer naturellement ;
- ◆ nous donner la possibilité d'enregistrer les activités, individuelles et collectives, pour des analyses ultérieures (enregistrement vidéo) ;

- ◆ élaborer de nouvelles modalités d'aide aux étudiants et d'évaluation tenant compte de leurs stratégies individuelles d'utilisation de la simulation (traces automatiques de toutes les actions de chaque étudiant faites sur le simulateur grâce à la plateforme MobileSIM).

Cette recherche nous ouvre aussi des perspectives pour élaborer de nouveaux scénarios d'apprentissage collaboratif/coopératif basés sur la simulation et les technologies mobiles. De plus, tel que l'indique notre étude, qui n'est pourtant qu'exploratoire, les technologies sont en train de révolutionner la recherche en didactique des sciences. En effet, par les différents moyens qu'elles nous offrent pour mieux enregistrer, observer et analyser les activités et interactions des étudiants, il nous est maintenant possible de mieux comprendre les processus complexes, individuels et collectifs, mis en jeu dans l'apprentissage collaboratif/coopératif des sciences, afin de concevoir des scénarios d'apprentissage efficaces et motivants. Parmi ces technologies, certaines retiennent tout particulièrement l'intérêt des chercheurs du domaine, comme le montrent plusieurs chapitres du présent ouvrage ; il s'agit notamment des simulations en sciences (Beaulieu et coll., Raïche et coll., dans cet ouvrage) et de l'enregistrement de l'activité et des cheminements de l'apprenant (Beaulieu *et* coll., Fournier, Mercier et coll., Riopel et coll., dans cet ouvrage). Toutefois, les défis à relever restent importants, notamment celui d'avoir recours aux apprenants dans des contextes réalistes d'apprentissage, c'est-à-dire les classes et les programmes, et de pouvoir y mener des recherches en milieu contrôlé (Potvin et coll., dans cet ouvrage), comme cela peut être le cas dans une classe expérimentale.

BIBLIOGRAPHIE

- Alessi, S. M. & S. R. Trolip (1985), *Computer-Based Instruction : Methods and Development*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall, Inc.
- Astolfi, J. -P. (1997), « Mots-clés de la didactique des sciences », dans *Repères*, définitions, bibliographies, Bruxelles, De Boeck, p. 61-65.
- Attewell, J., & C. Savill-Smith (2003), *Mobile Learning and Social Inclusion : Focusing on Learners and Learning*. Retrieved 30, August 2007 from : <http://www.lsd.a.org.uk/files/pdf/1440.pdf>

- Beaulieu, M., O. Martial, C. Carignan, J. Vázquez-Abad, (« Protocoles socioconstructivistes et simulateurs en astronomie : rôle sur l'apprentissage, le développement des compétences et la motivation », dans cet ouvrage.
- Brufee, K. A. (1993), *Collaborative Learning : Higher Education, Interdependence and the Authority of Knowledge*. Baltimore, MD : The Johns Hopkins University Press.
- Caron A.H. & L. Caronia (2005), *Culture mobile – Les nouvelles pratiques de communication*, Presses de l'Université de Montréal, Collection Paramètres.
- Curtis, D., & M. Lawson (1999), *Collaborative on line learning : an exploratory case study*. HERDSA Annual International Conference, Retrieved July 15, 2007 from : <http://www.herdsa.org.au/branches/vic/Cornerstones/pdf/Curtis2.PDF>
- Dillenbourg, P. (1999), *Collaborative learning : cognitive and computational approaches*. In Dillenbourg, P. (Ed.). Pergamon, Elsevier Science.
- Duit, R. (1991), « Students' conceptual frameworks : Consequences for learning science ». In S. M. Glynn, R. H. Yeany, and B. K. Britton (Eds.), *The Psychology of Learning Science*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Fournier, F.,() « Atouts et limites des TIC dans le cadre de la recherche en enseignement des sciences et technologie », dans cet ouvrage.
- Gutwin, C., M. Roseman & S. Greenberg (1996), « A usability study of awareness widgets in a shared workspace groupware system », In Proceedings of ACM CSCW'96. Conference on Supported Cooperative Work. Boston, MA, ACM Press.
- Henri, F., K. Lundgren-Cayrol (2001), *Apprentissage collaboratif à distance : pour comprendre et concevoir les environnements d'apprentissage virtuels*. Sainte-Foy (Québec, Canada) : Presses de l'Université du Québec, 181 p.
- Jipping, M., S. Dieter, J. Krikke & S. Sandro, (2001), « Using handheld computers in the classroom : laboratories and collaboration on handheld machines ». In *Proceedings of the 2001 SIGCSE Technical Symposium*, SIGCSE Technical Bulletin. 33, 1 Charlotte, North Carolina, United States, p. 169–173.
- Knight, R. (2004), *Five Easy Lessons : Strategies for Successful Physics Teaching*. Addison Wesley.
- Kreijns, K., P. Kirschner & W. Jochems (2002), *The sociability of computer-supported collaborative learning environments*. Educational Technology & Society, 5(1).
- Lenard, P. (1902), « Uber die lischtelektrische wirkung » , in *Annalen der Physik*, vol. 4, p. 149

- Luchini, K., C. Quintana, J. Krajcik, C. Farah, N. Nandihalli, K. Reese, A. Wiecek & E. Soloway, (2002), « Scaffolding in the small : designing educational supports for concept mapping on handheld computers ». In *Human Factors in Computing Systems : CHI 2002 Extended Abstracts*, Minneapolis, MN. ACM Press.
- Martial, O. (2008), *Une mauvaise interface pour un bon apprentissage ?* dans Actes de la conférence Intraaction Humain-Machine, IHM, 2 au 5 septembre 2008, Metz, France, à paraître.
- McKagan, S. B., W. Handley, K. K. Perkins et C. E. A. Wieman (2007), *Research-Based Curriculum for Teaching the Photoelectric Effect*, submitted to American Journal of Physics.
- McLean, N. (2003), *The M-learning Paradigm : an Overview*. Retrieved 30, Aout 2007 from : <http://www.oucs.ox.ac.uk/lgt/reports/mlearning.doc>
- Mercier, J., M. Brodeur, L. Laplante, C. Girard , « L'apport d'une infrastructure informatique dans l'analyse de trace cognitive », dans *cet ouvrage*.
- Milrad, M. (2004), *Mobile Learning : Challenges, Perspectives and Reality*. Retrieved 30, August 2007 from : http://21st.century.phil-inst.hu/vol2_milrad.pdf
- Myers, B. A., H. Stiel & R. Gargiulo, (1998), « Collaboration using multiple PDAs connected to a PC ». In *Proceedings of CSCW 98*, New York, NY : ACM p. 285–294.
- Naismith, L., P. Lonsdale, G. Vavoula, and M. Sharples (2005), *Literature Review in Mobile Technologies and Learning*. Retrieved 30, August, 2007 from : http://www.futurelab.org.uk/resources/documents/lit_reviews/Mobile_Review.pdf
- O'Malley, C., G. Vavoula, J. Glew, J. Taylor, M. Sharples & P. Lefrere (2003), *Guidelines for learning/teaching/tutoring in a mobile environment. Mobilelearn project deliverable*. Available from <http://www.mobilelearn.org/download/results/guidelines.pdf>, last accessed 27th August 2007.
- Osborne, J. & D. Squires, (1987), « Learning science through experiential software ». In J. Novak (Ed.), *Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics*, Vol. 1, Ithaca, NY : Cornell University, p. 373–380.
- Perkins, D.N. & R. Simmons (1988), *Patterns of misunderstanding : An integrative model for science, math, and programming*. *Review of Educational Research*, 58, p. 303–326.
- PhET (Physics Education Technology) (2007) *Photoelectric Effect Simulator*. Disponible à l'adresse : http://phet.colorado.edu/new/simulations/sims.php?sim=Photoelectric_Effect (Consulté le 28 novembre 2007).

- Potvin, P., M. Riopel et P. Charland « Apprentissage scientifique en milieu contrôlé : le LabUQAM », *dans cet ouvrage*.
- Raïche, G., J.-G. Blais., M. Riopel, et D. Magis, (). « L'utilisation des simulations informatisées pour la recherche en éducation », *dans cet ouvrage*.
- Riopel, M., P. Potvin, , F. Boucher-Genesse, V. Djédjé et G. Raïche « Suivi informatique des cheminements pour la recherche en éducation scientifique », *dans cet ouvrage*
- Roth, W. M. et A. Roychoudhury (1993), *The development of science process skill in authentic context*. Journal of Research in Science Teaching, 30, p. 127-152.
- Salomon, G. (1992), *What does the design of effective CSCL require and how do we study its effects ?* SIGCUE outlook, Special Issue on CSCL(ACM Press) 21(3), p. 62-68.
- Scott, S.D., G. B. D. Shoemaker & K. M. Inkpen, (2000), « Towards seamless support of natural collaborative interactions ». In Proceedings of Graphics Interface (). May, Montreal, Canada, p. 103–110.
- Stanton, D. and H. Neale (2002), *Designing mobile technologies to support collaboration*. (Technical Report Equator-02-028). Equator, Available at : <http://www.equator.ac.uk/papers/Abstracts>.
- Stewart, J., B. B. Bederson & A. Druin, (1999), *Single display groupware : a model for co-present collaboration*. Proceedings of CHI 99, New York, NY : ACM. p. 286–293
- Vázquez-Abad, J., N. Brousseau, G. Waldegg, M. Vézina, A. Martínez, J. Verjovski, (2004), *Fostering distributed science learning through collaborative technologies*. Journal of Science Education and Technology 13(2), p. 227-232.
- Vázquez-Abad, J., R. Chouinard, J. Rahm, M. Vézina, & N. Roy (2006), *Effects of an approach to distributed, ICT-mediated collaborative learning on high-school students' motivation and attitudes towards science*. Congrès annuel de la National Association for Research in Science Teaching, San Francisco.
- Vygotski, L.S. (1978), *Mind in Society : the Development of Psychological Processes*, Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Windschitl, M. & T. Andre,(1998), *Using computer simulations to enhance conceptual change : The roles of constructivist instruction and student epistemological beliefs*. Journal of Research in Science Teaching, 35(2), p. 145-160.
- Winters, N. (2006), *What is mobile learning ? In Big Issues in Mobile Learning. Report of a workshop by the Kaleidoscope Network of Excellence. Mobile Learning Initiative*. Edited by Mike Sharples. University of Nottingham.

Zietsman, A. I., and P. W. Hewson (1986), *Effects of instruction using microcomputer simulations and conceptual change learning strategies in science learning*, Journal of Research in Science Teaching, v. 23, p. 27-39.

Zurita, G. and M. Nussbaum, (2004), *Computer supported collaborative learning using wirelessly interconnected handheld computers*, Computers and Education, 42, p. 289-314.

CHAPITRE 5



Protocoles socioconstructivistes et simulateurs en astronomie : rôle sur l'apprentissage, le développement des compétences et la motivation

Martin Beaulieu, Université de Montréal

Odile Martial, MATI-Montréal

Claude Carignan, Université de Montréal

Jesús Vázquez-Abad, Université de Montréal
et MATI-Montréal

RÉSUMÉ

L'utilisation de simulateurs en éducation, notamment pour l'apprentissage des sciences, date de plusieurs décennies. Or, les études menées sur l'impact de cette technologie considèrent rarement le fait qu'un simulateur, ou un « laboratoire (virtuel) dédié » requiert

un ensemble de directives à suivre pour l'utilisateur voire un protocole analogue à ceux des laboratoires classiques. Dans cette présentation, nous explorons l'apport de la technologie de traçage dans le développement d'activités socioconstructivistes combinées à des simulateurs pour l'amélioration de l'apprentissage en astronomie chez les futurs enseignants de science et technologie au secondaire.

INTRODUCTION

La formation des enseignants de niveau secondaire en science et technologie vise le développement de compétences professionnelles et disciplinaires. Ainsi, non seulement les futurs enseignants doivent développer des savoir-faire en didactique et en pédagogie, mais ils doivent également parfaire leurs connaissances dans les différents domaines de la science. Cette recherche vise à déterminer des règles de design pédagogique d'activités d'apprentissage socioconstructivistes, utilisant la simulation en astrophysique. Ainsi, en suivant la méthode de développement de Van der Maren (2003), nous relatons, dans ce chapitre, une expérience de conception et de mise à l'essai d'activités d'apprentissage en astronomie dans le cadre d'un cours de didactique à l'Université de Montréal. Le sujet de l'expérience porte principalement sur l'analyse du processus d'élaboration des connaissances, des échanges et, par le fait même, de la motivation chez les étudiants lors des activités. Deux cohortes d'étudiants ont mis à l'essai les nouvelles activités. La collecte d'information au moyen d'entrevues et d'enregistrements permet aussi de revoir certains principes de conception. En particulier, grâce à la technologie de traçage de MORAE, nous avons pu observer le processus d'acquisition et d'intégration des connaissances sous ses différentes facettes et non seulement par le discours des étudiants. Cela nous permet de découvrir ou de revoir quelques principes de design dont il faut tenir compte dans la création d'activités socioconstructivistes faisant intervenir la simulation.

Après avoir fait état du contexte et de la problématique de la recherche, nous évoquerons le cadre théorique ayant mené à l'élaboration de la séquence didactique. Il sera question aussi de la méthodologie employée dans la conception des activités et dans les mises à l'essai. Les résultats obtenus suivront. Mentionnons qu'à ce stade du développement de l'objet pédagogique, ces résultats restent préliminaires et suggèrent tout au plus des pistes à suivre dans le perfectionnement des activités utilisant les simulateurs et

l'émergence de principes de design inhérents à ce type d'activités. Toutefois, d'ores et déjà, nous verrons plus en détail dans les prochaines lignes comment la démarche employée mais aussi la technologie peuvent venir en aide pour la conception d'activités dites socioconstructivistes utilisant la simulation et l'étude du processus de construction des connaissances.

1. CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE DE DÉVELOPPEMENT

Dans le cadre de la réforme de l'enseignement au Québec (ministère de l'Éducation, 2004, ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007), on a vu apparaître récemment, dans les nouveaux programmes de sciences et technologie au secondaire, des concepts portant sur l'astronomie. Il semble cependant que peu d'étudiants en formation des maîtres aient accès à une formation substantielle en astronomie. À l'Université de Montréal, par exemple, seuls les étudiants ayant opté pour un cours complémentaire d'introduction à l'astronomie possèdent dans leur bagage des connaissances de base en astronomie et en astrophysique. Ainsi, certains concepts d'astronomie ont dû être introduits dans l'un des cours obligatoires de didactique. Pour ce faire, les concepteurs du cours ont eu recours à des simulateurs de télescopes et radiosopes leur permettant de reproduire certaines expériences classiques, comme déterminer des vitesses de rotation, des distances astronomiques de certains corps célestes, etc. Les résultats peu convaincants obtenus avec les premières cohortes d'étudiants ont nécessité la révision de la démarche utilisée. Il s'est avéré que la rétention des connaissances attendues en astronomie ne s'est que très peu manifestée grâce aux activités d'apprentissage ayant utilisé des protocoles de laboratoire classiques, associés aux simulateurs. L'approche utilisée devait donc être revue et une analyse des besoins a souligné qu'il fallait s'inspirer de modèles existants et donc privilégier des activités de nature socioconstructiviste pouvant favoriser l'ancrage des connaissances. Ces activités d'apprentissage en astronomie ont été désignées sous l'appellation de *laboratoires virtuels*.

1.1. Le laboratoire virtuel

L'astrophysique est une science expérimentale peu accessible si l'on considère les énormes moyens dont elle a besoin. Cette science évolue, et les phénomènes à observer sont de plus en plus loin et

requièrent l'utilisation d'instruments d'observation de plus en plus performants. Les immenses télescopes, dont le pouvoir collecteur est suffisant, sont difficiles d'accès pour les spécialistes et donc quasi inaccessibles pour les profanes. Heureusement, il existe des moyens de remédier à ce problème. Dans le domaine, la simulation se développe rapidement et permet maintenant de vivre une expérience d'observation cosmique avec seulement l'aide d'un ordinateur. Non seulement il permet de recréer de puissants télescopes, mais sa puissance de calculs, facilite aussi le traitement de données, et donc, l'acquisition de connaissances en astrophysique et le développement de certaines compétences jusque-là réservées à quelques initiés.

Il est donc maintenant possible de simuler l'observation rigoureuse de phénomènes astronomiques dans un simple objectif d'enseignement et d'apprentissage. Il existe plusieurs logiciels qui permettent l'observation virtuelle du ciel. Le choix de l'un d'eux repose sur différents critères tels le prix, les possibilités d'observation, d'analyse, etc. Le projet CLEA, par exemple, propose une quinzaine de simulateurs tout à fait gratuits qui utilisent d'énormes télescopes pour l'observation de phénomènes très variés tels le calcul de l'expansion de l'univers, la détermination de la vitesse de translation des lunes de Jupiter, le calcul de la vitesse de rotation du Soleil, la détection de pulsars, etc.

Les cours universitaires de didactique des sciences et technologies au secondaire ont pour objectif d'aider les futurs enseignants à s'approprier les concepts de didactique et de pédagogie. Ils doivent permettre aussi de développer des compétences disciplinaires et professionnelles visant à créer, conduire et évaluer des situations d'apprentissage, élément central de l'approche par compétences, préconisée par les programmes officiels, qui reposent sur le constructivisme (ministère de l'Éducation du Québec, 2001).

Le cours de didactique *Projets intégrés en sciences et technologies* (DST2010) offert à l'Université de Montréal, par exemple, vise à initier les enseignants en formation à l'apprentissage de notions scientifiques de niveau universitaire par une approche de projets collaboratifs. L'un de ces projets collaboratifs porte le nom de *laboratoires virtuels*. Les étudiants, en équipe de trois ou quatre, consacrent neuf heures à l'exploration virtuelle de phénomènes astrophysiques au moyen d'un ensemble de simulateurs. Il s'agit de six simulateurs représentant fidèlement d'immenses télescopes optiques, radios ou infrarouges, qui permettent la saisie et l'analyse

de mesures devant mener à la résolution d'un problème en astrophysique. Chacun de ces simulateurs est accompagné d'un manuel de l'étudiant proposant une démarche de résolution de problème de type pas à pas qui doit conduire à la compréhension d'un phénomène astrophysique.

Après trois cohortes d'étudiants, le bilan du projet sur les laboratoires virtuels en astronomie ne semblait pas répondre tout à fait aux objectifs du cours quant au développement de compétences professionnelles, à la collaboration et aussi à l'intégration des nouvelles connaissances : incompréhension des concepts d'astronomie, approche jugée trop traditionnelle, faible motivation des étudiants, faible collaboration, manque de rétention des nouvelles connaissances, etc. Toutefois, les étudiants semblaient apprécier l'utilisation des simulateurs malgré les difficultés rencontrées.

Nous avons donc cru bon de conserver l'utilisation des simulateurs de télescopes et radiosopes, mais de revoir les activités de simulation en misant sur une approche plus constructiviste. Ce choix, qui a fait l'objet d'une réflexion approfondie, nous a conduits, tout compte fait, à opter pour une approche basée sur les programmes d'études que les étudiants devront mettre en œuvre dans la pratique de leur enseignement. Ces programmes, qui visent le développement de compétences et l'intégration des connaissances, reposent sur l'utilisation de situations d'apprentissage et d'évaluation complexes. Les nouvelles activités d'apprentissage élaborées à partir des anciens protocoles expérimentaux classiques, prennent la forme d'une situation d'apprentissage devant forcer l'utilisation et la mobilisation d'un ensemble de ressources dans le but de réaliser une production. Le simulateur s'avère la ressource principale nécessaire à la confection d'une capsule audio de vulgarisation. Nous en décrirons les aspects plus loin.

1.2. Les simulateurs

Les simulateurs retenus pour le projet ont été développés par le projet CLEA¹ (*Contemporary Laboratory Experiences in Astronomy*) du Collège Gettysburg, en Pennsylvanie. Chacun des

1. Le projet CLEA développe des exercices de laboratoire virtuels qui illustrent bien les techniques d'astronomie modernes. On peut y accéder à l'adresse suivante : <http://www3.gettysburg.edu/~marschal/clea/CLEAhome.html>

simulateurs est conçu dans un but pédagogique et est accompagné d'un manuel de l'étudiant (ou protocole expérimental) que nous avons traduit et qui propose une démarche classique de laboratoire du type pas à pas. Il existe plusieurs types de simulateurs. Les simulateurs créés par le CLEA sont de type simulation physique situationnelle (Roblyer & Schwier, 2003) puisqu'ils favorisent la manipulation d'objets et proposent des stratégies de résolution de problèmes. Les bénéfices incontestables résident en un certain nombre de points tels qu'Allessi & Trollip (1991) les ont énumérés :

- 1) rendre possible l'impossible. Les étudiants ne peuvent tout simplement pas avoir accès à l'outil d'investigation (radio-télescopes de grande taille) ;
- 2) économiser de l'argent et des ressources ;
- 3) répéter à l'infini une situation en changeant à chaque fois les paramètres ;
- 4) contrôler le degré de complexité de la situation.

Les simulateurs utilisés dans le cadre de cette recherche permettent plus spécifiquement de choisir et d'observer des objets célestes par la manipulation du télescope de manière très réaliste (entrée des coordonnées, demande de temps d'utilisation, réglage de la vitesse d'acquisition des ondes radio ou lumineuses, présence de bruit, apparition de satellites, etc.) La figure 1 montre l'écran principal du simulateur. Après ouverture du dôme, on aperçoit la partie du ciel correspondant aux coordonnées d'ascension droite et de déclinaison choisies. L'utilisateur sélectionne ensuite l'objet céleste et oriente le télescope sur ce dernier pour observation. Comme nous l'avons déjà dit, nous avons choisi les simulateurs du CLEA parce qu'ils ont été faits dans une optique de formation. À la différence de nombreux simulateurs, ils sont équipés d'appareils de mesure permettant d'enregistrer le signal de sources électromagnétiques, de traiter les données sous forme de graphiques, de tableaux, etc. La figure 2 montre une lecture du spectre lumineux de l'objet céleste choisi en indiquant l'intensité lumineuse relative de chacune des longueurs d'onde. Une ligne rouge permet de déterminer avec précision la longueur d'onde d'un creux. Toutefois, comme tous les simulateurs, ils présentent assez rapidement des limites. La plus sérieuse s'avère la quantité d'objets observables. Les objets célestes sont à l'infini, et c'est une absence de limites avec laquelle il faut

composer. Les objets observables dans les simulateurs ne représentent évidemment qu'une infime partie du ciel.

FIGURE 1
Simulateur réaliste d'un télescope optique
 « Hubble Redshift »

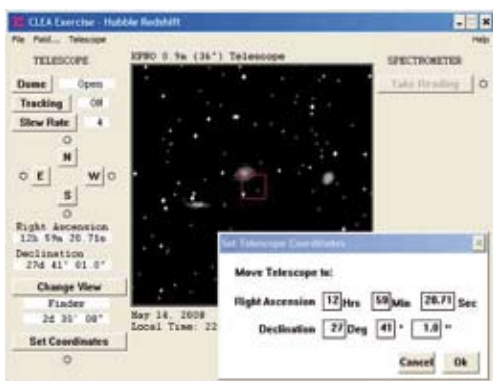
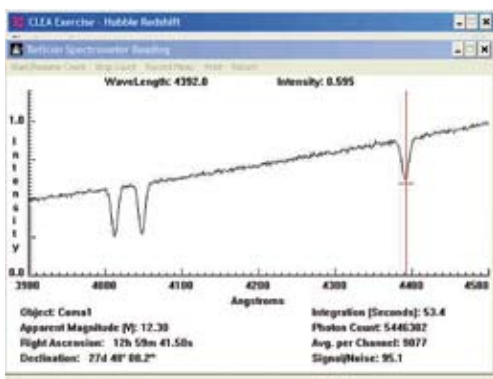


FIGURE 2
Traitement dans le simulateur, des données obtenues
 par le télescope



2. CADRE THÉORIQUE

La conception d'activités intégrant la simulation dans le contexte résumé précédemment, doit reposer sur de solides assises. Nous verrons comment l'analyse des nouveaux programmes de formation au secondaire, le modèle SCI de Jonnaert et Vander Borghet ainsi que le modèle de recherche de développement de Van

der Maren nous permettent de jeter les bases de l'élaboration de l'objet pédagogique.

2.1. Les nouveaux programmes

Au début du siècle sont apparus graduellement au Québec, comme dans de nombreux autres pays, les nouveaux programmes d'apprentissage (ministère de l'Éducation, 2004, ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport, 2007) dans ce qui sera appelé la réforme de l'enseignement et, plus tard, le renouveau pédagogique. D'abord au primaire et ensuite au secondaire, les nouveaux programmes s'inscrivent dans un paradigme socioconstructiviste. Ils visent à développer chez les élèves des connaissances, certes, mais surtout des compétences. Ces compétences sont définies comme *un savoir-agir complexe prenant appui sur la mobilisation et la combinaison efficaces d'une variété de ressources internes et externes à l'intérieur d'une famille de situations* (Tardif, 2006, p. 22). On y trouve donc, pour chacune des dix-neuf disciplines du secondaire, des compétences disciplinaires et transversales, ainsi que des concepts prescrits devant être contextualisés par des domaines généraux de formation (DGF). Il existe de multiples relations entre tous ces concepts. On peut trouver dans Gerbé, Raynauld et Beaulieu (2006) une modélisation poussée des nouveaux programmes et de la situation d'apprentissage.

Comme nous l'avons dit, les étudiants en didactique des sciences et technologies doivent aussi développer des compétences (ministère de l'Éducation du Québec, 2001). Il s'agit toutefois de compétences professionnelles. Par exemple, la première compétence réfère à l'objet de savoir et stipule que l'enseignant agit en tant que professionnel héritier, critique et interprète d'objets de savoir ou de culture (ministère de l'Éducation du Québec, 2001, p. 61). Il doit également maîtriser les compétences disciplinaires qu'il verra à développer chez ses élèves. On retrouve trois compétences disciplinaires dans le nouveau programme de formation en sciences et technologies : i. chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique ; ii. mettre à profit ses connaissances scientifiques et technologiques ; et iii. communiquer à l'aide des langages utilisés en science et technologie. Ces compétences, par leur généralité, peuvent être développées dans tous les ordres d'enseignement, primaire, secondaire et même universitaire. Outre la compétence liée à l'objet du savoir, les futurs enseignants

doivent aussi, entre autres, développer des compétences professionnelles leur permettant de créer, de conduire et d'évaluer des situations d'apprentissage.

Ainsi, le développement de compétences, qu'elles soient disciplinaires ou professionnelles, passe nécessairement par la mise en œuvre de séquences d'activités qui, élevées au rang de système, mobilisent des savoirs dans le but de réaliser une production (M. Beaulieu, J. Raynauld, et O. Gerbé, 2007). Le nouveau programme fait donc apparaître un nouvel objet complexe appelé « *Situation d'apprentissage et d'évaluation* » (SAÉ). La SAÉ se résume en ce sens : « La personne compétente fait appel à des ressources et les mobilise en contexte d'action. Ces ressources peuvent être des savoirs, des savoir-faire, des attitudes et aussi d'autres compétences plus particulières utilisées dans un contexte d'action donné. » (Rochon, 2005, p.11). Bien qu'il existe dans la littérature plusieurs expressions faisant plus ou moins référence à ce concept, le Ministère a retenu le terme de situations d'apprentissage et d'évaluation et précise certains paramètres devant en guider ou en baliser le choix et la composition (Bureau d'approbation du matériel didactique, 2004).

2.2. Le socioconstructivisme

Ainsi, les nouveaux programmes de formation tant au secondaire qu'à l'université reposent sur la formation par compétence. La compétence, qui mobilise un ensemble de ressources diverses ne peut être transmise, mais s'échafaude peu à peu, elle se construit à travers un ensemble d'activités d'enseignement et d'apprentissage qui, le plus souvent, sont partagées.

Piaget a été le premier à mettre l'interaction du sujet avec son environnement au centre de son modèle du développement et de l'apprentissage. Ses recherches l'ont amené à distinguer des stades successifs et irréversibles dans le développement de la pensée. Il insiste donc sur une conception de l'enseignement qui se résume essentiellement, non pas à transmettre des connaissances, mais à faciliter le processus de leur construction par le biais de l'interaction avec le milieu.

Le constructivisme est un paradigme épistémologique de la connaissance qui fait consensus sur le fait que l'élève ou le sujet *construit* ses propres connaissances. Le sujet agit sur l'environne-

ment et réagit aux stimuli de l'environnement. Le développement des connaissances s'opérationnalise donc par l'équilibre réalisé entre l'assimilation de l'information et l'accommodation (Johsua & Dupin, 2003). La connaissance ainsi construite n'a pas de sens en dehors du sujet et est donc issue de sa propre expérience. Par opposition à une réalité ontologique, indépendante et extérieure au sujet, ce sont les expériences vécues dans l'environnement et les interactions avec les autres (socioconstructivisme) qui créent la connaissance au moyen de conflits.

Le socioconstructivisme, quant à lui, met l'accent sur la dimension relationnelle de l'apprentissage. L'élève construirait donc ses apprentissages non seulement en interaction avec l'environnement, mais aussi au contact des autres. Roegiers et Ketele (2000) dressent les principales conclusions de Doise, Clemence et Lorenzi-Cioldi (1992) sur les effets structurants du conflit sociocognitif :

- 1) Dans de bonnes conditions, l'interaction sociale permet à des élèves d'un niveau donné de résoudre certaines tâches qu'ils ne pourraient effectuer seuls ;
- 2) Confrontés une nouvelle fois à ces tâches, mais seuls, ils parviennent à les exécuter ;
- 3) Les nouveaux schèmes générés à partir de ces tâches sont stables et sont mobilisables pour d'autres tâches ;
- 4) Il en résulte que les conflits sociocognitifs sont des moteurs de l'apprentissage.

Jonnaert (2002) consacre un chapitre sur l'influence du socioconstructivisme dans le développement de compétences. Il y présente un modèle élaboré avec Vander Borgh : le modèle socioconstructiviste et interactif (SCI) de construction de connaissances. Le modèle pédagogique proposé repose sur trois dimensions du processus de construction des connaissances : l'assise *constructiviste*, l'assise *interactive* et la dimension *socio*.

La première dimension, **constructiviste**, fait référence au changement conceptuel ou encore à la manipulation des idées, des connaissances et des conceptions antérieures à propos de l'objet à apprendre au moyen d'une activité réflexive en boucle entre les connaissances du sujet et l'objet à apprendre. Cette activité réflexive, qui place en interaction les conceptions de l'élève avec l'objet à apprendre, ne s'opèrerait qu'en interaction avec l'environnement.

Si, dans ce cas, nous insistons sur le processus de ce changement, il reste que les savoirs ne sont pas exclus du processus que nous venons de décrire mais, qu'au contraire, ils y occupent une place déterminante.

La seconde dimension, **interactive**, stipule que le sujet construit de nouvelles connaissances et modifie d'anciennes connaissances parce qu'il se trouve en interaction avec son milieu physique et social. C'est ici qu'est introduite la notion de *situation* ou **situation d'apprentissage**. La situation interactive apporte les matériaux de base à la construction des connaissances. C'est pourquoi nous retrouverons le concept de situation d'apprentissage au cœur du nouveau programme de formation puisque changement conceptuel et environnement sont désormais liés dans le processus d'apprentissage. Nous préciserons plus loin le concept de situation d'apprentissage.

Finalement, la dimension **socio** insiste sur les échanges avec les pairs et l'adulte enseignant. Cette dimension dans le processus de construction des connaissances présente trois facettes : les interactions sociales, qui provoquent le conflit sociocognitif, celle de l'intégration de l'école dans un environnement social finalisé, et celle de l'éthique et de la responsabilité de l'apprenant face aux connaissances qu'il construit.

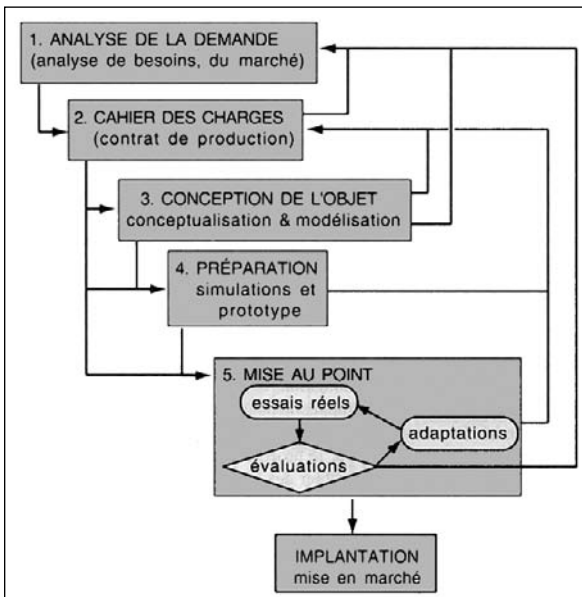
C'est donc la synergie des trois dimensions du modèle proposé qui suscite tout l'intérêt. Prises séparément, elles deviennent obsolètes et conduiraient à un apprentissage qui soit tournerait à vide, soit perdrait son sens ou se limiterait à expliquer les relations entre les individus en dehors de tout projet d'apprentissage.

2.3. Le modèle de recherche de développement

L'analyse des nouveaux programmes et la référence au socio-constructivisme nous permettent de jeter les bases de nouvelles activités mieux adaptées à l'étude de phénomènes astrophysiques. La présente recherche de développement vise à créer des activités d'apprentissage utilisant la simulation axées sur le constructivisme et à souligner les principes de design sous-jacents à leur conception. Van der Maren (2003) appelle **objet pédagogique**, tout matériel visant à résoudre un problème d'ordre pédagogique et propose une méthode de conception et de mise au point en recherche de développement (voir figure 3). Ainsi, la problématique tient lieu de l'analyse

de la demande et du cahier des charges, c'est-à-dire du besoin à combler en développement de matériel en tenant compte du contexte et des ressources disponibles. Notre revue de littérature, quant à elle, facilite la conception de l'objet. L'analyse des connaissances disponibles dans le domaine conduit à l'élaboration d'un modèle général axé sur les principes de design retenus. Trois phases définissent la conception : revue de littérature, conceptualisation de l'objet et modélisation. Une fois cette étape terminée, nous avons préparé le prototype de situation d'apprentissage (séquence d'activités socioconstructivistes) qui fera l'objet d'une mise au point par des mises à l'essai répétées en situations réelles. Ces essais réalisés auprès d'échantillons d'utilisateurs sont décrits dans les prochaines lignes.

FIGURE 3
Le développement d'objet pédagogique.
 (Van der Maren, 2003, p. 109)



2.4. Design pédagogique de nouvelles activités d'apprentissage

Ainsi, l'introduction des concepts d'astronomie au secondaire et la nécessité de développer certaines compétences chez les futurs maîtres, entraînent des modifications dans le contenu de certains cours dispensés. Le cours DST 2010, *Projets intégrés en sciences et technologies*, qui comprend des activités de *laboratoires virtuels*, en constitue un exemple. Par activités de laboratoire, nous entendons autant la recherche d'information que l'utilisation du simulateur. Nous y avons consacré 9 heures pendant lesquelles les étudiants, en équipes, doivent résoudre un problème (chacun différent) en utilisant des simulateurs de télescopes ou de radiosopes. Malheureusement, après trois cohortes, les résultats attendus et la motivation des étudiants ont manqué. Ces résultats ont été obtenus lors de l'évaluation de la présentation et d'un examen mesurant les connaissances. La motivation, quant à elle, n'a pas fait l'objet de mesure précise, mais d'entretiens informels avec les étudiants.

Voyant cela, l'équipe de concepteurs du cours de didactique dont il est question ici, s'est penchée sur la refonte des activités en misant sur l'intégration de la simulation à des activités de nature socioconstructiviste. Les simulateurs *requièrent un ensemble de directives à suivre par l'utilisateur. Trop souvent, ces activités sont conçues par des spécialistes de la discipline et non par des didacticiens. Il en résulte généralement des protocoles analogues à ceux des laboratoires dits classiques, dont la démarche est présentée comme l'est souvent une recette de cuisine.*

Quels sont alors les principes de design à mettre de l'avant dans la conception d'activités socioconstructivistes associées à l'utilisation de logiciels de simulation ? Comment savoir si les activités mises de l'avant répondent aux besoins exprimés de formation ? Comment déterminer la dimension « socio » dans le déroulement des activités ?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous décrivons, dans la prochaine section, la méthodologie employée dans la conception du nouvel objet d'apprentissage.

3. MÉTHODOLOGIE

Afin d'amorcer la conception de l'objet pédagogique, il nous fallait d'abord créer un prototype de situations d'apprentissage, intégrant les simulateurs et répondant à un ensemble de prescriptions issues du cadre théorique choisi. Par la suite, nous l'avons testé en situation réelle avec deux cohortes d'étudiants en 2^e année du BAC de didactique des sciences et technologies. Au total, deux essais ont permis de déterminer les points forts et les points faibles des activités proposées. Lors du deuxième essai, en janvier 2008, nous avons fait appel à une technologie de traçage (MORAE) que nous décrirons un peu plus loin, laquelle nous a permis de pousser l'analyse au-delà de l'entrevue et de reconnaître certains points à améliorer.

3.1. Le protocole socioconstructiviste type

Nous avons fait le choix, rappelons-le, d'élaborer des protocoles socioconstructivistes dans le but de développer des connaissances en astronomie et des compétences professionnelles chez de futurs enseignants de science et technologie. Nous nous sommes inspirés de l'analyse des programmes du MELS (Beaulieu, 2006, 2007 ; M. Beaulieu, J. Raynauld et O. Gerbé, 2007). En fait, il nous semblait intéressant de chercher à développer, en plus des compétences professionnelles, les compétences du programme de science et technologie (résoudre des problèmes, appliquer les résultats de la science et communiquer à l'aide des langages scientifiques) en proposant des activités calquées sur un modèle qu'ils auront à proposer dans leur pratique, modèle dont les activités d'apprentissage intègrent les trois assises du modèle SCI dont nous avons fait la description précédemment.

La tâche complexe à réaliser est un enregistrement audio d'une durée de 10 à 15 minutes dont l'objectif est de vulgariser une méthode servant à résoudre un problème d'astronomie, comme celui de déterminer l'âge de l'Univers. Il est composé d'une introduction, d'une partie historique liée au phénomène (repères culturels : histoire, personnages, lois, technologie...) d'une durée de 5 minutes, d'une partie explicative du phénomène, aussi d'une durée de 5 minutes, et d'une conclusion.

Parmi les outils fournis pour la réalisation de la tâche, on trouve plusieurs documents pouvant être utilisés ou non par les

étudiants. Ces documents donnent des pistes de solution dans l'élaboration de la tâche. Par exemple, on peut y découvrir des documents présentant quelques repères culturels et scientifiques, des modes d'emploi pour le simulateur et le logiciel d'enregistrement, des tableaux pour consigner les données, des formules utiles, des questionnaires en marge afin d'orienter la réflexion, etc. Dans la version électronique, nous avons inséré des hyperliens menant à l'encyclopédie Wikipédia.

On retrouve les dimensions socio, interactive et constructiviste dans les différentes activités aménagées selon trois phases. La **préparation**, d'une durée de trois heures, constitue l'étape pendant laquelle les étudiants, par la mise en situation, s'approprient la tâche à réaliser et se familiarisent avec les différents outils mis à leur disposition. C'est aussi la phase où, normalement, s'amorce l'activité réflexive en boucle entre les connaissances du sujet et l'objet à apprendre. L'étape de **réalisation**, d'une durée de trois heures aussi, se distingue par l'utilisation du simulateur afin d'obtenir les données utiles à la résolution du problème. Ainsi, le sujet construit de nouvelles connaissances et en modifie d'anciennes parce qu'il se trouve en interaction avec son milieu physique et social. Par exemple, le sujet avec l'aide de ses collègues sélectionne une quinzaine de galaxies et recueille les données avec le spectromètre, il détermine pour chacune des galaxies la vitesse et la distance à l'aide des équations, il calcule enfin la constante de Hubble qui lui permettra de déterminer l'âge de l'Univers.

Finalement, se déroule l'étape d'**intégration**, également d'une durée de 3 heures, au cours de laquelle les étudiants rassemblent en équipe leurs nouvelles connaissances, mobilisent leurs ressources et créent une capsule audio (podcast) à l'aide du logiciel d'enregistrement Audacity². La figure 4 résume le protocole **La relation de Hubble et l'expansion de l'Univers**. Les galaxies, de par leur déplacement, émettent des ondes lumineuses dont le spectre est décalé vers le rouge en raison de l'effet Doppler. En évaluant le décalage vers le rouge des raies H et K du calcium, on parvient à calculer la vitesse d'éloignement. Si on fait l'exercice pour plusieurs galaxies, il est possible de tracer le diagramme de Hubble de la

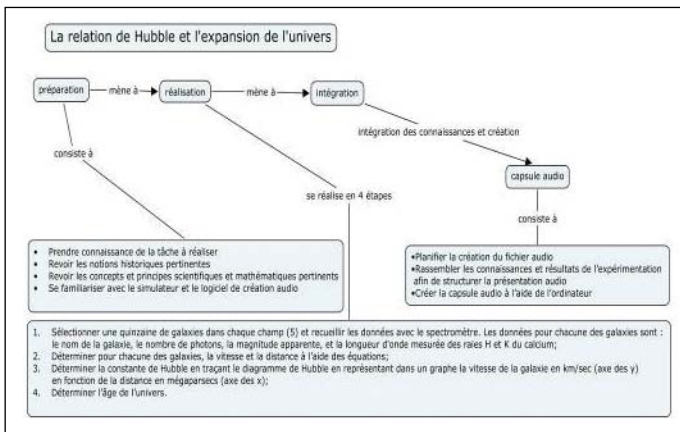
2. Audacity est un logiciel d'édition audio libre très populaire. On peut le trouver à l'adresse suivante : <http://audacity.sourceforge.net/about/>

vitesse en fonction de la distance et ainsi, par projection, de déterminer l'âge de l'Univers.

Six tâches complexes ont donc été adaptées sur ce modèle. Elles ont été présentées aux étudiants en formats papier et numérique lors du cours de DST 2010 fin janvier 2007. Nous en avons profité pour réaliser une étude exploratoire sur leur utilisation en situation de classe.

FIGURE 4

Résumé de la situation d'apprentissage *La relation de Hubble et l'expansion de l'Univers*



En résumé, le protocole que nous avons conçu, qui se déroule en 3 étapes, vise à favoriser la mobilisation d'un ensemble de ressources en vue de la réalisation d'une tâche complexe (capsule audio). Il propose des outils (notions historiques ou scientifiques, hyperliens, guides, questions pour orienter les étudiants, logiciels, etc.), il encourage la collaboration et la coopération tout au long du processus, et intègre la simulation (manipulation).

La conception de la séquence d'activités proposée a été le résultat d'une revue de littérature exhaustive. Nous en avons retenu un modèle de formation par compétence proposée par le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS, 2007). Nous avons retenus également le modèle SCI de Jonnaert et Vander Borght (2002). Toutefois, ce prototype socioconstructiviste qui intègre la simulation répond-il bien au développement des compétences pro-

fessionnelles chez nos futurs enseignants ? La situation d'apprentissage permet-elle de mobiliser différentes ressources ? Dans l'affirmative, lesquelles et à quel moment ? Incite-t-elle à une réelle collaboration ou coopération ? Si oui, de quel type et à quel moment se manifeste-t-elle ? Quelles sont les stratégies employées par chacune des équipes tout au long du processus ? Quelles tâches semblent susciter le plus de motivation ?

De manière à répondre à ces questions, et dans le souci de mise au point de notre prototype, nous avons procédé à sa mise au point à l'aide d'essais réels avec deux cohortes d'étudiants du cours de DST 2010 en janvier 2007 et en janvier 2008. Lors du premier essai, nous avons relevé les informations à l'aide d'observations, d'une entrevue de groupe et d'un questionnaire. Toutefois, nous nous sommes vite rendu compte que ces méthodes avaient leurs limites. Par exemple, elles rendent difficile l'investigation du processus de construction, des stratégies employées ainsi que des ressources mobilisées. C'est pourquoi nous avons fait appel à une technologie de traçage pour le deuxième essai. Voyons, plus en détail, chacun de ces essais.

3.2. Première mise à l'essai

Nous avons mené, en janvier 2007, une étude exploratoire visant à observer le déroulement de l'activité de laboratoire virtuel et à recueillir les réactions de dix-sept étudiants. Nous avons procédé par la mise en situation d'apprentissage réelle d'étudiants (17) avec les activités élaborées, par une entrevue de groupe (1 étudiant par équipe, soit 5 étudiants) à l'aide d'un guide semi-structuré, et par un questionnaire individuel rempli par les autres étudiants du cours (12).

Nous avons interrogé les étudiants sur plusieurs aspects des protocoles socioconstructivistes : leurs perceptions, l'utilisation des technologies, le simulateur, la capsule audio, les outils, la structure du protocole, l'intérêt, la motivation, le niveau conceptuel, la collaboration, etc.

Les résultats préliminaires recueillis peuvent être résumés ainsi : de façon générale, les étudiantes et étudiants interrogés disent avoir une meilleure compréhension et rétention des concepts d'astronomie après le laboratoire. Ils imputent cette affirmation à la réalisation de la capsule audio qui, en plus de susciter leur création

artistique, les obligerait à rechercher de manière plus approfondie les différents concepts et repères culturels et donc à mieux structurer la pensée. Ils réalisent que la démarche s'apparente à celle que préconise le nouveau programme de science et technologie au secondaire. Pour ce qui est du protocole, ils proposent de revoir la présentation de l'information de manière à rendre plus aisée la navigation dans les différents documents. De plus, ils disent utiliser les hyperliens proposés, mais aussi d'autres ressources telles que des sites scientifiques sur le Web, des manuels, des notes de cours, etc. Au sujet de la motivation, ils affirment que l'élaboration de la capsule audio est un élément clé qui, combiné au simulateur, donne l'envie d'approfondir les connaissances en astronomie et d'utiliser ultérieurement cette pratique dans l'élaboration de situations d'apprentissage au secondaire. Finalement, la collaboration aurait fait l'objet de différents modèles et contribué à une meilleure compréhension des concepts d'astronomie, bien que les simulateurs soient conçus davantage pour le travail individuel. Ces derniers auraient avantage à permettre une meilleure division du travail.

3.3. Seconde mise à l'essai

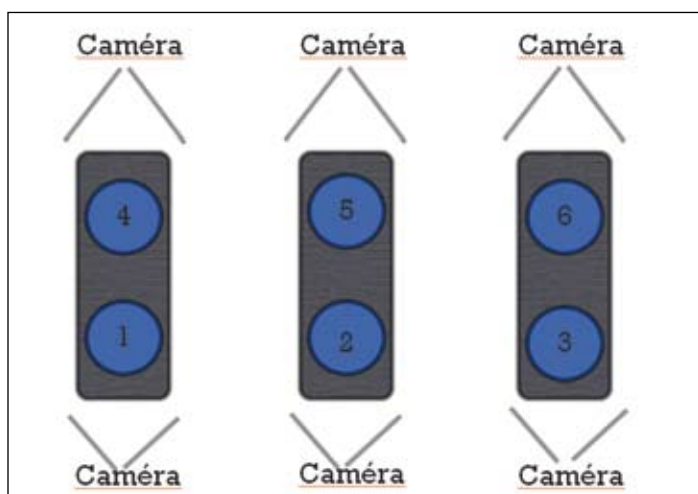
L'étude exploratoire précédente nous a permis de recueillir des résultats préliminaires afin de retenir 2 protocoles (Photométrie de l'amas des Pléiades et La relation de Hubble et l'expansion de l'Univers) avec lesquels 22 étudiants en formation des maîtres ont été suivis et filmés dans leur démarche d'apprentissage (janvier 2008). Cette fois, nous avons fait appel à la technologie de traçage (MOREA) afin de « monitorer » toutes les actions, tous les faits et gestes de six équipes dans la réalisation de la tâche (résolution de la situation d'apprentissage et création d'une capsule audio). Ainsi, chacune des 3 étapes de réalisation (préparation, réalisation et intégration) a laissé des traces numérisées auxquelles nous avons ajouté des marqueurs (tableau 1) qui nous permettent d'analyser les différentes démarches et de tirer des conclusions sur l'impact des protocoles. Les six équipes sont disposées sur de grandes tables à raison de deux équipes par table (voir figure 5). Chacune des équipes dispose d'un ordinateur qui est doté de la technologie MORAE Recorder³. Il

3. Morae est une suite logicielle facilitant l'analyse de l'interaction de l'utilisateur avec un site Web ou une application, y compris les activités du bureau, l'audio, la caméra vidéo et une chronique complète des événements du système. Pour

s'agit d'une application furtive qui enregistre en temps réel l'activité des utilisateurs. Toutes les actions effectuées à l'écran ainsi que l'image de la caméra (Webcam) sont stockées dans un fichier. De plus, chacune des équipes est filmée par une caméra vidéo conventionnelle dans le but de saisir des angles non couverts par la webcam. Cette caméra permet de rendre compte des échanges entre les coéquipiers, de leurs déplacements, etc. La figure 5 illustre la disposition des six équipes dans le local de laboratoire.

FIGURE 5

Disposition des équipes et du matériel dans le laboratoire



La durée totale d'enregistrements est de 54 heures, ce qui correspond aux trois étapes de développement d'une durée de trois heures chacune par équipe. Les données recueillies par le truchement de MORAE Recorder sont ensuite utilisées par MORAE Manager (figure 6). Cette application complémentaire permet de visualiser les activités en différé. La fenêtre principale montre l'écran de l'ordinateur en différé. On peut y voir le déplacement de la souris et toutes les tâches réalisées pendant la séquence des activités. L'échelle de temps (sous la fenêtre principale) permet de se déplacer

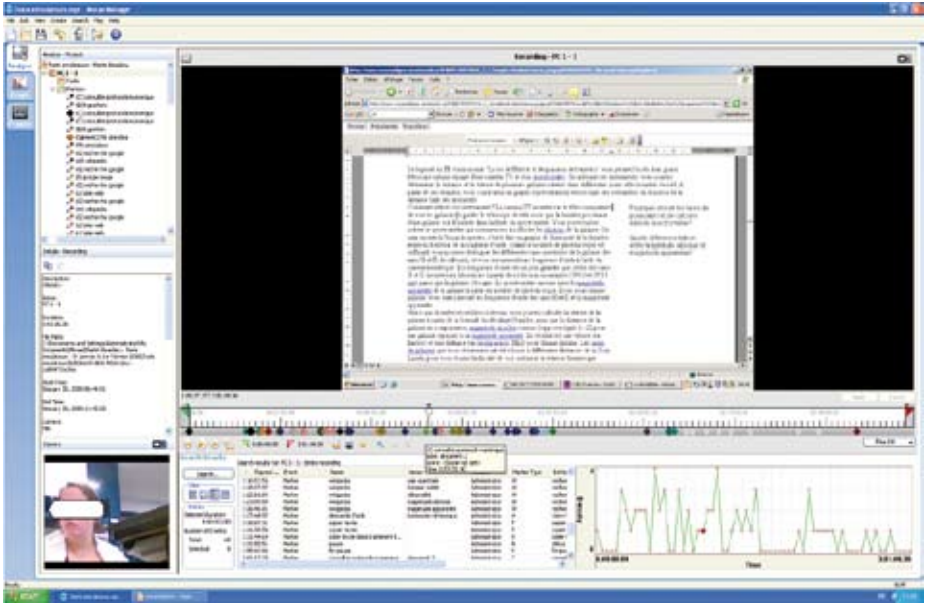
facilement et de reconnaître des marqueurs et des tâches rapidement. Le marqueur n'est qu'un endroit de référence dans la séquence alors que la tâche peut être caractérisée par une durée. En bas à gauche, on aperçoit l'image vidéo prise par la webcam de l'ordinateur. Le tableau 1 montre les différents marqueurs et les différentes tâches répertoriées. On y trouve aussi l'image et le son de la caméra de l'ordinateur. Il est alors possible de coupler l'image à l'activité de l'utilisateur.

TABLEAU 1

Les marqueurs représentant les différentes activités relevées dans les trois étapes du protocole

A	pause	J	Consulter courrier	S	
B	Consulter hyperlien	K	Utiliser Audacity	T	Copier texte
C	Consulter protocole	L		U	Consulte Site web
D		M	Utiliser simulateur	V	
E		N	Utiliser tableur (excel)	W	Consulter Wikipedia
F	Fin pause	O		X	
G	Rechercher sur Google	P		Y	Tâche indéfinie
H	Demander de l'aide	Q	Consulter questions marge	Z	Référence à la caméra
I	Google image	R	Coller texte		Rédiger texte

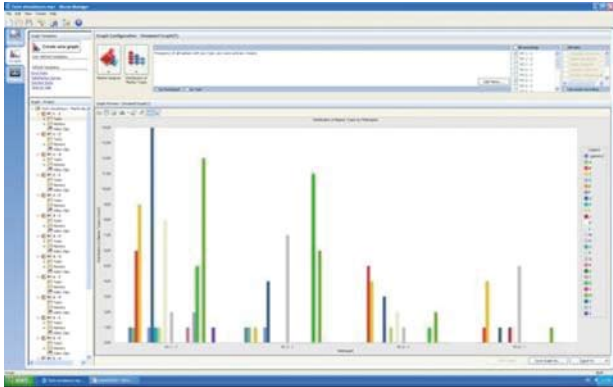
FIGURE 6
Exemple d'écran de Morae Manager permettant de visualiser l'activité, l'image et le son enregistrés pendant les activités.



MORAE Manager permet de créer facilement des graphiques afin de déterminer la fréquence des marqueurs et des tâches ou encore la durée des différentes tâches (figure 7). Ainsi, pour chacune des équipes (en abscisse), nous voyons la fréquence (en ordonnée) de chacun des marqueurs colorés à l'étape de préparation. Les marqueurs identifiés apparaissent à droite du graphique. Le traitement peut être fait pour une équipe ou l'ensemble des équipes, pour une tâche ou l'ensemble des tâches. Ainsi, nous avons pu observer, pour chacune des étapes de la situation d'apprentissage, les tâches réalisées (fréquence et durée) par chacune des équipes. Ces renseignements nous sont d'une grande utilité parce qu'ils donnent une image claire et objective des stratégies employées dans la réalisation de la tâche et dans la mobilisation et l'utilisation des différents outils.

FIGURE 7

Graphique généré par MORAE Manager. On y trouve la fréquence des marqueurs de chacune des équipes dans la partie préparation du protocole socioconstructiviste.



4. RÉSULTATS

Bien que nous n'ayons pas complété l'étude exhaustive des données au moment d'écrire ce chapitre, il est déjà possible d'exposer certains résultats des mises à l'essai successives. Déjà, les résultats obtenus par la vidéo et le logiciel de traçage permettent de dégager des principes à reconsidérer dans le design du protocole.

Tout d'abord, nous observons des différences entre la perception des étudiants et la réalité observée puisqu'il est possible de juxtaposer les réponses fournies lors de l'entrevue avec le visionnement des différentes activités. Ici, l'utilisation d'une technologie de traçage confère un réel avantage. Par exemple, la plupart des étudiants affirment qu'ils ont grandement collaboré tout au long du processus alors que, dans les faits, on observe de nombreuses lacunes dans certaines parties des activités, notamment dans la phase de préparation et lors de l'utilisation du simulateur. Cette disparité entre perception et réalité s'observe également dans la compréhension des concepts. Lors des entrevues, les étudiants affirment que le niveau conceptuel dans le problème est adéquat et qu'ils en ont une bonne maîtrise. Pourtant, lors du visionnement des sites et des ressources consultées par ces derniers, on peut s'apercevoir que beaucoup trop de temps est utilisé, dans la phase de préparation, à

la recherche de concepts de niveau universitaire qui devraient être déjà intégrés étant donné leur formation scientifique (année-lumière, galaxie, effet Doppler, etc.). Il en va de même pour la motivation et le manque de temps. Pour ce dernier, les étudiants disent manquer de temps, mais on observe, à quelques reprises, certaines activités, même à l'ordinateur, qui ne sont pas toujours en lien avec la tâche (pauses trop longues, consultation du courriel, de la météo, etc.).

L'utilisation de la technologie de traçage combinée à la vidéo permet de « monitorer » tout le processus de réalisation de la tâche au sujet tant du choix des ressources que de la réalisation de chacune des activités et selon les trois dimensions décrites précédemment.

4.1. Dimension constructiviste

On s'intéresse donc au choix des ressources utilisées et à la simulation pour la construction de nouvelles connaissances. On peut aussi observer les stratégies employées dans la conduite de chacune des étapes de la démarche. Dans la phase de préparation, les étudiants prennent connaissance de la tâche dans son ensemble et commencent à rechercher des informations supplémentaires à partir de ce qu'ils connaissent. On remarque qu'ils connaissent déjà des sites Internet et les préfèrent, la plupart du temps, à ceux proposés. Somme toute, peu de sites sont consultés et on observe peu de validation de l'information. Nous observons que les étudiants ont tendance à utiliser le document de présentation de la tâche en format papier, ce qui a pour effet de les priver des ressources proposées en hyperliens. Ils préfèrent généralement trouver eux-mêmes les ressources en utilisant les moteurs de recherche conventionnels tels Google et Wikipédia. Cette façon de faire engendre perte de temps et dispersion. Finalement, il faut mieux encadrer la phase de préparation de la tâche. Il serait souhaitable de permettre à l'étudiant de mieux déterminer les connaissances qu'il maîtrise déjà par rapport à la tâche et de le guider davantage dans la recherche ou l'approfondissement de certains concepts. Ainsi, la dernière étape est ponctuée de recherches qui, normalement, auraient dû être faites dans la phase de préparation.

4.2. Dimension interactive

Les protocoles suggérés sont ouverts et laissent place à l'utilisation de diverses stratégies, les différentes équipes adoptant des

stratégies variées. Si certaines équipes adoptent celle suggérée dans le protocole (préparation, réalisation, intégration, voir figure 4), d'autres équipes suivent des voies différentes. Toutefois, elles présentent la caractéristique d'être moins préparées à utiliser le simulateur et à concevoir la capsule audio. La qualité de la production en serait influencée. L'utilisation du simulateur se fait sans trop de difficultés. Les utilisateurs consultent le document guide mis à leur disposition.

4.3. Dimension sociale

On remarque aussi que la collaboration varie d'une équipe à l'autre et reste assez limitée. La phase d'intégration est celle où il y en a le plus mais, de façon assez générale, les étudiants présentent de sérieuses difficultés à s'organiser et se partager la tâche. D'ailleurs, la simulation pose en ce sens plusieurs difficultés. Les observations permettent également de constater à quel point les simulateurs, bien que très appréciés, n'ont pas été conçus dans l'optique d'un travail d'équipe. Un seul étudiant généralement, manipule le simulateur. Les autres détournent rapidement leur attention pour vaquer à d'autres tâches, comme celle de concevoir le tableau des données préalable au traitement. Cette cognition distribuée fait que les étudiants ne collaborent pas pleinement et n'en retirent probablement pas le même bénéfice. La confection de la capsule audio suscite beaucoup de motivation et d'enthousiasme. C'est du moins ce que révèlent la vidéo et les entrevues personnelles réalisées à la fin de l'expérience. On y dénote aussi le plus d'échanges entre coéquipiers.

La technologie de traçage contribue grandement à l'émergence de principes de design, surtout parce qu'elle permet :

- ◆ un suivi pas à pas du processus de réalisation de la tâche ;
- ◆ la comparaison entre les données observées et le discours des étudiants lors d'entrevues ;
- ◆ une présentation graphique de l'information recueillie.

Cependant, certaines limites ont pu être observées :

- ◆ les webcams ont tendance à être déplacées et les utilisateurs sortent alors du champ de vision

- ◆ les usagers utilisent leur ordinateur personnel pour réaliser une partie des tâches et certaines données n'ont pas pu être enregistrées ;
- ◆ les bruits ambiants peuvent interférer avec le son enregistré.

Des limites à cette technologie de traçage s'observent aussi au niveau de l'analyse. Par exemple, MORAE Manager permet la définition de tâches et de marqueurs et, s'il est possible de définir une infinité de tâches, le nombre de marqueurs est toutefois limité. De plus, si MORAE Manager donne la possibilité d'établir la fréquence des marqueurs et des tâches en plus du temps passé sur chacune d'elle, il ne permet pas l'analyse croisée des données pour une équipe ou l'ensemble des équipes.

En dépit de ces limites, la technologie de traçage nous a permis de recueillir des informations sur le processus d'apprentissage collaboratif basé sur la simulation qu'il nous aurait été impossible d'obtenir sans elle. Un traitement préliminaire des données recueillies nous encourage à revoir certains éléments. Les observations nous incitent déjà à sélectionner des principes à retenir dans la conception de telles activités :

- ◆ dans la phase de préparation, les résultats indiquent qu'il faut promouvoir l'utilisation du protocole numérique afin de favoriser l'accès rapide à des ressources plus pertinentes et de qualité, mieux encadrer le travail d'équipe et favoriser la motivation en plus de mieux faire connaître le fonctionnement du simulateur et du logiciel d'enregistrement ;
- ◆ dans la phase de réalisation, il faut favoriser le travail d'équipe en adaptant le simulateur ou le protocole afin que tous puissent participer à l'utilisation du télescope et de ses outils d'analyse.
- ◆ dans la phase d'intégration, l'accent doit être mis sur l'intégration des connaissances et la tâche à réaliser. Il faut aussi, de façon générale, revoir la gestion du temps tout au long des activités.

CONCLUSION

La présente recherche de développement visait l'établissement de principes de design pour la conception et la mise au point d'activités de nature socioconstructivistes utilisant des simulateurs, dans le but de développer des compétences professionnelles chez de futurs enseignants de science et technologie. Par le fait même, elle visait à déterminer la pertinence d'utiliser une technologie de traçage de type MORAE pour la recherche de tels principes. Bien qu'à ce stade, nous n'ayons pas complété l'étude exhaustive des données, certains faits sont à considérer.

En résumé, l'utilisation de MORAE et de la vidéo couplée à des entrevues semi-dirigées permet de suivre le processus conduisant à la réalisation de la tâche, ce que l'entrevue seule n'arrive pas à faire. Cette combinaison sert également à tracer le portrait du choix des différentes ressources et du temps accordé à chacune d'elles. Elle met aussi en évidence les stratégies de collaboration déployées. Fait important, elle révèle que le simulateur doit être conçu dans un but de formation et favoriser la collaboration, puisque cette dernière ne semble pas aller de soit. Nos protocoles ont pu être revus sur la base des données recueillies lors de ces deux mises à l'essai.

En ce qui a trait à la mise au point d'activités et l'identification de principes, l'expérience soulève certains besoins. Nous voyons apparaître des principes qui devraient guider le développement de ce type d'activités. Les analyses des données recueillies se poursuivent et une étude quantitative pourrait révéler certains faits pouvant moduler les résultats présentés ici. Par exemple, il serait intéressant d'opérer un traitement statistique séquentiel des données obtenues par MORAE. Cela permettrait de croiser certains indices et de définir de manière plus rigoureuse la séquence d'activités utilisée par chacune des équipes dans la production de la capsule audio, donc dans l'intégration des connaissances et le développement des compétences. La technologie de traçage MORAE offre ainsi, selon nous, un grand potentiel d'investigation pour mieux comprendre les processus complexes de l'apprentissage collaboratif utilisant des technologies, et en particulier des simulateurs.

BIBLIOGRAPHIE

- Allessi, S.M., & S.R. Trollip (1991), *Computer-Based Instruction : Methods and Development* (2nd Ed). Englewood Cliffs, NJ : Prentice Hall.
- Beaulieu, M. (2006), Un outil pour l'indexation, l'appropriation et la recherche des situations d'apprentissage et d'évaluation (SAÉ), première partie. *Spectre*, 36(2), p. 32-36.
- Beaulieu, M. (2007), « Un outil pour l'indexation, l'appropriation et la recherche des situations d'apprentissage et d'évaluation » (SAÉ), deuxième partie. *Spectre*, 36(3), p. 26-30.
- Beaulieu, M., J. Raynauld et O. Gerbé (2007), « Enseigner les sciences en favorisant l'échange de ressources complexes », dans P. Potvin, M. Riopel, & S. Masson (Dir.), *Regards multiples sur l'enseignement des sciences*. Québec : Multimondes.
- Bureau d'approbation du matériel didactique, ministère de l'Éducation du Québec (2004). *Évaluation des aspects pédagogiques du matériel didactique enseignement primaire et secondaire*. Québec : gouvernement du Québec.
- Gerbé, O., J. Raynauld, et M. Beaulieu (2006), *Vers un standard de la description des situations d'apprentissage et d'évaluation*. [En ligne] <http://www.matimtl.ca/sae/articles/sae2006v1/sae2006v1.htm> (page consultée le 3 juillet 2008).
- Johsua, S., & J.-J. Dupin (2003), *Introduction à la didactique des sciences et des mathématiques* (1^{re} éd.). Paris : Presses universitaires de France.
- Jonnaert, P. (2002), *Compétences et socioconstructivisme : un cadre théorique*. Bruxelles : De Boeck.
- Ministère de l'Éducation du Québec (2001), *La formation à l'enseignement : les orientations, les compétences professionnelles, les orientations, les compétences professionnelles*. Québec : gouvernement du Québec.
- Ministère de l'Éducation. (2004). *Programme de formation de l'école québécoise : enseignement secondaire, premier cycle*. Québec : ministère de l'Éducation.
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. (2007). *Programme de formation de l'école québécoise : enseignement secondaire, deuxième cycle*. Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport. Québec : ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport.
- Roblyer, M. D., & R. Schwier (2003), *Integrating educational technology into teaching* (Canadian ed.). Toronto : Prentice Hall.
- Rochon, D. (2005), « Impacts des programmes de science et technologie sur la formation des élèves », *Spectre* 35, 1, p. 10-12.
- Roegiers, X., & J.-M. d. Ketele (2000), *Une pédagogie de l'intégration : compétences et intégration des acquis dans l'enseignement* (1^{re} éd.). Bruxelles : De Boeck Université.

Tardif, J. (2006), *L'évaluation des compétences. Documenter le parcours de développement*. Montréal : Les Éditions de la Chenelière inc.

Van der Maren, J.-M. (2003), *La recherche appliquée en pédagogie : des modèles pour l'enseignement* (2e éd.). Bruxelles : De Boeck.

CHAPITRE 6



Contrôler l'environnement d'expérimentation en éducation scientifique : l'expérience du LabUQAM

Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Patrick Charland, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

L'article présente une activité de recherche expérimentale en éducation scientifique qui s'intéresse à l'apprentissage ouvert en sciences. Cette présentation en décrit la structure et le fonctionnement et insiste sur les difficultés méthodologiques (inhérentes à la recherche en éducation et, en particulier, à celle sur la pédagogie de la découverte) qu'elle permet de surmonter ou de réduire partiellement. Ces difficultés vont de considérations plus générales (accès aux sujets d'étude) à d'autres plus ciblées (contrôle de variables expérimentales).

INTRODUCTION

La recherche sur l'apprentissage en contexte éducatif présente encore certains problèmes de crédibilité. En effet, bien qu'on la reconnaisse de plus en plus comme une activité scientifique à part entière (émergence de facultés des *sciences* de l'éducation, de facultés de *sciences* humaines, etc.) et que ceux qui la pratiquent obtiennent une formation qui est de plus en plus solide, les protocoles de recherche expérimentale présentent parfois des fragilités importantes. Certaines peuvent avoir trait, pour ne nommer que quelques causes possibles, à une trop grande dépendance à l'un ou l'autre paradigme idéologique, à des problèmes de généralisabilité, ou à des problèmes de contrôle des variables expérimentales. Les difficultés inhérentes au travail de terrain ne sont pas étrangères à ces problèmes. La réalité d'une classe peut en effet difficilement être réduite au seul phénomène qu'on souhaite observer.

Le fonctionnement d'une classe consiste plutôt en un enchevêtrement extrêmement complexe de subjectivités, d'événements, de contingences et de contraintes physiques, morales, cognitives ou simplement accidentelles. Arriver à détricoter chacun de ces paramètres peut s'avérer particulièrement difficile (et parfois même apparemment impossible). La fixation des variables expérimentales, par exemple, devient un défi considérable qui réclame que l'expérimentation soit faite sur un grand nombre de sujets. Imaginer une recherche qui explore les effets d'une pédagogie particulière, par exemple, s'avère difficile : comment isoler l'effet « enseignant » de l'effet « enseignement » ? Comment être véritablement certain que la variable indépendante est bien la cause – et la seule cause – associée à la variable dépendante ? Et comment se satisfaire d'une variable dépendante souvent très réductrice du phénomène de l'apprentissage (la performance à un test, par exemple) ?

Le déroulement des événements qui se produisent dans une classe est aussi extrêmement dépendant des consignes initiales de fonctionnement qui sont communiquées aux élèves. Certaines phrases ou certains mots, chaque enseignant le sait, peuvent être déterminants sur le comportement des élèves et sur les itinéraires où ils s'engagent alors. L'équilibre est de mise : l'échafaudage pédagogique peut facilement s'effondrer dès lors qu'une information cruciale n'a pas été donnée. Et si une donnée déconcertante ou confuse a été malencontreusement ajoutée à la consigne, c'est tout le programme pédagogique qui peut dérailler. On s'aperçoit souvent trop tard des

effets de ces mauvaises consignes, ou de consignes données différemment d'un groupe à l'autre ou qui sont simplement communiquées sans grande conscience des objectifs à atteindre. C'est bien souvent uniquement au terme du processus d'apprentissage qu'on peut prendre la mesure de ce véritable effet « papillon ». Autre cas : si une donnée trop directive ou qui oriente trop clairement l'effort de l'élève a été initialement et accidentellement ajoutée à la consigne, le processus d'apprentissage risque aussi de se réduire à un simple jeu de devinettes. La teneur des consignes de fonctionnement d'une tâche présente donc certaines difficultés pour l'enseignant, mais pour ce dernier, la chose n'est pas si grave : il a tout le temps de se rattraper et éventuellement de corriger le tir avec ses élèves au cours suivant.

Pour le chercheur, cependant, la situation peut être plus dramatique. C'est souvent plusieurs mois plus tard, lors de l'analyse, qu'il se rend compte des problèmes qui sont survenus lors de la collecte des données et qui ont pour cause les différences dans les consignes initiales qui ont été communiquées aux apprenants. Ou pire, il ne s'en rendra jamais compte lors de la saisie des données ou des traitements statistiques.

Les recherches sur l'apprentissage ouvert posent encore davantage de difficultés. Lorsque l'élève devient responsable d'une partie de son apprentissage ou lorsque les situations-problèmes laissent entrevoir davantage de pistes d'exploration et de résolutions, c'est-à-dire qu'elles admettent plusieurs réponses possibles, l'analyse et les comparaisons peuvent se compliquer considérablement. Ces complications rendent les recherches sur de grands groupes encore plus difficiles. C'est peut-être pourquoi – pour de simples et légitimes raisons de faisabilité – on renonce parfois à des recherches dites expérimentales et qu'on se rabat sur le « quasi-expérimental » ou l'« interprétatif ». On se contente aussi parfois de petits groupes de sujets, comme c'est souvent le cas, par exemple, dans les recherches menées dans le cadre d'études doctorales.

Cet article décrit donc une initiative méthodologique qui a pour but de tenter de réduire certaines de ces difficultés. Nous commencerons par une brève description de l'infrastructure, puis nous illustrerons les avantages qu'elle permet d'obtenir à travers l'explication d'une activité de recherche appelée « les défis électroniques », qui est elle-même indissociable de l'infrastructure que nous décrirons maintenant.

1. UNE BRÈVE DESCRIPTION DE L'INFRASTRUCTURE

L'Université du Québec à Montréal (UQAM) et le Centre des sciences de Montréal (CSM), une institution muséale située au Vieux-Port de Montréal, partagent des locaux communs dont la vocation est de participer à la formation scientifique et pédagogique du public, d'élèves, d'enseignants et d'étudiants en formation des maîtres. L'UQAM y dispense donc ses cours de didactique de la science et de la technologie au secondaire et au primaire. Il s'agit d'un laboratoire/atelier/salle de conférence dont la configuration peut être rapidement modifiée pour répondre aux différents besoins des deux partenaires. Cette salle peut notamment reproduire une salle de classe-laboratoire du secondaire, avec des tables mobiles sur roulettes, des éviers, des étagères et armoires remplies de matériel scientifique typique de ce qu'on trouve dans les écoles secondaires, une salle de préparation, une hotte, et même des postes Internet, des prises réseau et électriques, un projecteur multimédia, etc.

C'est cette infrastructure, initialement dédiée à l'enseignement, qui a été adaptée pour les besoins de nos recherches en éducation (Potvin & Riopel, 2008). Utilisée pour ces fins dans les plages horaires disponibles, elle peut accueillir 45 élèves et leur fournir le matériel nécessaire à des manipulations ou à des expérimentations « pratiques ». C'est la combinaison des aménagements et des équipements (retenus pour certaines procédures particulières) qui constitue une innovation technologique pour la recherche. Cette innovation répond au besoin d'obtenir des données de qualité pour soutenir la recherche sur l'apprentissage ouvert.

2. DIFFICULTÉS MÉTHODOLOGIQUES RENCONTRÉES DANS LA RECHERCHE SUR L'APPRENTISSAGE OUVERT EN SCIENCES ET SOLUTIONS QU'APPORTE L'INFRASTRUCTURE DE RECHERCHE

2.1. L'accès à des sujets

Dans les recherches en éducation sur l'apprentissage, il est toujours difficile d'accéder aux terrains. Les enseignants et les commissions scolaires (CS) sont en général assez réfractaires aux chercheurs qui viennent de l'extérieur et souhaitent exploiter les précieuses minutes consacrées ordinairement (et légitimement) à l'atteinte des objectifs pédagogiques. Les CS se sont donc munies de dispositifs de contrôle administratif des recherches qui se dérou-

lent dans leurs écoles. Les enseignants, qui vivent déjà des contraintes professionnelles très importantes (réussite de leurs élèves, pression des directions, des parents, etc.) ont également développé des réflexes défensifs qui ne sont pas sans poser de problèmes pour les chercheurs qui souhaitent accéder aux élèves, ne serait-ce que sur une base ponctuelle. On peut aussi penser que la bonne vieille « peur d'être jugé », peut également être à l'origine de certaines résistances. Mais surtout les enseignants se demandent ce qu'ils peuvent concrètement gagner à participer à ces recherches.

Devant ces difficultés manifestes à accéder aux sujets, nous avons reconnu le potentiel attracteur du CSM envers les écoles. Bon an mal an, des dizaines de milliers d'élèves du secondaire visitent ce musée. Nous avons donc pensé profiter de l'omniprésence de ces sujets potentiels pour leur offrir gracieusement l'accès au musée en échange d'une visite de 2 h 30 au LabUQAM (pour y effectuer les prétests et les tests). Le CSM, qui est partenaire dans le projet de recherche, a consenti à offrir un rabais aux élèves/sujets, et le reste est payé à même des fonds de recherche des professeurs-chercheurs impliqués. Depuis le début du projet, ce mécanisme nous a permis d'avoir accès à 300 sujets par trimestre d'expérimentation. Le CSM y gagne des clients, les chercheurs y gagnent des sujets et les élèves (et les écoles) y gagnent une journée dans un musée de science et une activité intéressante. Même si toutes les parties sont clairement au courant de l'initiative de recherche qui sous-tend cette « activité », son caractère ludique fait rapidement oublier cet aspect aux élèves et aux enseignants.

2.2. L'accès à des sujets *représentatifs*

Si l'accès à des sujets constitue un réel problème en recherche, celui de la représentativité des sujets est quant à lui insoluble. On peut penser en effet que, d'habitude, les classes qui se portent volontaires présentent des caractéristiques communes, que cette situation peut poser un problème dans la variabilité des caractéristiques des sujets, et donc un problème de représentativité. Dans le cas de l'activité des « défis électroniques », le recrutement se fait par le service des ventes du CSM. Il ne fait donc l'objet d'aucune distinction préalable. On peut estimer que les classes qui acceptent de se déplacer pour l'occasion présentent, elles aussi, des caractéristiques communes et particulières, mais on peut aussi penser que les ressemblances entre ces motivations sont moins grandes en réalité que celles

qui existent entre des classes qui acceptent de recevoir (au lieu de visiter) un chercheur. En effet, les motivations qui sous-tendent une sortie au musée sont certainement plus variées que celles qui sous-tendent une participation volontaire à une recherche « qui dérange ». Nous croyons donc que notre procédure de recrutement présente des qualités intéressantes et avantageuses du point de vue de la représentativité des sujets. Nous avons reçu en effet des groupes d'élèves dont les profils étaient très différents les uns des autres (groupes d'élèves en difficulté, standard, d'écoles privées, etc.). On peut penser que les enseignants seront plus enclins à faire des sorties avec des élèves plus « disciplinés », mais cet effet existe aussi pour les classes volontaires qui reçoivent des chercheurs.

2.3. L'accès à un grand nombre de sujets représentatifs

Au printemps 2008, l'activité des défis électroniques avait reçu et effectué des recherches sur un peu moins de 2 000 élèves. Nous savons que des enseignants, charmés par l'expérience, se sont engagés à ramener d'autres élèves pour les années à venir. L'activité, du point de vue de la participation des écoles, fut un succès. Le service des ventes du CSM a dû refuser des dizaines de groupes d'élèves intéressés (premier arrivé, premier servi). Du strict point de vue de la recherche sur le thème de l'apprentissage ouvert, l'activité des défis électroniques permet donc d'accéder à un grand nombre de sujets testés, ce qui est un avantage considérable quand vient le temps de constituer un argumentaire basé sur les faits.

2.4. L'accès à un grand nombre de sujets représentatifs et intéressés

L'activité des défis électroniques se réalise hors des murs de l'école (dans un musée de sciences), pendant une sortie scolaire et n'est pas encadrée par les enseignants habituels de l'élève. Ces derniers sont même tenus à l'écart du déroulement. L'activité est également très différente des activités scolaires habituelles, par sa forme pédagogique et la nature de la contrainte qu'elle propose. Elle présente également des caractéristiques qui la rapprochent davantage d'un jeu, ou d'un concours. Toutes ces caractéristiques font en sorte que les élèves, en réalisant l'activité, ne semblent pas l'associer à une activité d'apprentissage typique de l'univers scolaire dans lequel ils évoluent habituellement. Ils en sont donc plus détendus, même s'ils semblent tout de même la prendre très au sérieux. Nous

croions que cette situation fait en sorte que plusieurs d'entre eux ne vivent pas certains des blocages bien connus en éducation scientifique et qui surviennent parfois devant les activités étroitement associées au « scolaire ». Nous croyons en effet que les élèves se sentent libres des contraintes de coutume didactique habituellement associées à la vie de l'école (satisfaire l'adulte, obtenir de bons résultats scolaires, etc). Finalement, l'activité, même si elle contraint à l'apprentissage, stimule grandement les élèves et semble les captiver. Nous n'enregistrons que très peu de cas d'élèves démotivés. La très grande majorité semble éprouver un réel plaisir à la vivre, comme on a pu l'observer dans d'autres recherches récentes.

Les « défis électroniques » semblent donc constituer un contexte très favorable pour étudier le phénomène de l'apprentissage tel qu'il peut être libre des contraintes associées à la vie scolaire normale de l'élève. Nous croyons que les recherches qui impliquent les enseignants, qui se produisent sur les heures normales de cours et qui sont vécues dans les écoles, ne permettent pas d'en venir à ce que les élèves témoignent de manière aussi débridée de leurs capacités et de leurs intérêts.

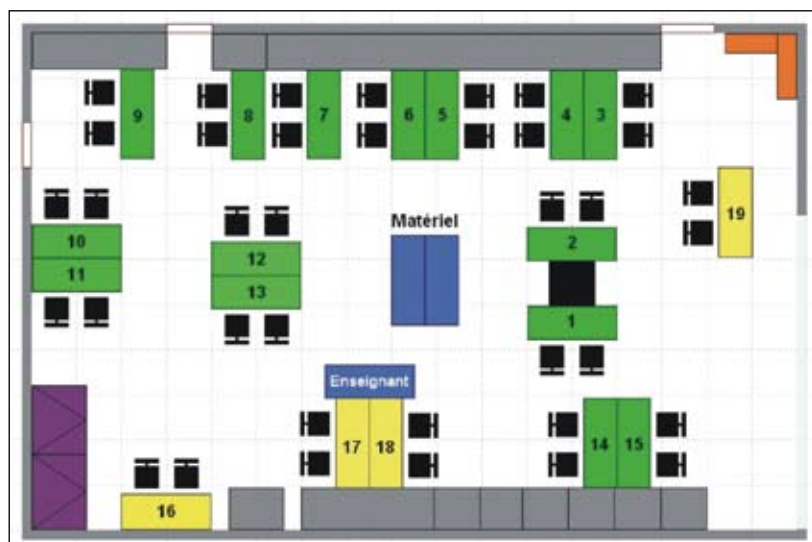
2.5. Contrôle des aménagements et du matériel

Lorsque les élèves pénètrent dans le LabUQAM, ils accèdent aux mêmes aménagements et au même matériel que tous les groupes d'élèves qui les ont précédés et qui les suivront. La configuration du local est également la même pour tous les groupes. La figure 1 donne cette configuration. L'ordre de remplissage du local est indiqué par les valeurs chiffrées indiquées sur les tables (fig. 1). Les élèves s'y placent en équipes libres (ou imposées selon les besoins de la recherche) de deux élèves (ou individuellement, selon – encore une fois – les objectifs que poursuit la recherche). Le matériel est toujours situé au même endroit et disposé sur la table de la même manière. De cette façon, pour chacun des groupes, l'aménagement et le matériel sont parfaitement identiques et ne peuvent constituer une source de « bruit » comme ce qui aurait pu être le cas en tenant l'expérience dans les écoles (locaux, disposition et pièces d'équipements différents). L'activité exige des déplacements, ces considérations sont donc importantes.

Les élèves ont un accès libre au matériel à la condition que leur choix de pièces (fils, ampoules, interrupteurs, etc.) n'excède pas

trop leurs besoins immédiats. Il peuvent donc circuler (un seul membre par équipe) pour aller chercher et rapporter les pièces nécessaires.

FIGURE 1
L'aménagement du LabUQAM



2.6. Contrôle des consignes

Un animateur leur adresse la bienvenue et leur donne quelques consignes de fonctionnement. Ces consignes sont toujours données de la même manière et sont réduites au minimum de manière à réduire un éventuel effet « animateur ». Les élèves doivent d'abord compléter un prétest de 8 questions à choix de réponse (voir figure 2 pour un exemple de questions). La période du test s'étend sur un maximum de 11 minutes.

FIGURE 2
Un exemple de questions

Question 2 sur l'électricité



2a) Sur quel (s) interrupteur(s) faut-il appuyer pour faire allumer l'ampoule? (Encerclez la bonne réponse)

A) L'interrupteur L
 B) L'interrupteur M
 C) Sur n'importe lequel des deux interrupteurs
 D) Sur les deux interrupteurs en même temps
 E) Je ne sais pas du tout

2b) Si vous avez répondu A, B, C ou D, encerclez un des deux visages suivants :

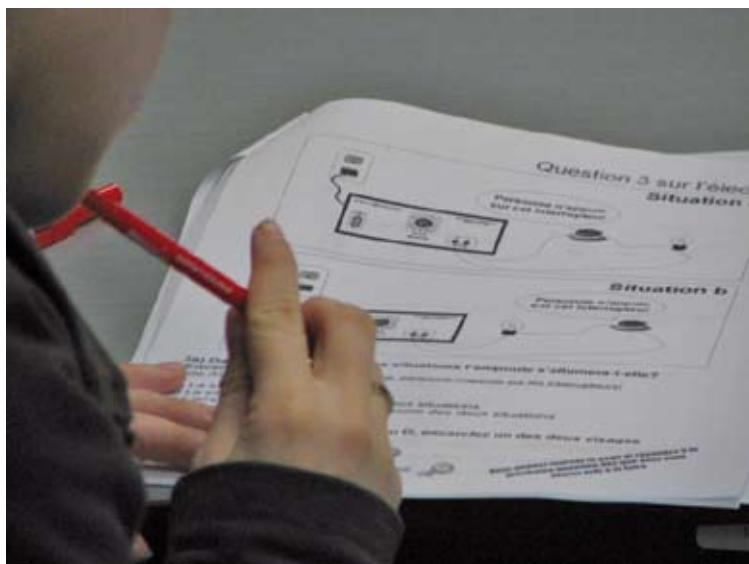
Je suis certain(e) de ma réponse 🤔
 J'ai quand même un doute sur ma réponse 🤔

Vous pouvez tourner la page et répondre à la prochaine question dès que vous vous sentez prêt à le faire

Ce délai est suffisant pour assurer que la très grande majorité des élèves finissent le test. Les élèves qui ne le finissent pas sont extrêmement rares.

FIGURE 3

Un élève en train de répondre aux questions du prétest



Ce questionnaire est également l'occasion de poser des questions aux élèves afin de cerner un certain nombre de variables contextuelles (âge, sexe, attitude générale par rapport aux sciences, etc.). Un questionnaire adressé à l'enseignant-accompagnateur permet d'obtenir certaines informations supplémentaires sur les élèves (perception de l'enseignant quant à la performance du groupe en science et technologie, quant aux performances de certains élèves, etc.).

Par la suite, les consignes de fonctionnement du test sont données par un film enregistré sur DVD et projeté sur grand écran. Ce film donne toutes les consignes relatives au fonctionnement de « défis ». Il présente le matériel, donne les consignes de déplacement, d'« homologation » des défis (voir plus loin), et présente les objectifs de la recherche et le processus de protection éthique des sujets. Il donne également aux élèves une autre chance d'indiquer qu'ils souhaitent qu'on n'utilise pas les données pour la recherche (ce qui ne les empêche pas cependant de vivre l'activité comme les autres élèves).

L'explication des consignes par le biais d'un film (format DVD) permet d'assurer que ces dernières ont été adressées exactement de la même manière. Certaines de nos expérimentations passées et basées sur des entretiens nous ont convaincus de l'extrême sensibilité des sujets aux consignes données et aux médiations (Potvin, 2002 ; Masson, 2005). Lors d'explorations libres, des élèves ont vu leurs pistes d'explorations facilement influencées par l'utilisation (par les intervieweurs) de certains mots plutôt que d'autres, par exemple. Nous croyons que mandater une personne pour adresser des consignes serait une entreprise risquée, surtout si cette personne n'est pas toujours la même ou si elle n'est pas directement impliquée dans la recherche ou si elle n'est pas bien au fait de ses objectifs ou des contraintes de la recherche en général.

2.7. Contrôle de la médiation et de l'effet « enseignant »

Dans le contexte de recherches tenues dans les milieux scolaires sur l'apprentissage, il est toujours difficile de distinguer l'effet « enseignant » de l'effet « enseignement ». Ainsi, une performance d'enseignement (au sens large, en incluant les consignes, les explications, la médiation, l'accompagnement, etc.) est nécessairement complexe, et ses composantes sont difficiles à discerner. Ainsi, un « bon » enseignant parviendra la plupart du temps à compenser certaines lacunes du cours, comme un bon accompagnement peut compenser un exposé oral peu réussi, ou comme un enseignant peut parfois arriver à compenser ses propres lacunes. On remarque aussi qu'un enseignement qui va « mal » va parfois mal pour un ensemble de raisons coordonnées les unes aux autres.

Il nous est donc apparu que, pour augmenter la valeur des données, il importait, dans toute la mesure du possible, de réduire la médiation à sa plus simple forme et aussi de limiter sa fréquence. Non seulement les consignes sont données par un film (voir précédemment), mais l'enseignement direct est pratiquement absent de la procédure. C'est l'avantage méthodologique que fournit l'apprentissage par la découverte. C'est le devis d'exploration (largement balisé par la formulation écrite de « défis » [voir plus loin]) qui définit les exigences et qui guide l'exploration. Il s'agit en effet d'une exploration libre, mais bien balisée (apprentissage par la découverte « structuré » apparenté à l'apprentissage par problème « micro » [Guilbert & Ouellet, 1997]). Dans cette activité, la médiation se limite à l'« homologation » par les animateurs de la réussite des

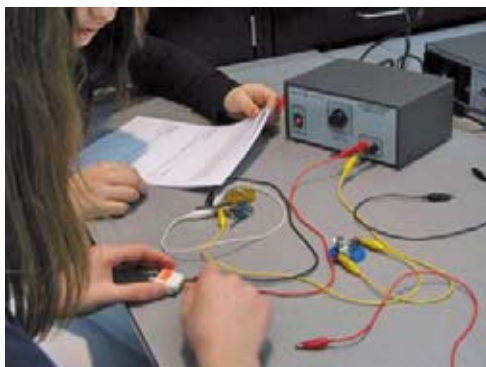
défis par les élèves. Les premiers se déplacent sur main levée et apposent leur signature sur chaque défi réussi (défis qui doivent d'ailleurs être réussis dans l'ordre). Ils s'assurent donc de la conformité de la construction du circuit par l'équipe de travail, et c'est à cela que leur rôle se limite. L'activité des « défis électroniques » est donc essentiellement une série de 20 défis à relever, ordonnés du plus simple au plus complexe et formulés qualitativement. Voici quelques exemples de ces défis :

- ◆ **Défi 1** : Faites s'allumer une ampoule
- ◆ **Défi 2** : Faites s'allumer deux ampoules
- ◆ ...
- ◆ **Défi 7** : Il faut appuyer sur l'un ou l'autre des deux interrupteurs pour faire s'allumer l'ampoule. Quand on appuie sur les deux en même temps, l'ampoule s'allume également.
- ◆ **Défi 8** : Il faut nécessairement appuyer sur les deux interrupteurs en même temps pour faire s'allumer l'ampoule.
- ◆ ...
- ◆ **Défi 20** : Une ampoule s'allume faiblement sans que l'on ait besoin d'appuyer sur un interrupteur. Quand on maintient l'interrupteur A appuyé, l'ampoule s'allume plus fortement. Quand on maintient l'interrupteur B appuyé, l'ampoule s'allume encore plus fortement (utilisez seulement 2 résistances de la même couleur).

L'activité est donc l'occasion pour les élèves de s'initier à la construction de circuits électriques en série, en parallèle ou mixtes et qui font intervenir sources, fils, ampoules, interrupteurs et résistances.

Tout au long de l'activité, en incluant le prétest, les élèves ont en leur possession une feuille référence, qui leur présente de manière succincte les différentes pièces disponibles et qui donne quelques mots sur leur fonctionnement. Cela a pour effet de réduire le nombre de questions posées par les élèves et qui pourraient faire l'objet de réponses divergentes de la part des animateurs.

FIGURE 4
Des élèves tentent de réussir les défis.



Ainsi, grâce à une médiation réduite au minimum, l'expérience évite certaines contaminations qui auraient eu pour effet d'augmenter le bruit qu'on observe souvent lors de l'analyse des données.

2.8. Contrôle des procédures et des durées

La procédure utilisée (ordre de présentation des activités, durées, etc.) est rigoureusement observée par les animateurs. Ils ont instauré entre eux des règles de fonctionnement et procèdent à des contrôles mutuels permanents sur la fidélité des procédures d'une séance à l'autre. Ils disposent également de films de certaines séances qu'ils écoutent de temps en temps pour assurer la répétition dans la durée.

Un certain roulement de personnel (animateurs) a cependant dû être fait pour accommoder les disponibilités de tous, mais systématiquement les nouveaux arrivants ont été formés par leurs prédécesseurs et ont pu contrôler la qualité de l'animation et la reproduction des conditions expérimentales.

2.9. Contrôle des effets de nouveauté

Le nombre important de sujets impliqués offre un dernier avantage. Il permet en effet d'éviter qu'un contexte d'apprentissage motivant pour les élèves (comme celui bien connu de l'utilisation d'ordinateurs dans l'enseignement) ne vienne influencer indûment les données motivationnelles ou les performances à la hausse. En

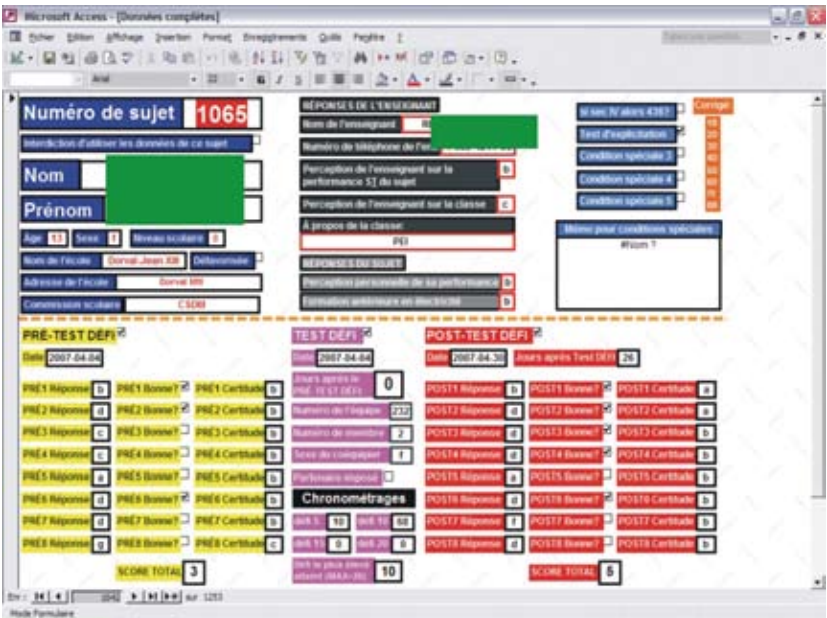
fait, ces effets existent bel et bien dans le cadre de l'activité, mais étant donné le nombre de sujets disponibles, les analyses permettent d'effectuer des soustractions entre des groupes suffisants de sujets (comme les garçons et les filles), d'éliminer ainsi les effets de nouveauté (« novelty effects ») et d'obtenir des différences pour les seuls paramètres qui sont différents d'un groupe à l'autre (comme de petites différences entre les traitements).

Ainsi, l'infrastructure, par la conservation d'un protocole dont la base est toujours la même, et à travers le nombre élevé de sujets, permet d'obtenir des analyses moins facilement critiquables.

3. QUELQUES RÉSULTATS À ANTICIPER

La constitution d'une banque de données basée sur les questionnaires et les enregistrements (durées) permet d'envisager des analyses qui impliquent toutes ces données et même au-delà, puisqu'il devient possible de les mettre en relation.

FIGURE 5
Les données telles qu'elles sont saisies dans le logiciel Access^{MD}



Par exemple, un article qui propose une analyse de l'évolution du doute chez des élèves qui vivent l'apprentissage par la découverte (Potvin, Riopel, Masson, & Fournier, accepté) est en voie de publication et un autre qui analyse cette dynamique, mais cette fois sous l'angle des différences garçons/filles, a été soumis.

L'existence d'une procédure bien standardisée pour soutenir la recherche permet aussi d'envisager la production de données qui peuvent facilement apporter des éléments de réponse à d'autres questions de recherche. En effet, il suffit, lors des expérimentations, de faire varier un paramètre pour observer l'effet de cette variation. Si, par exemple, on pose la question de l'effet de l'âge ou de la durabilité des apprentissages, il n'y a qu'à accueillir des élèves plus vieux ou plus jeunes ou à faire varier le délai du post-test.

Un autre exemple : en éducation scientifique, l'effet d'une explicitation publique (en classe) des multiples conceptions d'élèves est souvent présumée pouvoir déclencher un conflit cognitif plus évident et éventuellement plus efficace, puisque les élèves peuvent mieux percevoir la différence entre certaines conceptions initiales et les conceptions scientifiques (Nussbaum & Shari-Dagan, 1983 ; Strike, Posner, Hewson, & Gertzog, 1982 ; Nussbaum & Novick, 1982). Cependant, cet a priori n'a (à notre connaissance) jamais fait l'objet d'une vérification. Certaines observations nous laissent plutôt penser qu'au contraire, une telle explicitation risque en quelque sorte de « contaminer » les élèves par des idées qu'ils n'auraient peut-être pas eues autrement. On courrait donc le risque de voir se multiplier les idées non scientifiques que l'on cherche pourtant à affaiblir. Nous avons donc envisagé de tenir des séances expérimentales où nous ajoutons une étape à notre protocole standardisé pour observer les changements – positifs ou négatifs – qui pourraient en résulter. Les premiers résultats – peu significatifs – nous ont amenés à faire des ajustements. C'est donc une histoire à suivre. D'autres résultats pourront également être obtenus par l'analyse des perceptions des élèves et des enseignants.

Le protocole « défis électroniques » tenu au LabUQAM constitue également une invitation adressée à la communauté des chercheurs en éducation scientifique. Si certains d'entre eux souhaitent utiliser la banque de données ou proposer des modifications du protocole standard de manière à renforcer les résultats issus de leurs propres initiatives de recherche, ils sont chaudement invités

à communiquer avec les responsables du projet de manière à entrevoir des collaborations.

CONCLUSION

Même si leurs activités se poursuivent, le développement des « défis électroniques » n'est pas encore achevé. Les premières critiques et les premiers résultats permettent d'entrevoir des pistes de développement intéressantes :

- ◆ validation plus solide du test/re-test,
- ◆ amélioration de la séquence des défis,
- ◆ utilisation d'un post-test immédiat en plus d'un post-test avec délai, mesure de variables contextuelles mieux adaptées et ciblées sur d'autres considérations (par exemple, les attitudes des élèves par rapport aux concepts de base en électricité),
- ◆ observations de manifestations de *compétences* en plus des manifestations de conceptions scientifiques ou non scientifiques,
- ◆ ajout d'entrevues permettant d'accéder à un niveau d'interprétation plus fondamental,
- ◆ etc.

L'expérience peut donc poursuivre ses efforts d'améliorations successives.

En définitive, nous croyons que l'utilisation d'un tel protocole expérimental présente des avantages manifestes en ce qui concerne l'accès aux sujets et le contrôle des variables expérimentales, et constitue par le fait même une contribution intéressante pour la recherche expérimentale en éducation. Bien que les autres types de devis de recherche présentent des avantages évidents et exclusifs, il reste qu'une utilisation presque systématique et parfois exclusive de devis quasi expérimentaux ne rendent pas service à certains champs. Ces derniers risquent en effet d'être trop facilement perçus comme réductibles aux idéologies qui les sous-tendent s'ils ne présentent pas de mesures qui contiennent un minimum de précautions méthodologiques. Il existe aussi ces recherches qui impliquent de petits nombres de sujets ou des conditions expérimentales qui

rendent les interprétations et les inférences discutables et peu convaincantes.

Nous croyons donc que l'infrastructure LabUQAM et l'activité des « défis électroniques qui y est tenue permettent de résoudre ou à la rigueur d'atténuer certaines des difficultés importantes liées aux recherches en éducation et qui portent sur l'apprentissage en contexte ouvert. Nous croyons aussi qu'elle permet d'augmenter substantiellement la valeur scientifique des résultats présentés.

REMERCIEMENTS

Merci à Éric Durocher, Maude Bouchard-Fortier, Guillaume Cyr, Jean-Mathieu Lavoie-Lebeau, Jean-Sébastien Renaud, Amélie Perron-Singh, Sophie Bérard, Maxime Langevin, qui assurent l'animation des groupes en même temps que la collecte et la saisie des données de recherche et même dans certains cas la diffusion des résultats (Lavoie-Lebeau, Renaud, & Potvin, 2007). Leur travail acharné et assidu, essentiel au fonctionnement de la recherche, et leur engagement envers le projet ont assuré son succès et sa qualité. Merci également pour les réflexions et la bonne humeur qu'ils apportent avec eux à chaque séance.

Merci également au Centre des sciences de Montréal, à son personnel et particulièrement à Isabel Dansereau, Judith Camiré et Monique Camirand pour leur participation à l'organisation des journées « défis électroniques » au LabUQAM.

BIBLIOGRAPHIE

- Guilbert, L., & L. Ouellet (1997), *Étude de cas. Apprentissage par problèmes*. Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec.
- Lavoie-Lebeau, J.-M., J.-S. Renaud & P. Potvin, (2007), « Des garçons plus au courant que les filles ? », *Spectre, Revue de l'association des professeurs de sciences du Québec*, 36 (4).
- Masson, S. (2005), *Effets de l'utilisation de micromondes historiques sur les processus de changement conceptuel en science*, mémoire de maîtrise. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal.
- Nussbaum, J., & S. Novick(1982), « Alternative Frameworks, Conceptual Conflict and Accommodation : Toward a Principled Teaching Strategy » *Instructional Science*, 11, p. 183-200.

- Nussbaum, J., & N. Sharoni-Dagan (1983), « Changes in Second Grade Children's Preconceptions About the Earth as a Cosmic Body... », *Science Education*, 67(1), p. 99-114.
- Potvin, P. (2002), *Regard épistémique sur une évolution conceptuelle en physique au secondaire*, Thèse de doctorat. Thèse de doctorat non-publiée, Université de Montréal, Montréal.
- Potvin, P., & M. Riopel (2008), *Le LabUQAM, un dispositif technologique pour la recherche sur l'apprentissage ouvert en sciences*. Conférence publique dans le cadre des activités du CREAS.
- Potvin, P., M. Riopel, S. Masson & F. Fournier, (Accepté). « Problem-centered learning vs. teacher-centered learning : an analysis of the dynamics of doubt », *Journal of Applied Research in Education*.
- Strike, K., G. J. Posner, P. W. Hewson, & W. A. Gertzog, (1982), « Accomodation of a Scientific Conception : Toward a Theory of Conceptual Change », *Science Education*, 66(2), p. 211-227.

CHAPITRE 7



L'utilisation des simulations informatisées pour la recherche en éducation

Gilles Raïche, Université du Québec à Montréal

Komi Sodoké, Université du Québec à Montréal

Jean-Guy Blais, Université de Montréal

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

David Magis, Katholieke Universiteit Leuven

RÉSUMÉ

Les méthodes de recherche en éducation se sont beaucoup développées au cours des dernières années. Pour les soutenir, des outils informatiques permettent d'automatiser diverses tâches répétitives et fastidieuses, ainsi que d'accélérer leur vitesse d'exécution. La capacité de réaliser la simulation, par méthodes stochastiques ou non stochastiques, de phénomènes impossibles à imaginer auparavant est une de ces tâches. Dans ce chapitre, nous définirons la notion

de simulation en contexte de recherche, présenterons des principes et des méthodologies spécifiques de la mise en œuvre d'une simulation, et nous illustrerons ces principes et méthodologies à partir de quelques exemples tirés de nos travaux de recherche.

INTRODUCTION

Les méthodes de recherche en éducation se sont beaucoup développées au cours des dernières années. Les outils informatiques ont grandement contribué à ce développement en permettant d'automatiser diverses tâches répétitives et fastidieuses, et d'accélérer leur vitesse d'exécution. Parmi ces tâches, soulignons la simulation de divers phénomènes. Il existe plusieurs façons de réaliser une simulation au regard des méthodes de recherche. Ce chapitre vise à 1) expliquer ce qui est entendu par le concept de simulation lorsqu'il est question de méthodologie de recherche, 2) déterminer quelques approches classiques, et 3) donner quelques exemples tirés de nos propres travaux de recherche.

1. CONCEPT DE SIMULATION

Une simulation est une reproduction simplifiée d'un phénomène. Elle permet de modéliser une situation dans laquelle on peut manipuler des paramètres sans avoir à se méfier de l'intervention potentielle de variables parasites. Des informations sont intégrées à un modèle (intrants) et des résultats conséquents sont observés (extrants) (Bratley, Fox et Schrage, 1987 ; van der Maren, 2003). Les observations qui découlent d'une simulation peuvent ainsi être interprétées strictement au regard du modèle impliqué.

Bien sûr, le modèle sous-jacent à une simulation consiste toujours en une représentation générale et réduite de la réalité (van der Maren, 2003, p. 258-260). En ce sens, les interprétations qui en découlent doivent être utilisées avec prudence. On fait usage de simulations et de modèles tous les jours, et pas seulement à l'intérieur de travaux de recherche. Par exemple, un enseignant qui surveille ses élèves lors de la passation d'une épreuve certificative en mathématiques doit prévoir des scénarios, soient des modèles, qui sont des indicateurs de plagiat potentiel. Un élève, pour sa part, qui cherche à réussir une tentative de plagiat doit se constituer un modèle de l'enseignant pour lui permettre de déjouer, en contrepartie, sa surveillance.

Une simulation peut avoir une fonction strictement exploratoire ou strictement confirmatoire. Elle a une fonction exploratoire lorsqu'il est difficile d'élaborer a priori une ou des hypothèses qui permettraient de prédire les résultats observés, qui peuvent ultérieurement être utiles à l'élaboration d'hypothèses. Elle a une fonction confirmatoire lorsqu'elle est utilisée pour vérifier la véracité d'une hypothèse. En fait, on peut considérer un dispositif de simulation comme un plan de recherche qui peut aussi bien viser à confirmer les résultats attendus en fonction d'une théorie (confirmation et déduction) ou tout simplement à expliquer des résultats par induction (exploration).

Plus le modèle est complexe, plus les opérations à effectuer pour réaliser une simulation sont complexes, ceci au point d'exiger l'utilisation d'un ordinateur. Dans certains cas, le modèle est tellement complexe que les ordinateurs disponibles ne sont pas assez puissants pour permettre d'en réaliser une simulation réaliste.

2. QUELQUES APPROCHES CLASSIQUES

Dans le contexte des méthodes de recherche, on peut généralement classer les méthodes de simulation en deux catégories : non stochastiques ou stochastiques.

2.1. Simulations non stochastiques

Les simulations non stochastiques consistent à manipuler des variables propres à un modèle préalablement spécifié et à observer le résultat de cette manipulation. Dans ce contexte, le chercheur peut déterminer à l'avance les différentes valeurs que peuvent prendre les variables à manipuler (intrants) et observer leur impact sur les extrants du modèle à l'étude. Généralement, seul un intervalle de valeurs d'intérêts des variables à manipuler est considéré. Dans d'autres situations, la manipulation des variables, ou de certaines d'entre elles, est laissée à la discrétion de composantes mêmes du modèle, composantes qui peuvent, par exemple, être des élèves. Ainsi, des élèves pourraient avoir à manipuler eux-mêmes les paramètres d'une simulation de phénomènes physiques au regard de certaines situations préalablement conçues par le chercheur. Dans le premier cas, il pourrait s'agir d'une expérience informatique contrôlée (Edginton et Onghena, 2007 ; Fang, Li et Sudjianto, 2006) au sens d'un plan expérimental. Dans la seconde situation, on aurait

plutôt affaire à un plan quasi expérimental ou pseudo expérimental, selon le cas.

2.2. Simulations stochastiques

Une simulation est dite stochastique lorsque la manipulation des variables affectant les résultats du modèle, soit les intrants, est effectuée selon un modèle probabiliste contrôlé par l'expérimentateur. Deux situations peuvent alors se produire. Dans la première, le modèle probabiliste est censé reposer sur une distribution de probabilité, continue ou discrète, connue. Les expérimentations Monte-Carlo sont de ce type (Bratley et Schrage, 1987 ; Laurencelle, 2001). Il est fréquent d'utiliser les distributions de probabilité normale $N(\mu, \sigma^2)$ ou binomiale $B(n, p)$ à cet effet, car elles peuvent représenter avec suffisamment de précision un grand nombre de phénomènes. Cependant, dans certaines situations il est préférable d'utiliser des distributions de probabilité qui reflètent plus adéquatement le phénomène à l'étude. En éducation, ces distributions de probabilité alternatives (Freund et Walpole, 1980) ne sont pas fréquemment utilisées, même si elles permettraient de simuler des situations d'intérêt. Par exemple, la loi de Poisson $p(x, \lambda)$ est utile pour modéliser le temps des files d'attente, soit le nombre de personnes n qui se présentent en moyenne à un guichet après un intervalle de temps t donné. On pourrait facilement l'utiliser pour simuler des files d'admission à des programmes d'études ou encore des demandes d'information de la part des élèves avant un examen. Un autre exemple est celui des distributions de probabilité destinées à modéliser la probabilité de réalisation des événements rares. À ce sujet, les distributions de Weibull, de Raleygh ou exponentielles sont appliquées principalement en contrôle de la qualité pour représenter la probabilité qu'une erreur se produise après un certain délai temporel et, en actuariat, pour modéliser le taux de décès ou d'accidents après un certain temps. On pourrait imaginer leur utilisation pour simuler le temps requis pour obtenir un diplôme de 2^e ou de 3^e cycle universitaire.

Dans une autre situation, le modèle probabiliste ne repose pas sur une distribution de probabilité connue et doit alors prendre en compte la distribution de probabilité empirique directement obtenue à partir de données en main. Les expérimentations par méthodes de rééchantillonnage avec (*bootstrap*) ou sans (*permutation test*) remise en sont des exemples, ainsi que par l'estimateur de

Quenouille-Tukey (*jackknife*) (Davison et Hinkley, 1997 ; Edgington et Onghena, 1997 ; Efron, 1979 ; Efron et Tibshirani, 1993 ; Lebart, 1982, p. 70-73 ; Manley, 2007 ; Quenouille, 1956 ; Raïche, Tétreault, Banville et Richard, 2005 ; Rizzo, 2008 ; Tukey, 1958). La méthode de rééchantillonnage avec remise est probablement la plus utilisée actuellement. Elle consiste à utiliser, à une première étape, des données d'expérimentation et à tirer au hasard, avec remise, un nombre d'observations égal à la taille de l'échantillon en main. On calcule ensuite, à une seconde étape, un ou des estimateurs statistiques d'intérêt ou on effectue des tests de signification statistiques. On répète cette opération un grand nombre de fois et on calcule, à la toute fin, la moyenne et l'écart type des statistiques retenues à la seconde étape. Cette stratégie est fort utile lorsque les statistiques d'intérêts ou les tests statistiques ne peuvent pas être décrits par une distribution de probabilité connue ou, encore, que celle-ci est extrêmement complexe à calculer.

2.2.1. Simulations totalement stochastique et partiellement stochastiques

Une simulation est dite totalement stochastique lorsque tous les intrants sont générés de manière aléatoire selon une distribution de probabilité, continue ou discrète, connue ou par une technique de rééchantillonnage avec ou sans remise. Il est toutefois possible que seules certaines variables soient manipulées de manière aléatoire, tandis que d'autres sont fixées de manière non stochastique par l'expérimentateur. On parlera ici de simulation partiellement stochastique, quoiqu'on aurait pu utiliser le terme simulation mixte.

2.2.2. Techniques de réduction de la variance des estimateurs stochastiques

Les simulations stochastiques fournissent des observations sur les extrants qui sont aussi décrits par une distribution de probabilité et par des paramètres qui leur sont associés. Bien sûr, la précision avec laquelle ces paramètres sont estimés est tributaire du nombre de simulations qui sont effectuées. Dans certains cas, cela ne cause pas beaucoup de problèmes, par exemple, lorsque le nombre de simulations nécessaires est peu important ou que le modèle utilisé est peu complexe. Si ce n'est pas le cas, toutefois, il peut être nécessaire de recourir à des stratagèmes mathématiques

qui permettent de réduire la variance des estimateurs des paramètres et ainsi de maintenir leur précision tout en utilisant un nombre restreint de répétitions de la simulation (Bratley et Schrage, 1987, p. 44-74 ; Laurencelle, 2001, p. 191-212).. Les stratégies usuelles sont les techniques de l'antivariable (*antithetic variate*), de la covariable (*control variate*), de la stratification et de l'échantillonnage par importance (*importance sampling*).

À titre d'exemple, la technique de l'antivariable (Bratley et Schrage, 1987, p. 56-57), une des plus simple, consiste à produire deux variables aléatoires x et x' qui ont toutes deux la même moyenne et la même variance $N(\mu, \sigma^2)$, mais qui sont négativement corrélées entre elles. Leur moyenne est alors égale à

$$\hat{x} = (x_1 + x_2) / 2, \quad \text{Équation 1}$$

soit la même que pour chacune d'entre elles, tandis que la variance de leur moyenne est égale à

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{x}}^2 &= \sigma_{((x_1+x_2)/2)}^2 \\ &= [\sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + 2\sigma_{x_1} \sigma_{x_2} \rho_{x_1x_2}] / 4. \end{aligned} \quad \text{Équation 2}$$

On remarque alors que, lorsque la corrélation entre x et x' est négative, la variance de \hat{x} est moindre que celles des variables x et x' , alors dites antithétiques, prises individuellement.

Les techniques de réduction de la variance des estimateurs stochastiques sont particulièrement utiles lorsqu'on s'intéresse à des valeurs extrêmes des distributions de probabilité, où la fréquence d'apparition de ces valeurs est très faible. Pour assurer une précision acceptable de leur estimation, il est nécessaire de réaliser un nombre considérable de répétitions de la simulation, ce qui engendre des temps de calcul malheureusement trop importants pour être effectués. Les techniques de réduction de la variance sont alors tout à fait appropriées.

3. CINQ EXEMPLES

Cinq exemples tirés de nos travaux sont maintenant présentés. Le premier est représentatif d'une simulation de type non stochastique, tandis que les deux suivants illustrent des simulations totalement stochastiques, et les deux derniers des simulations partiellement stochastiques.

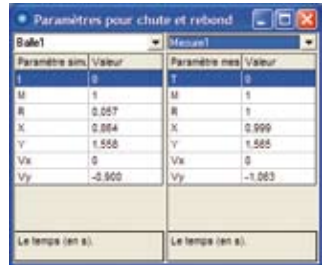
3.1. Exemple d'une simulation non stochastique

Le premier (figure 1) illustre une simulation non stochastique cherchant à vérifier l'impact sur l'apprentissage d'un simulateur en physique (Riopel, Raïche, Fournier et Nonnon, 2007). L'élève manipule des paramètres dans une fenêtre et en observe l'impact sur les résultats obtenus à partir d'une représentation graphique des variables dépendantes du modèle sous-jacent.

À la figure 1, la chute d'un ballon qui tombe de la fenêtre d'un cinquième étage est simulée. De courtes séquences vidéo de la chute sont filmées à l'aide d'une caméra numérique. L'élève commence habituellement par visionner la séquence à quelques reprises en utilisant des fonctionnalités logicielles similaires à celles d'un magnétoscope. Ensuite, il peut choisir d'obtenir les mesures des positions successives du ballon (figure 1a) en pointant, à l'endroit approprié, sur chacune des images de la séquence vidéo. L'élève peut ensuite choisir d'afficher certaines représentations graphiques de l'évolution des variables (figure 1c). Sur la fenêtre d'animation du centre (figure 1b), chacun des points 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.

Une telle simulation est doublement utile. Premièrement, elle sert

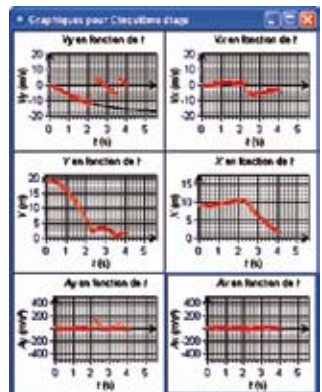
FIGURE 1
Exemple de fenêtre des paramètres (haut), de graphiques produits et de mesures obtenues (bas) (adapté de Riopel, Raïche, Fournier et Nonnon, 2007)



a)



b)



c)

à des fins pédagogiques, pour permettre à l'élève d'expérimenter diverses situations qui l'amèneront à comprendre le phénomène physique derrière le déplacement du ballon. Deuxièmement, puisque tous les choix effectués par l'élève peuvent être conservés, la simulation est utile aussi à un enseignant pour saisir les erreurs d'apprentissages potentiels, qu'à un chercheur pour comprendre les mécanismes d'apprentissage sous-jacents à ces manipulations.

3.2. Exemple d'une simulation totalement stochastique

Le second exemple illustre une simulation totalement stochastique visant à vérifier certains postulats concernant la distribution de probabilité de l'estimateur du niveau d'habileté d'un élève (extrant) dans un contexte d'évaluation assistée par ordinateur (Raïche, 2004). Plus particulièrement, il est question de l'évaluation à partir de tests dits adaptatifs, en ce sens que les questions qui sont posées à un élève sont tributaires de ses réponses aux questions précédentes. S'il donne une bonne réponse à une question, le niveau de difficulté de la question suivante sera plus élevé. Au contraire, s'il donne une mauvaise réponse, la prochaine question sera plus facile. Le test se termine lorsqu'on juge que la précision du score obtenu est suffisamment grande. Puisque deux élèves qui ont répondu à des questions présentant des niveaux de difficulté moyens différents peuvent obtenir le même pourcentage de bonnes réponses, ce score n'est plus utile pour les comparer entre eux. De plus, la précision désirée du score peut impliquer un nombre différent de questions à poser à chaque élève. Pour ces raisons, les tests adaptatifs doivent utiliser une modélisation alternative du niveau d'habileté de l'élève. Dans ce but, le niveau d'habileté est généralement estimé à partir d'une modélisation probabiliste issue de la théorie de la réponse à l'item (Lord, 1980). Ainsi, selon la modélisation à un paramètre (le modèle de Rasch), lorsque le niveau d'habileté d'un élève est égal à θ , la probabilité qu'il obtienne une bonne réponse à une question i d'un niveau de difficulté b_i est égale à

$$P(x_i | \theta, b_i) = \frac{1}{1 + e^{-(\theta - b_i)}}. \quad \text{Équation 3}$$

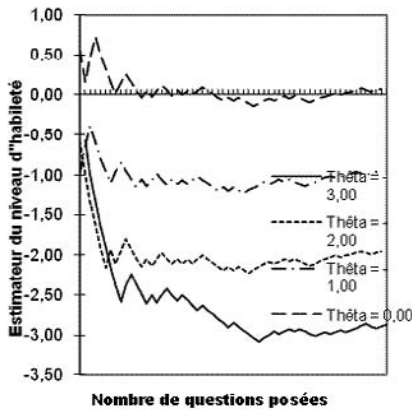
Dans un test adaptatif, le niveau de difficulté des questions qui sont soumises à un élève se rapproche de plus en plus de son niveau d'habileté lorsque le nombre de ces questions augmente. À partir de quel nombre de questions doit-on décider de cesser le test ?

Pour répondre à cette question, nous avons utilisé la modélisation illustrée par l'équation 3 pour générer aléatoirement des réponses à des questions données à des élèves fictifs dont le niveau d'habileté est lui aussi généré aléatoirement. Le niveau de difficulté de chacune des questions est pour sa part lui aussi obtenu strictement de manière aléatoire en le fixant à la valeur du niveau d'habileté estimé après la passation de la question précédente.

La simulation (figure 2) a permis de constater que, quel que soit le niveau d'habileté simulé selon une distribution de probabilité normale $N(\mu, \sigma^2)$ du niveau d'habileté de l'élève, à partir de 12 questions, on obtient une estimation suffisamment précise. Il aurait été impossible d'obtenir cette information sans réaliser une simulation avec des élèves fictifs, car on ne peut pas, bien sûr, connaître à l'avance le niveau d'habileté d'un élève réel.

FIGURE 2

Estimateur du niveau d'habileté dans un test adaptatif selon le nombre de questions posées et quatre valeurs du niveau d'habileté (adapté de Raïche, 2004)



3.3. Exemple d'une simulation partiellement stochastique

Ce troisième exemple illustre une simulation partiellement stochastique. Raïche et Blais (2003) ont voulu, dans une optique exploratoire, établir une valeur critère à un indice statistique destiné à la détection d'élèves qui tentent de « sous-performer » volontairement à un test de placement au collégial. Les élèves qui réussissent à « sous performer » de manière optimale sont alors inscrits à l'intérieur d'un cours moins exigeant pour eux : ils peuvent donc fournir moins d'efforts dans leurs études ou accorder moins de temps à leur travail scolaire par la suite.

L'indice en jeu, L_z , a préalablement été utilisé par plusieurs auteurs (Kabaratsos, 2003) pour déterminer des patrons de réponses inusités ou inappropriés lors de la passation de tests. Actuellement, il est considéré comme l'un des plus performant. L_z est tributaire des modélisations issues de la théorie de la réponse à l'item, par exemple celle présentée à l'équation 3, et est calculé, à partir de la réponse par un élève à i items dont le niveau de difficulté b_i est connu à l'avance, comme suit :

$$\frac{L_0 - E(L_0)}{\text{var}(L_0)^{1/2}}, \tag{Équation 4}$$

où

$$L_0 = \sum_i [x_i \ln\{p(x_i = 1 | \theta, b_i)\} + (1 - x_i) \ln\{p(x_i = 0 | \theta, b_i)\}], \tag{Équation 5}$$

$$L_0 = \sum_i [x_i \ln\{p(x_i = 1 | \theta, b_i)\} + (1 - x_i) \ln\{p(x_i = 0 | \theta, b_i)\}] \tag{Équation 6}$$

et

$$\text{var}(L_0) = \sum_i \left[p(x_i = 1 | \theta, b_i) p(x_i = 0 | \theta, b_i) \left\{ \ln \frac{p(x_i = 1 | \theta, b_i)}{p(x_i = 0 | \theta, b_i)} \right\}^2 \right] \tag{Équation 7}$$

Toutefois, la détection des patrons de réponses inappropriés à partir de L_z est moins optimale, puisque, selon certains (Molenaar et Hoijtink, 1990 ; van Krimpen-Stoop et Meijer, 1999), la valeur critère pour juger qu'un patron de réponses est inapproprié varie en fonction des items qui composent un test, ainsi qu'en fonction du niveau d'habileté de l'élève.

Dans le contexte de la passation d'un test de placement particulier utilisé dans le réseau collégial québécois, Raïche (Raïche et Blais, 2003) s'est intéressé à déterminer cette valeur critique. Premièrement, il s'avérait impossible de tenter de déterminer cette valeur critère à partir des résultats obtenus par de vrais élèves, puisque, bien sûr, si certains avaient tenter de « sous-performer » volontairement, il était impossible de connaître leur niveau d'habileté réel. D'ailleurs, même avec les autres élèves, le niveau d'habileté calculé n'est qu'un estimé et non pas la valeur réelle. C'est pourquoi la mise à l'essai de l'indice de détection ne pouvait être réalisée qu'à partir de la simulation des réponses qu'auraient données des élèves aux i questions du test de placement. De plus, il fallait simuler différents comportements de la part des élèves : un comportement d'élèves qui répondraient honnêtement et des comportements d'élèves qui tenteraient de « sous-performer » volontairement. Puisque plusieurs élèves ont indiqué que pour « sous performer » à ce test, ils donneraient soit des réponses au hasard soit de mauvaises réponses (réponses inversées), nous avons retenu la simulation de stratégies basées sur ces deux comportements en les appliquant à 10 % des premières questions du test, soit aux neuf premières questions. L'analyse a été effectuée à chacun des niveaux de placement du test, soit quatre niveaux. La valeur critère de L_z à utiliser, a été déterminée comme étant le 5^e percentile de la distribution empirique simulée de L_z à chacune des valeurs moyennes de θ simulé associées à chacun des niveaux de placement du test. Puisque le 5^e percentile était utilisé et que très peu d'observations se retrouvent à cette valeur limite de la distribution de probabilité, un grand nombre de répétitions de la simulation ont dû être prises en compte.

Afin d'illustrer quelques résultats obtenus à partir de cette simulation, l'efficacité de la stratégie de sous-performance volontaire à partir de réponses au hasard aux neuf premières questions du test est présentée au tableau 1 (10 % de réponses au hasard). Son résultat est comparé à celui d'un élève qui aurait répondu honnêtement (0 % de réponses au hasard). On peut y remarquer qu'un élève qui répond honnêtement est plutôt rarement placé à un niveau inférieur à son niveau réel. Cela se produit tout au plus dans 17,60 % des cas pour un élève de niveau 1, situation de peu d'intérêt pour un problème qui vise principalement les élèves d'un niveau plus élevé. Dans le cas des élèves qui ont utilisé une stratégie de sous-performance volontaire, on remarque que cette stratégie de la part d'un élève simulé est très efficace, surtout chez ceux qui sont à un niveau réel élevé. Ainsi, un

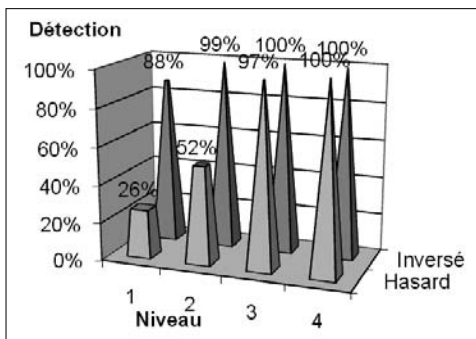
élève de niveau 4 se retrouvera placé dans un cours de niveau 3 dans 25,03 % des cas, et même au niveau 2 dans 74,90 % des cas.

TABLEAU 1
Efficacité pour un élève de répondre au hasard
au TCALS II

Niveau réel	Stratégie	Mise à niveau	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 5
Mise à niveau	0 %	98,57 %	1,43 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
	10 %	99,63 %	0,37 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %
Niveau 1	0 %	17,60 %	81,20 %	1,20 %	0,00 %	0,00 %
	10 %	33,90 %	66,07 %	0,03 %	0,00 %	0,00 %
Niveau 2	0 %	0,00 %	12,40 %	80,24 %	7,14 %	0,22 %
	10 %	0,00 %	31,98 %	67,98 %	0,04 %	0,00 %
Niveau 3	0 %	0,00 %	0,00 %	10,70 %	59,93 %	29,37 %
	10 %	0,00 %	0,00 %	95,00 %	5,00 %	0,00 %
Niveau 4	0 %	0,00 %	0,00 %	0,00 %	12,53 %	87,47 %
	10 %	0,00 %	0,00 %	74,90 %	25,03 %	0,07 %

La figure 3, pour sa part, permet d'illustrer le taux de détection atteint par l'indice L_z à chaque niveau d'habileté réel de l'élève simulé, et selon les deux stratégies de sous-performance volontaire : réponses au hasard ou réponses inversées. On remarque que c'est dans le cas de la stratégie de réponses inversées que le taux de détection est le plus élevé. Il est parfait ou presque parfait aux niveaux 2, 3 et 4. Même au niveau 2, il est très élevé (88 %). Lorsque la stratégie est de répondre au hasard, ce n'est qu'aux niveaux 3 et 4 que le taux de détection est élevé : 97 % et 100 % respectivement.

FIGURE 3
Taux de détection des patrons de réponses aberrants
lorsque 10 % des questions sont affectées en fonction
du niveau de classement réel et de la stratégie adoptée



Cette simulation constitue un bel exemple de l'importance de l'utilisation d'une technique de réduction de la variance des estimateurs stochastiques. Comme nous l'avons souligné préalablement, le nombre de répétitions de la simulation a été élevé pour obtenir un estimé suffisamment précis du 5^e percentile de l'indice L_z à chaque niveau du placement. En fait, il a fallu répéter 2 000 fois la simulation pour obtenir au moins 100 valeurs de L_z ($2\,000 * 5\%$) à chaque niveau et en fonction de chaque stratégie des sous-performances volontaires étudiées. Cela sans compter tous les essais pour tester le code source utilisé aux fins de ces simulations. L'utilisation d'une technique de réduction de la variance de l'estimateur de L_z aurait permis de sauver beaucoup de temps machine et, de plus, d'envisager obtenir une plus grande précision encore dans l'estimation des valeurs critères de l'indice L_z .

3.4. Exemple d'une simulation stochastique avec rééchantillonnage avec remise

Banville, Richard et Raïche (2004) ont étudié l'utilisation que font des éducateurs physiques francophones du Canada des 11 styles d'enseignement décrits par Mosston et Ashworth en 1994. Des analyses de variance ont été appliquées pour comparer les moyennes dans l'utilisation des styles tel que l'a mesurée une traduction en langue française d'un questionnaire américain (Kulinna, Cothran et Zhu, 2000). C'est uniquement en fonction de la durée des cours et du niveau enseigné qu'ils ont noté des différences statistiquement significatives.

Cependant, Banville, Richard et Raïche, incitaient à la prudence face à ces résultats, car les coefficients d'asymétrie et de kurtose associés à trois des styles d'enseignement affichaient des valeurs beaucoup trop élevées (a^3 et $a^4 \geq 1,0$) et risquaient d'affecter la distribution d'échantillonnage sous-jacente aux analyses multivariées qu'ils allaient effectuer. Il est toutefois possible que ces auteurs aient adopté une attitude trop conservatrice au point de vue statistique et qu'ainsi ils se soient montrés trop prudents.

Pour le vérifier, Raïche, Tétreault, Banville et Richard (2005) ont tiré au hasard 2 000 échantillons avec remise (*bootstrap*) à partir des 388 observations obtenues à l'intérieur de l'étude préalable de Banville, Richard et Raïche. Les histogrammes de fréquence, les moyennes, les erreurs types, les coefficients d'asymétrie et de

kurtose, ainsi que les intervalles de confiance à 95 % de la distribution d'échantillonnage des moyennes obtenues à ces 2 000 échantillons à chacune des trois échelles ont été ensuite analysés.

La mise en garde de Banville, Richard et Raïche n'est pas soutenue par les résultats de la simulation. À cet égard, les coefficients d'asymétrie et de kurtose de chacune des distributions d'échantillonnage simulée sont sans exception sensiblement inférieurs à 1 en valeur absolue. De plus, les valeurs obtenues par simulation des erreurs types sont, à une décimale près, égales aux valeurs théoriques obtenues en divisant l'écart type par la racine carrée de la taille de l'échantillon.

Enfin, une différence d'au plus 0,01 est signalée quant à l'intervalle de confiance à 95 % des distributions d'échantillonnage théorique et empirique de chacune des trois échelles, valeur somme toute de peu d'importance. La mise en garde de Banville, Richard et Raïche n'est donc pas soutenue par les résultats, et l'interprétation des résultats obtenus aux analyses de variances multivariées qui ont été effectuées par les auteurs semble donc juste.

3.5. Exemple d'une simulation stochastique avec réduction de la variance

Pour terminer, nous allons illustrer l'application de l'utilisation d'une variable antithétique pour diminuer la variance d'un estimateur stochastique. Plus précisément, nous allons voir le pourcentage de réduction de la variance de l'estimateur de la probabilité cumulative d'une variable aléatoire qui serait distribuée selon une loi normale centrée et réduite $N(0,1)$ par l'utilisation d'une variable antithétique. De plus, nous allons estimer le nombre de répétitions de la simulation qu'il faudrait réaliser pour obtenir le même écart type sans variable antithétique.

Il s'agira ainsi d'estimer la probabilité qu'une observation issue d'une distribution de probabilité $N(0,1)$ puisse prendre une valeur située entre $-\infty$ et x .

$$\phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx, \quad \text{Équation 8}$$

Généralement, les exemples offerts pour illustrer l'efficacité des techniques de réduction de la variance prennent uniquement une forme mathématique. Ici, nous allons plutôt offrir le code source en langage R pour mieux décrire le comportement d'une réduction de la variance par variable antithétique. Le tableau 2 fournit ce code. Une première fonction *MC()* est déclarée. Celle-ci permet de produire un échantillon Monte-Carlo de taille n avec ou sans variable antithétique. De cette façon, nous pourrions comparer les résultats obtenus avec ou sans stratégie de réduction de la variance de l'estimateur stochastique. Cette fonction prend pour paramètres une valeur de x exprimée en score z , la taille de l'échantillon, n , fixé à 100 par défaut, et un paramètre prenant une valeur logique indiquant si, oui ou non, une variable antithétique est utilisée pour diminuer la variance de l'estimateur. *MC()* retourne une seule valeur qui correspond à l'estimateur recherché.

Une seconde fonction *PMC()* va utiliser *MC()* pour produire m échantillons Monte-Carlo différents. Outre la valeur x du score z , elle prend pour paramètres le nombre de simulations, m , et la taille des échantillons, n , tous deux fixés à 100. *PMC()* génère une liste qui comprend 1) le pourcentage de réduction de la variance de l'estimateur par l'utilisation d'une variable antithétique et 2) des vecteurs de résultats associés à la valeur réelle de l'estimateur (PROBABILITÉ), à l'estimateur usuel généré par une simulation sans variable antithétique (MC.USUEL) et avec variables antithétiques (MC.ANTIT). Pour chacun de ces vecteurs, la valeur de l'estimateur est indiquée (MOYENNE), ainsi que son écart type (ERREUR.TYPE) et le coefficient de variation (CV) qui lui est associé. Le coefficient de variation permet d'obtenir une interprétation de l'importance de l'écart type au regard de la valeur de l'estimateur.

Enfin, les deux dernières lignes du tableau 2 consistent en la réalisation de la fonction *PMC()* dans 2 situations qui permettent d'observer le pourcentage de réduction de la variance de l'estimateur et d'estimer le nombre de répétitions de la simulation qu'il faudrait réaliser pour obtenir le même écart type sans variable antithétique.

TABLEAU 2

**Code source en langage R destiné à comparer
l'efficacité de la réduction de la variance d'une moyenne
par la technique de la variable antithétique
(adapté de Rizzo, 2008, p. 131-132)**

```
## PRODUCTION D'UN ÉCHANTILLON ~ N(x,1) DE TAILLE n
## AVEC OU SANS VARIABLE ANTITHÉTIQUE
MC <- fonction(x, n = 100, antithétique = TRUE) {
  if (length(x) > 1) stop(« ERREUR : Trop de valeurs à simuler »)
  u <- runif(n/2)
  if (!antithétique) v <- runif(n/2) else v <- 1 - u
  u <- c(u, v)
  g <- x * exp(-(u * x)^2 / 2)
  mean(g) / sqrt(2 * pi) + 0.5
}
## PRODUCTION DE m ÉCHANTILLONS À PARTIR
## DE LA FONCTION MC() DANS LE BUT DE COMPARER
## L'ERREUR TYPE SELON LA MÉTHODE
## DE SIMULATION UTILISÉE
PMC <- fonction(x, m=100, n=100) {
  MC1 <- MC2 <- numeric(m)
  for (i in 1 :m) {
    MC1[i] <- MC(x, n = n, antithétique = FALSE)
    MC2[i] <- MC(x, n = n)
  }
  prob <- pnorm(x)
  CV <- c(MOYENNE=prob, ERREUR.TYPE=0,CV=0)
  MC.USUEL <- c(MOYENNE=mean(MC1),
               ERREUR.TYPE=sd(MC1),
               CV=100*sd(MC1)/mean(MC1))
  MC.ANTIT <- c(MOYENNE=mean(MC2),
               ERREUR.TYPE=sd(MC2),
               CV=100*sd(MC2)/mean(MC2))
  list(RÉSULTATS=rbind(CV,MC.USUEL,MC.ANTIT),
       REDUCTION.VARIANCE=(var(MC1)- var(MC2))/var(MC1))}
## COMPARAISON AVEC DEUX TAILLES D'ÉCHANTILLON
PMC(x=1.95,m=100,n=100)
PMC(x=1.95,m=100,n=20000)
```

Le tableau 3 présente le résultat des deux situations de simulation. On peut ainsi remarquer que, lorsque la taille de l'échantillon n est égale à 100, la valeur de l'estimateur (MOYENNE) est toujours très rapprochée de la valeur attendue (0,9744119). Toutefois, l'écart type de l'estimateur représente 2,33 % de la valeur de l'estimateur quand une variable antithétique n'est pas utilisée. Cette valeur diminue à 0,13 % avec l'utilisation d'une variable antithétique. Au plan de la variance, il s'agit d'une diminution importante de 99,67 %.

La simulation a été répétée avec une taille de l'échantillon égale à 20 000. On y remarquera que l'écart type obtenu sans variable antithétique est maintenant le même que celui qui avait été obtenu avec une variable antithétique et un échantillon d'une taille aussi minime que 100. Cela indique que, pour obtenir la même précision de l'estimateur stochastique, un échantillon 200 fois moins important est suffisant. Il s'agit d'une réduction très importante de la taille de l'échantillon. On remarque alors que l'utilisation d'une technique de réduction de la variance de l'estimateur stochastique peut mener à une diminution considérable du temps de calcul dans certaines situations. Bien sûr, chaque type de simulation doit être traité individuellement, et une technique spécifique de réduction de la variance peut ne pas toujours être optimale.

TABLEAU 3
Résultats de la simulation

> PMC(x=1.95, m=100, n=100)			
\$RÉSULTATS			
	MOYENNE	ERREUR.TYPE	CV
CV	0.9744119	0.000000000	0.0000000
MC.USUEL	0.9750080	0.022695384	2.3277126
MC.ANTIT	0.9743176	0.001296499	0.1330674
\$REDUCTION.VARIANCE			
[1]	0.9967366		
> PMC(x=1.95, m=100, n=20000)			
\$RÉSULTATS			
	MOYENNE	ERREUR.TYPE	CV
CV	0.9744119	0.000000000	0.0000000
MC.USUEL	0.9745333	0.0013863365	0.14225645
MC.ANTIT	0.9743917	0.0001112317	0.01141550
\$REDUCTION.VARIANCE			
[1]	0.9935625		

CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre était d'introduire l'utilisation des simulations informatisées pour soutenir la recherche en éducation. À cet effet, une définition du concept de simulation a été donnée.

Ensuite, les approches classiques de mise en œuvre de simulations ont été présentées : simulations non stochastiques, simulations stochastiques, rééchantillonnage avec ou sans remise, et techniques de réduction de la variance. Pour illustrer ces différentes approches classiques, cinq exemples ont été présentés. Chacun de ces exemples est issu des travaux de recherche en éducation des auteurs de ce chapitre. Ces exemples sont typiques des approches qui sont habituellement utilisées dans les recherches en éducation.

Toutefois, il existe beaucoup de méthodes et de stratégies issues d'autres disciplines qui sont peu utilisées en recherche en éducation. À titre illustratif, on peut souligner les techniques de réduction de la variance des estimateurs et les distributions de probabilité alternatives autres que les usuelles distributions normale, t de Student, binomiale ou logistique. L'utilisation de ces méthodes et stratégies issues d'autres disciplines pourrait avantageusement étendre l'éventail des applications des simulations en recherche en éducation.

RÉFÉRENCES

- Banville, D., J.-F. Richard, et G. Raïche (2004), « Utilisation des 11 styles d'enseignement de Mosston chez des éducateurs physiques francophones du Canada », *Avante*, 10(2), p. 32-44
- Bratley, P., B. L. Fox, and L. E. Schrage (1987), *A guide to simulation*. New York, NY : Springer.
- Davison, A. C., and D. V. Hinkley (1997), *Bootstrap methods and their application*. Oxford : Cambridge University press.
- Edgington, E. S., and P. Onghena (2007). *Randomization tests*. Boca Raton, FL : Chapman.
- Efron, B. (1979), Bootstrap methods : another look at the jackknife. *Annals of statistics*, 7, p. 1-26.
- Efron, B., and R. Tibshirani (1993), *An introduction to the bootstrap*. New York, NY : Chapman.
- Fang, K.-T., R. Li and A. Sudjianto (2006), *Design and modeling for computer experiments*. Boca Raton, FL : Chapman.
- Freund, J. E., and R. E. Walpole (1980), *Mathematical statistics, third edition*. Englewood Cliffs, NJ : Prentice-Hall.
- Kulinna, H. P., D. J. Cothran, and W. Zhu (2000), *Teachers' experiences with and perceptions of Mosston's spectrum : How do they compare with students ?* Communication présentée lors de la rencontre annuelle de l'American Educational Research Association (AERA), Nouvelle-Orléans, LA.

- Laurencelle, L. (2001), *Hasard, nombres aléatoires et méthode Monte-Carlo*. Ste-Foy, QC : Presses de l'Université du Québec.
- Lord, F. (1980), *Application of item response theory to practical testing problems*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associate.
- Manly, B. F. J. (2007), *Randomization, bootstrap and Monte-Carlo methods in biology*. Boca Raton, F : Chapman and Hall.
- Molenaar, I. W. and H. Hoijtink (1990), The many null distributions of person fit indices. *Psychometrika*, 55(1), p. 75-106.
- Mosston, M., and S. Ashworth (1994), *Teaching physical education, 4th edition*. New York, NJ : Macmillan.
- Quenouille, M. H. (1956), « Notes on bias in estimation », *Biometrika*, 43(3/4), p. 353-360.
- Raïche, G. (2004), « Le testing adaptatif », dans R. Bertrand et J.-G. Blais : *Modèles de mesure : l'apport de la théorie des réponses aux items*. Ste-Foy, QC : Presses de l'Université du Québec.
- Raïche, G. et J.-G. Blais (2003), « Efficacité du dépistage des étudiants et des étudiants qui cherchent à obtenir un résultat faible au test de classement en anglais, langue seconde, au collégial », dans J.-G. Blais et G. Raïche (dir.) : *Regards sur la modélisation de la mesure en éducation et en sciences sociales*. Ste-Foy, QC : Presses de l'Université Laval.
- Raïche, G., M. Tétreault, D. Banville, et J.-F. Richard (2005), « Commentaires sur l'utilisation des 11 styles d'enseignement de Mosston chez des éducateurs physiques francophones du Canada », dans *Avante*, 11(1), p.10-14.
- Riopel, M., G. Raïche, F. Fournier et P. Nonnon, (2007), « Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par ordinateur », dans *Aster*, 43, p. 57-99.
- Rizzo, M. L. (2008), *Statistical computing with R*. Boca Raton, FL : Chapman and Hall.
- Tukey, J. (1958), « Bias and confidence in not quite large samples », *Annals of mathematical statistics*, 29, p. 614.
- Van der Maren, J.-M. (2003), *Méthodes de recherche pour l'éducation*. Paris, France : de Boeck.
- Van Krimpen-Stoop, E. M. L. A. et R. R. Meijer (1999), « The null distribution of person-fit statistics for conventional and adaptive tests », *Applied Psychological Measurement*, 23(4), p. 327-345.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 8



Les TIC dans le cadre de la recherche en enseignement des sciences et des technologies

Frédéric Fournier, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

Alors que l'informatique a fait son entrée dans les milieux scolaires il y a plus de vingt ans, elle y trouve une place particulière dans le cadre de l'enseignement des sciences et des technologies. C'est en effet peut-être dans ces domaines que son utilisation y est la plus étoffée. Par sa polyvalence, l'utilisation de l'ordinateur, à la fois objet et outil d'apprentissage, prend de nombreuses formes.

Dans le cadre de la recherche, nous proposons la conception d'un environnement d'expérimentation assistée par ordinateur afin de suivre le cheminement des apprenants en gardant les traces de leurs actions durant toutes les étapes de démarche, et de voir les interactions entre les différents protagonistes. Les données proviennent

de deux couches, à savoir celles issues de l'environnement d'ExAO (choix des capteurs ; acquisition, traitement et modélisation des données, etc.) et celles issues de webcam ou encore d'enregistrements sonores. Ces deux types de traces suivent des formats standardisés, tels que le XML, qui en simplifient le traitement.

INTRODUCTION

Dans le domaine de l'enseignement des sciences et des technologies, l'ordinateur a eu, au fil des années, plusieurs fonctions. Nous retiendrons plus particulièrement dans cet article son rôle en tant qu'outil de laboratoire, ainsi que son usage dans le cadre de la robotique pédagogique. Il nous paraît important, dans un premier temps, de souligner l'importance des activités de laboratoire et les défis qu'elles impliquent dans le domaine de la recherche. Nous verrons ensuite comment les technologies d'informations et de communications (TIC) peuvent jouer un rôle majeur dans la compréhension des processus cognitifs des étudiants, ainsi que dans la découverte des limites qui s'y rattachent.

1. LE RÔLE ET L'IMPORTANCE DES ACTIVITÉS DE LABORATOIRE

Selon Trumper (2003), le terme *laboratoire* englobe les activités basées sur les observations, les expériences et les tests faits par les étudiants. Dans ce cadre, les apprenants peuvent développer un certain nombre d'apprentissages tels que (traduction libre) :

- (a) des concepts (représentation concrète des concepts, application de concepts connus à des niveaux plus élevés et découverte de nouveaux concepts) ;
- (b) des compétences (usage juste et manipulation d'instruments, habileté à enquêter, ordre et communication, esprit critique et résolution de problèmes) ;
- (c) la compréhension des fondements de la science (comprendre la nature de la science et son développement et savoir comment un scientifique travaille) et
- (d) des attitudes (curiosité, ouverture d'esprit, objectivité, rigueur et coopération en équipe).

Dans le domaine des sciences de la vie et de la terre, Coquidé (2002) fait ressortir d'autres éléments :

En permettant une articulation entre un phénomène concret et sa représentation abstraite, les activités expérimentales concourent au développement de l'abstraction. [...] Par ailleurs, les activités scolaires ne prennent que rarement en compte les difficultés et les spécificités des pratiques expérimentales sur le vivant [...]. Un rapport expérimental au vivant élargit l'intérêt au monde vivant. Il contribue au développement personnel. Il construit des connaissances et fait acquérir des techniques.

De par leur richesse, les activités de laboratoire prennent une place de plus en plus importante dans le cadre de la dernière réforme de l'école québécoise, ou encore dans d'autres pays, tels que la France.

Cependant, le choix d'utiliser des laboratoires pour l'enseignement des sciences n'est pas toujours unanime, et ses détracteurs ont relevé plusieurs de leurs inconvénients tels que leur coût élevé, les risques encourus (produits chimiques, haute tension, etc.), leurs limites dans certains domaines et le faible apport didactique qu'ils peuvent procurer. Sur ce dernier point, il est primordial de souligner l'utilisation qui en est faite : les enseignants ont en effet la possibilité d'utiliser les laboratoires à différents stades d'apprentissage, de l'exécution de consignes à l'investissement dans une réelle démarche de recherche.

Dans un contexte où l'apprenant suit une démarche linéaire dictée par un protocole expérimental, il est clair que les bénéfices du laboratoire sont quasiment inexistantes. C'est ce que Coquidé (2002, p. 138) souligne, et cela s'applique en particulier en sciences de la vie et de la terre :

Dans de nombreux documents pédagogiques ou administratifs, les activités expérimentales sont encore présentées comme nécessaires à la « mise en évidence de faits ». Cette culture des « faits donnés », au détriment des « faits à construire », reste souvent d'inspiration empirico-inductiviste.

De plus, les activités en laboratoire peuvent paraître complexes à mener aussi bien pour les enseignants que pour les apprenants. À l'opposé d'un enseignement transmissif, les laboratoires sont un lieu d'apprentissage qui doit rester plus actif et permettre des activités de groupe alliant l'approche par projet (Marcotte et Fournier, 2007) à la résolution de problèmes. Toutes ces caractéristiques

confèrent aux activités de laboratoire un caractère unique que l'on ne trouve pas dans d'autres matières scolaires.

Coquidé (2002), en réponse à un courant anglo-saxon proposant de faire évoluer l'enseignement des sciences vers des « récits explicatifs », fait ressortir les missions et l'importance d'un rapport au vivant. La pratique expérimentale chez les étudiants permet :

- ◆ de combler le déficit de familiarisation pratique au vivant ;
- ◆ de transformer ses conceptions relatives au vivant ;
- ◆ d'affronter la matérialité des sciences ;
- ◆ de développer une pensée statistique ;
- ◆ de développer une rationalité expérimentale complémentaire à celle de la matière ;
- ◆ de contribuer à fonder une éthique ;
- ◆ de favoriser des orientations professionnelles positives ;
- ◆ de développer leur rapport au savoir.

Cependant, l'environnement classique que l'on retrouve dans un laboratoire traditionnel n'est pas suffisant pour que les étudiants puissent comprendre tous les phénomènes à l'étude. Ainsi, Thomas et McRobbie font remarquer que

l'élément clé de l'apprentissage de la chimie est la nécessité de considérer le phénomène à un niveau macroscopique, moléculaire et symbolique, et de savoir qu'une autre raison qui fait qu'apprendre la chimie est complexe est que, même si les observations se situent surtout au niveau macroscopique, les explications et les théories qui font partie de la compréhension de la chimie sont concentrées aux niveaux atomique ou moléculaire, qui sont représentés par des symboles par les chimistes (traduction libre).

2. LA DYNAMIQUE AU SEIN DES LABORATOIRES

Comme en témoignent tous les apports liés aux activités de laboratoire, la dynamique qui y est générée reste complexe et devient un défi en ce qui concerne la recherche. Les différents acteurs se retrouvent en effet dans un « micromonde » dans lequel évoluent des apprenants, souvent au sein d'une équipe, accompagnés d'un ou plusieurs enseignants. Dans ce cadre, les étudiants disposent d'une

série d'outils (informatifs, technologiques, etc.) pour réaliser leur recherche (objet d'apprentissage).

Pour Nachmias et Linn (1987),

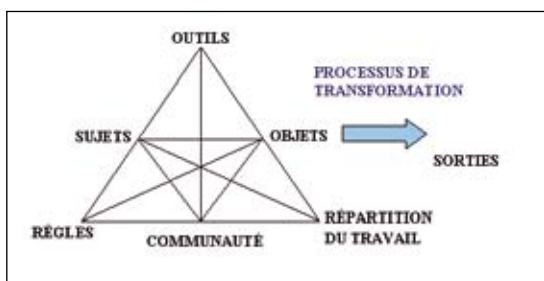
Les disciplines scientifiques expérimentales et technologiques ont plusieurs points communs : elles se révèlent entre autres être des disciplines de raisonnement et d'action, elles ont un rapport direct avec le réel auquel elles doivent se confronter et sont ainsi dépendantes de la matérialité. Finalement, elles développent à la fois un rapport systémique et un rapport pratique au monde...

Les sciences expérimentales s'articulent sur un système intellectuel et matériel. Il est donc primordial de faire ressortir pleinement tous les aspects de ce caractère expérimental et du dynamisme qui en découle en permettant aux apprenants de s'investir concrètement dans les différentes étapes.

Reprenant les théories de l'activité (Activity Theory), et en particulier le système de représentation d'Engeström (1987), Issroff et Scanlon (2002) font ressortir les relations entre le sujet, l'objet d'apprentissage et la communauté (figure 1). Nous devons noter que cette représentation diffère du triangle didactique qui se centre, lui, plus précisément sur les relations élève/professeur/objet d'apprentissage, et ainsi sur les processus d'apprentissage, de formation et d'enseignement. La théorie de l'activité s'intéresse, quant à elle, à l'aspect comportemental des sujets, leurs interactions. Elle prendra aussi en compte l'impact de certains artefacts (ordinateur...) sur ses interactions.

FIGURE 1

Représentation du système d'activité d'après Engeström (1987) (traduction libre)



Nous pouvons ainsi voir que les interactions entre les différents éléments sont nombreuses. De ce fait, elles deviennent difficiles à analyser d'une manière globale. Les recherches actuelles se concentrent d'ailleurs essentiellement sur le rapport objet/sujet, et laissent souvent au second plan les autres éléments intervenant dans le cadre des situations d'apprentissage en laboratoires. À ce sujet, Allamel-Raffin (2005) fait ressortir que

Les interactions entre les humains, les dispositifs techniques et les théories sont extrêmement complexes dans le cadre des recherches expérimentales. Elles ne se laissent pas facilement dépeindre comme un processus qui irait tout naturellement de la théorie, de règles entièrement explicites en principe, vers la conception de dispositifs techniques – les résultats et les problèmes posés par ces derniers étant intégralement justifiés ou résolus par le recours à ces règles.

3. LES TECHNOLOGIES D'INFORMATIONS ET DE COMMUNICATIONS (TIC) DANS LES LABORATOIRES

Depuis l'arrivée de l'informatique dans les écoles au milieu des années 80, une grande variété d'outils ont été utilisés pour l'enseignement de la science, comme les chiffriers, la modélisation, le multimédia, les simulations, les travaux pratiques assistés, l'usage d'Internet ainsi que l'Expérimentation Assistée par Ordinateur (ExAO ou encore MBL en anglais pour Microcomputer Based Laboratory).

Au fil des avancées technologiques, plusieurs courants ont ainsi pu voir le jour, à savoir (Durey et Beaufile, 1998)

- 1) l'utilisation de l'ordinateur à des fins pédagogiques ; l'utilisation de logiciels facilitant l'apprentissage, plus ou moins autonome, de connaissances de physique ou de chimie ; l'EAO (Enseignement Assisté par Ordinateur), relayé par les idées de l'EIAO (EAO fondé sur des moteurs d'Intelligence Artificielle) puis par celles de... l'EIAO en tant qu'Environnement Interactif d'Apprentissage par Ordinateur ;
- 2) l'arrimage entre des éléments de didactique et le potentiel offert par l'informatique (construction d'un logiciel « didactiquement intelligent » d'aide à la résolution de problèmes de mécanique du secondaire, fondée sur les connaissances apportées par la didactique dans ce domaine) ;
- 3) l'ordinateur « outil de laboratoire » ExAO, rendu possible par la réalisation de convertisseurs permettant la connexion de capteurs à l'ordinateur et fondé sur l'hypothèse d'un possible renforcement des activités expérimentales dans la classe ;

- 4) les simulations ;
- 5) l'ordinateur, non pas comme aide didactique, mais comme élément des contenus disciplinaires.

Sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication plus particulièrement, Grégoire et *Laferrière* (2001) soulignent aussi que, par le biais du réseau (communications rapides et concentrations des ressources), les TIC peuvent être de bons vecteurs, entre autres, de l'apprentissage actif, de la création, de la collaboration, de la pensée réflexive (métacognition), ainsi que de la résolution de problèmes. Ces différents apprentissages sont d'ailleurs au cœur de la démarche expérimentale.

3.1. L'expérimentation assistée par ordinateur

Alors que l'ExAO a fait son apparition il y a plus de 30 ans, les premières études montrant ses bénéfices didactiques remontent à une vingtaine d'années. Dans un environnement d'ExAO, les multiples capteurs sont reliés à une interface électronique qui communique directement avec un ordinateur. Ce dispositif offre à l'étudiant la possibilité de visualiser en temps réel le phénomène scientifique en concomitance avec sa représentation sous de multiples formes (métaphore de la lunette cognitive de Nonnon, 1986). L'apprenant est ainsi capable de créer des liens entre les multiples variables physiques étudiées. L'ExAO permet de réduire le temps consacré à la mise en place du montage expérimental ; à l'acquisition de données et à leur affichage ; à l'analyse de données expérimentales (Nachmias, 1989 ; Lazarowitz & Tamir, 1994). C'est aussi un outil didactique transversal puisqu'elle peut être appliquée de manière identique à plusieurs matières (mécanique, électricité, etc.), mais aussi à plusieurs domaines (physique, biologie, chimie, technologie, etc.).

Plus précisément, pour Nonnon (1998), l'ExAO est une boîte à outils didactique permettant à l'enseignant de concevoir, de construire et de mettre en œuvre rapidement des activités d'apprentissage en science expérimentale et en technologie.

Elle facilite une approche intégrée des sciences, de la physique, de la chimie, de la biologie et de la technologie, et en donnant le contrôle expérimental à l'étudiant, celui-ci [sic] rend réaliste l'approche constructiviste et l'apprentissage par compétences.

Elle donne accès à une structure de pensée formelle en étant une sorte « d'appariteur-robot » qui l'aide et l'assiste techniquement dans une

situation réelle de laboratoire, lui permettant d'identifier les variables, de pressentir une interaction entre celles-ci, d'opérationnaliser cette interaction dans une hypothèse, d'expérimenter et de visualiser immédiatement ses résultats sous forme graphique et d'exprimer ceux-ci sous forme de règles ou de lois avant d'intégrer ces dernières dans un modèle plus vaste, plus théorique, plus explicatif.

En fournissant à l'étudiant une représentation graphique en temps réel de l'interaction des variables à l'étude, on lui donne accès à l'abstraction, à un langage de codage graphique signifiant, qu'il utilisera par la suite pour prédire, comprendre et interpréter d'autres phénomènes physiques. C'est ce que nous avons décrit par la métaphore de la « lunette cognitive ».

En libérant l'étudiant de certaines tâches telles que l'acquisition de données, Mc Corduck (1985) suggère que les apprenants ont des opportunités plus grandes d'employer un niveau plus élevé de stratégies cognitives lors de la résolution de problèmes et du développement conceptuel.

Ainsi, plusieurs recherches montrent que l'utilisation de l'ExAO améliore chez l'étudiant la compréhension du langage de codage graphique (Linn et coll., 1987 ; Thornton & Sokoloff, 1990 ; Girouard et Nonnon, 1999). Ces recherches ont fait aussi ressortir qu'au niveau cognitif, un faible délai (même inférieur à 20 secondes) entre la prise de données et leur visualisation sous forme graphique nuit à la compréhension du phénomène à l'étude.

D'un point de vue pédagogique, Marcotte (2004) souligne que

L'expérimentation assistée par ordinateur s'est avérée un outil privilégié [...], facilitant la mise en œuvre de la démarche scientifique en y augmentant la part d'induction. Nous avons encouragé les élèves à confronter la résistance du réel au lieu de tenter de la contourner, c'est-à-dire à tenir compte des difficultés pratiques reliées à l'exploration du réel, car elles s'avèrent riches d'enseignements. Nous avons noté que cela change leur perception des savoirs scientifiques en les amenant à s'appropriier le processus de construction des connaissances.

Pour Faure-Vialle, l'ExAO change aussi les stratégies d'apprentissage des étudiants en particulier pendant la saisie des données.

3.2. Les laboratoires virtuels / laboratoires à distance

Plusieurs prototypes de laboratoires virtuels accessibles par internet ont pu être expérimentés durant les dernières années

(*ICTT@Lab, VPLab, MIT Ilab...*). Gonzalez-Castaño et coll. (2001) affirment que le laboratoire virtuel est un excellent complément au laboratoire traditionnel et y voient de nombreux avantages. Il permet, en effet, à ceux qui n'ont pas accès à de l'équipement réel d'expérimenter en gardant une indépendance géographique et temporelle. De plus, ces environnements d'apprentissage peuvent être coopératifs, et un suivi non intrusif de l'étudiant peut s'effectuer. À l'heure actuelle, la mise en oeuvre de laboratoires pilotés à distance reste cependant très lourde, et le type d'expériences encore très restreint.

3.3. Allier virtuel et réel

Une des avenues prometteuses que l'on retrouve dans la conception d'environnements de laboratoire est l'utilisation d'animations virtuelles vraisemblables ou analogiques en parallèle à des phénomènes abstraits ou invisibles (Riopel, 2005).

Pour Nonnon (1998),

Il s'agit essentiellement de présenter une animation virtuelle simplifiée, voire même analogique, en simultanéité avec le phénomène réel et sa représentation graphique. Ainsi, en ExAO, les données générées par le phénomène physique permettraient de générer à la fois une représentation graphique et une animation virtuelle de celui-ci sur l'écran de l'ordinateur. Cette animation virtuelle devient une composante didactique de l'ExAO, un repère visuel et concret pour appréhender plus facilement les différentes composantes du codage graphique (variation de pente, extrapolation, interpolation, etc.).

Tout en permettant à l'étudiant d'expérimenter directement sur le phénomène réel, plutôt que sur une animation virtuelle de celui-ci. Nous avons montré, pour l'ExAO, que l'animation virtuelle ne se substituait jamais à la réalité, qu'elle ne faisait que la supporter, l'enrichir, la rendre plus visuelle, ou plus simple dans le but essentiel de faciliter pour l'étudiant l'appréhension d'un langage graphique de codage, un outil cognitif indispensable en science expérimentale.

Selon nous, l'ExAO, et plus précisément le concept des micro-laboratoires, allie en grande partie les atouts liés au travail dans les laboratoires traditionnels en permettant aux apprenants de manipuler des objets réels et des objets liés aux laboratoires virtuels. Grâce à une présence de plus en plus importante des ordinateurs dans les foyers et à la miniaturisation des composantes de l'ExAO (capteurs, interface électronique, etc.), il devient aisé pour les étudiants de transporter cet environnement de recherche pour en faire

un laboratoire mobile. L'ordinateur devient un assistant à la réalisation d'expériences. Avec cette approche, l'élève est au centre des apprentissages, le microlaboratoire lui donnant accès à l'investigation scientifique, même en dehors des heures de laboratoire.

La possibilité d'allier réel et virtuel au sein du même environnement amène l'étudiant à évoluer entre les différents registres de représentations graphiques. Ainsi, les lacunes des laboratoires traditionnels mentionnées auparavant par McRobbie et Thomas pourraient être facilement comblées. Dans le cadre de l'enseignement de la chimie, une réaction chimique pourrait se réaliser à un niveau macroscopique, et différentes représentations graphiques de cette réaction à un plan microscopique

4. LA ROBOTIQUE PÉDAGOGIQUE

La robotique pédagogique (RP) dont est issue l'ExAO lui apporte une dimension supplémentaire en y intégrant l'aspect technologique. Cette activité d'apprentissage intègre à différents niveaux les techniques de base en robotique, en mécanique, en électricité, en électronique et en informatique dans une activité où l'élève conçoit et construit un objet technologique commandé par ordinateur (Nonnon et al 2007). L'élève va pouvoir contrôler un certain nombre d'effecteur (moteur, pompe, électro-aimant, etc.) par le biais de l'ordinateur.

Les projets qui en résultent peuvent prendre la forme de manèges dont on fait varier le sens et la vitesse de rotation ; d'une serre dont la luminosité ou la température peuvent être contrôlées ; d'une miniscène de théâtre dont on peut contrôler l'éclairage ; et de différents personnages et de décors grâce à des moteurs électriques. En parallèle, l'ordinateur peut être utilisé pour ses caractéristiques multimédias en diffusant une vidéo du public et la narration de la pièce. Ainsi, les élèves sont engagés dans une activité qui laisse une place importante à la créativité dans la conception et la réalisation de l'objet technologique, mais une place plus restreinte dans la conception informatique ou encore électronique. La robotique pédagogique peut démystifier la technologie et faciliter son appropriation fonctionnelle par les apprenants.

Pour Nonnon (2002),

Grâce aux possibilités de l'ExAO, où le micro-ordinateur travaille en mode conversationnel et en mode graphique, mais aussi en mode de

contrôle de procédés, nous pouvons envisager des environnements d'apprentissage qui permettent à l'apprenant :

- 1) d'agir sur un objet concret ;
- 2) de visualiser en simultané la conséquence de cette action et sa représentation graphique ;
- 3) de modéliser cette action sous forme graphique et algébrique.

Toujours pour Nonnon (2002), la robotique pédagogique s'inscrit dans une approche constructiviste de l'apprentissage par l'utilisation d'un ordinateur connecté au monde physique dans le but de produire et de mesurer des changements dans l'environnement ambiant (des expériences contrôlées et assistées par ordinateur). L'ordinateur sert ici d'interface entre les opérations d'acquisition et d'analyse de données, de rétroaction et de contrôle sur l'environnement physique. La robotique pédagogique permet à ces gestes mentaux de produire des résultats à la fois concrets et symboliques.

Selon Marcotte et Fournier (2007),

Les effets synergiques de l'ExAO, de la pédagogie par projets et de la recherche et développement permettront d'innover dans l'apprentissage des sciences expérimentales. On peut penser à une modernisation et à une réorganisation des lieux consacrés aux activités pratiques, à un réaménagement du temps (grâce à des prises de mesures plus rapides ou différées) et du lieu même du laboratoire (par une expérimentation hors murs avec possibilité de suivis à distance par internet).

5. VERS LE DÉVELOPPEMENT D'UN ENVIRONNEMENT D'EXAO POUR LA RECHERCHE

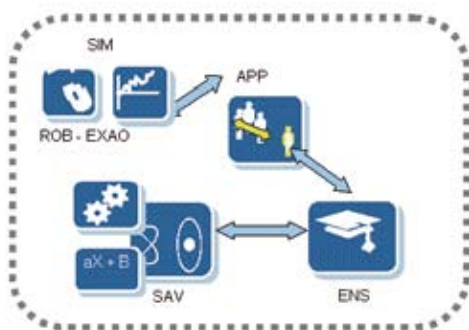
L'ExAO fait partie intégrante des environnements informatisés d'apprentissage humain (EIAH) définis ainsi : « Le coeur des EIAH est la recherche des principes de conception, de développement et d'évaluation d'environnements informatiques qui permettent à des êtres humains d'apprendre » (Balacheff, 2001). Elle peut se présenter comme un environnement informatisé de laboratoire (figure 2) dans lequel nous retrouvons les éléments du triangle didactique, **Apprenant(s)**, **Enseignant(s)**, **Savoirs**, et les différents outils issus de la **Robotique** pédagogique ou encore de l'**ExAO** couplés aux **simulations**. Nous analyserons tout d'abord l'environnement de recherche d'un point de vue didactique et pédagogique pour ensuite en dégager les solutions techniques qui le supporteront.

5.1. D'un point de vue didactique et pédagogique

Les tâches au sein d'activités de laboratoire, que ce soit en science ou encore en technologie, sont souvent complexes, car elles font appel à de nombreux processus didactiques, cognitifs ainsi qu'à la dynamique d'équipe. Comme nous l'avons fait remarquer auparavant par le biais du système d'activité d'Engeström (1987), les recherches actuelles n'englobent qu'une partie restreinte de toutes les interactions et de tous les processus. En exploitant les possibilités que nous offre l'informatique, en particulier dans le cadre de l'ExAO ou de la robotique pédagogique, de nouveaux champs d'études apparaissent.

FIGURE 2

Environnement informatisé de laboratoire



Outre ses nombreux apports à la démarche des apprenants (acquisition du langage et du codage graphique, compréhension du concept de mesure, modélisation des données, lien entre le réel et le virtuel, etc.), l'ExAO s'avère une technologie très riche pour la recherche. Ainsi, afin de pouvoir suivre et comprendre plus en profondeur les différents processus didactiques accompagnant les apprenants dans une démarche de laboratoire, il nous paraît primordial de développer des environnements d'apprentissage dans lesquels ils pourront évoluer. Des environnements tels que ceux développés par Toumas (2006), Riopel (2005) ou Fournier (2002) dans le cadre des microlabs (Nonnon) ont déjà mis l'accent sur la modélisation mathématique des données, l'utilisation du réel et virtuel ainsi que la compréhension du système de mesure. Selon

nous, les nouvelles technologies, et plus particulièrement l'ExAO, sont des supports déterminants, en recherche, pour la compréhension des nombreux processus en jeu dans les activités de laboratoire, car elles permettent d'accompagner et de soutenir les étudiants tout au long de leur démarche expérimentale ou technologique, que ce soit dans un mode inductif ou encore déductif.

En effet, ces environnements étant informatisés, il nous est possible de garder les traces informatiques des différents intervenants et ainsi de visualiser le cheminement d'un ou des apprenants. Settouti et coll. (2005) font remarquer que

Les traces peuvent devenir des sources d'information volumineuses. Il est donc nécessaire de construire des environnements permettant de ne conserver que les traces pertinentes. Pour ce faire, il est nécessaire de concevoir une série de modules informatiques permettant de convertir la série de données en traces, d'y inclure des éléments pour les interroger, les visualiser afin d'en faciliter l'analyse et l'interprétation.

Dans le contexte des laboratoires, Fournier *et coll.* (2007) notent que

Lors du suivi du cheminement des apprenants dans le contexte de la RP, plusieurs niveaux d'analyse doivent être pris en compte : un niveau macro axé sur l'ensemble du projet incluant ses acteurs (groupe d'apprenants, d'enseignant) et un niveau micro permettant de situer chacun des intervenants dans le cadre du projet. Ce dernier niveau permet de visualiser les interactions de l'apprenant face à l'enseignant, face à son équipe, face à la problématique.

Par la diversité des interfaces d'acquisition de données et du matériel que l'on peut retrouver en ExAO, il nous paraît important de discerner deux niveaux :

En premier lieu, celui en lien direct avec l'ExAO (acquisition, traitement des données, modélisation, etc.) et, deuxièmement, celui de l'environnement destiné à l'acquisition des traces des apprenants (textes, sons, vidéos provenant de webcam). Pour ces derniers, un certain nombre de logiciels libres nous permettent de stocker et de cataloguer les données multimédias. Les apprenants pourraient aussi utiliser des technologies (vidéos, photos, etc.) pour nous donner des traces de leur cheminement (Fournier et coll., 2007) :

En réalisant des vidéos explicatives, l'élève se retrouve à scénariser et à expliciter son cheminement. Il s'agit donc d'une forme de micro-

enseignement, car l'apprenant sera en mesure de relire les précédentes vidéos, c'est-à-dire le scénario d'apprentissage exécuté par l'apprenant, incluant les idées, les tentatives fructueuses aussi bien que les erreurs qu'il aurait pu commettre. Ce processus rejoindrait donc une évaluation formative. La vidéo nous permettrait aussi, à la manière d'une actographie, de voir comment un apprenant élabore la mise en place de son milieu expérimental : position des capteurs sur le dispositif expérimental, choix des effecteurs, branchements...

Nous pouvons noter certaines initiatives pour effectuer le suivi des traces dans le contexte de l'enseignement des sciences et technologies, telles que celle de Adam et coll. (2007) et de Baudouin et coll. (2007), mais qui ne touchent que des laboratoires virtuels.

5.2. D'un point de vue technologique

Il est essentiel, à des fins de recherche, que les différentes données issues de l'environnement soient transférées dans des formats offrant une grande compatibilité tels que le XML (eXtensible Markup Language) De par sa structure, ce format texte permet d'échanger des données entre différents systèmes et de faciliter leur transfert. Dans notre cas, ces données seront issues du système d'ExAO, de photos, d'événements clavier... Nous pouvons ainsi construire les contenus et les intégrer grâce à un serveur dans une banque de données.

Ces recommandations rejoignent en partie celles formulées par Fournier et coll. (2007) par le biais des portfolios électroniques. Dans ce contexte, les élèves bâtissent leur cahier de laboratoire électronique en utilisant les données issues de l'environnement d'ExAO auxquelles s'ajoutent des éléments multimédias (vidéo, photo, enregistrements sonores, etc.) les obligeant à expliciter leur démarche.

Comme nous avons pu le voir, l'ExAO et la robotique pédagogique sont des environnements très riches pour les apprenants, et qui leur donnent accès à de nombreux outils didactiques grâce auxquels ils peuvent s'investir dans une démarche scientifique ou technologique. Même si ces environnements ont pu mettre en évidence certains facteurs (nécessité de voir un phénomène physique et sa représentation graphique en temps réel), peu de chercheurs ont saisi l'opportunité d'utiliser cette infrastructure pour analyser plus en profondeur la démarche des élèves. Une des raisons possibles de ce manque de popularité vient du fait que les logiciels employés

actuellement ne permettent pas de mémoriser et d'exporter les traces des apprenants. De plus, les interactions homme/machine sont nombreuses et, de ce fait, difficilement traitables.

Durant la dernière décennie, plusieurs technologies ont pu émerger au niveau du Web, en particulier les applications internet riches (Rich Internet Applications : RIA). Elles se situent entre les technologies des clients légers, où le serveur traite les données, et la technologie des clients lourds dans laquelle l'ordinateur accomplit ce traitement.

Les RIA permettent une plus grande richesse de l'interface homme-machine. Elles peuvent être exécutées localement (*sandbox* ou bac à sable) ou encore par le biais d'un navigateur internet. Dans ce dernier cas, elles offrent la possibilité de travailler sur les mêmes données depuis des machines distinctes, elles ont donc une grande pertinence en recherche dans des environnements de laboratoire. Des modules Java et un certain nombre d'API (interface de programmation applicative) permettent de communiquer avec les bus USB (ou encore Série) utilisés par les interfaces ExAO. Il devient donc aisé d'acquérir des données ou encore de contrôler des expériences par le biais d'un logiciel installé sur un serveur et d'en garder les traces.

6. LES LIMITES

Les limites de ces environnements de recherche sont multiples. Elles concernent tout d'abord la collecte et le traitement des traces, dont le volume peut être très important. De plus l'apparition de la technologie nous mène à un paradoxe : pour permettre aux apprenants de s'approcher du phénomène physique, biologique, etc., nous devons tout d'abord, dans une certaine mesure, l'en éloigner en ajoutant un ensemble de boîtes noires (interfaces, capteurs électroniques). Pour Beaufls et coll. (1999),

L'introduction d'instruments informatisés dans les travaux pratiques entraîne des modifications au plan des activités elles-mêmes, mais aussi au plan des connaissances et compétences requises. De la saisie de données (au clavier ou automatique) à la résolution d'équations différentielles, de nouveaux savoirs et savoir-faire apparaissent d'emblée : ceux relatifs à l'objet « ordinateur » et son environnement ; comme ceux relatifs à de nouvelles méthodes (traitement statistique, optimisation de modèles, etc.).

Allamel-Raffin (2005) ajoute :

Les dispositifs techniques ne peuvent donc, en aucun cas, être considérés comme de simples boîtes noires qui permettraient aux chercheurs, après avoir émis un certain nombre d'hypothèses, d'apporter des réponses simples à leurs questions initiales. Les dispositifs techniques sont en constante interaction avec, d'une part, les êtres humains qui les façonnent et les font fonctionner, et d'autre part, les théories sur lesquelles ils reposent et qui parfois président à leurs modifications. Même si l'épistémologie classique a tendance à les rejeter dans l'ombre, ils jouent un rôle primordial dans le travail scientifique et l'établissement d'une conclusion au sein d'une publication.

Finalement pour Vialle (1999), l'ExAO représente un matériel assez conséquent (ordinateur, logiciels, capteurs...) qui risque d'éloigner l'élève du contact du vivant, un des objectifs prioritaires dans l'enseignement de la biologie. Sur ce point, P. Faure souligne qu' « Il est important de préserver des séquences où l'élève est directement en contact avec le vivant. » Dans un article sur la situation de l'enseignement de la biologie-géologie au lycée, R. Demounem analyse la place de l'ExAO dans la pédagogie active : « Ces nouvelles pratiques se développent en plus des T.P. traditionnels. » Il paraît essentiel de replacer l'ExAO au sein des autres techniques d'expérimentation et d'observation et d'insister sur leur complémentarité, afin d'utiliser au mieux les avantages de chacune. Il apparaît aussi clairement que, si l'on veut que les élèves utilisent de façon raisonnée les moyens informatisés dans des activités scientifiques, il convient de leur faire acquérir un certain nombre de savoirs et de savoir-faire spécifiques.

CONCLUSION

L'entrée des TIC au sein des laboratoires a apporté du renouveau dans l'enseignement des sciences et technologies durant les vingt dernières années. Même si quelques recherches sur l'apport des TIC en éducation ont pu être effectuées, peu de chercheurs ont saisi l'opportunité d'utiliser ces nouvelles technologies pour comprendre les processus sous-jacents de l'apprentissage des sciences et technologies. La démarche de l'apprenant, seul ou au sein d'une équipe, ne répond pas à un processus linéaire et devient difficile de ce fait même à analyser. La recherche en didactique des sciences et technologies s'enrichirait donc par l'exploitation des possibilités

offertes par les EIAH, en particulier par l'analyse des traces reflétant l'activité des apprenants.

De plus, de nouveaux outils technologiques ont fait leur apparition (Palm, calculatrices graphiques...), et ils pourraient être intégrés en recherche pour se rapprocher encore plus des processus cognitifs de l'apprenant.

BIBLIOGRAPHIE

- Allamel-Raffin, C. (2005), « Instruments et bricolages en physique des matériaux : l'exemple des catachrèses », *Tracés*, n°9, *Expérimenter*, septembre 2005 [en ligne], mis en ligne le 11 février 2008. URL : <http://traces.revues.org/index175.html>. Consulté le 22 mai 2008.
- Balacheff, N. (2001), *À propos de la recherche sur les environnements informatiques pour l'apprentissage humain*. [<http://www-didactique.imag.fr/Balacheff/TextesDivers/CognitiqueEIAH.htm>]
- Beaufils, D., C. Camguilhem, & H. Richoux (1999), « Savoir et savoir-faire associés à l'utilisation d'instruments informatisés dans des activités de travaux pratiques de physique ». *Aster N° 28. L'expérimental dans la classe*, INRP, p. 131-148.
- Benmohamed, H. (2007), *ICTT@Lab : un environnement informatique pour la génération et l'exécution de scénarios de télé TP* [En ligne] Thèse : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, [19/04/2007] Disponible sur : <http://docinsa.insa-lyon.fr/these/pont.php?id=benmohamed>
- Coquidé, M. (2002), « Les enjeux éducatifs d'un rapport expérimental au vivant ». *Article APBG*, n°1.
- Demounem R., J.-P. Astolfi (1996), *Didactique des sciences de la vie et de la terre*, Paris, Nathan.
- Durey, A. & D. Beaufils (1998), « L'ordinateur dans l'enseignement des sciences physiques : Questions de didactique ». *8^e Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques* : Montpellier.
- Engeström, Y. (1987), *Learning by Expanding : An Activity Theoretical Approach to Developmental Research*. Helsinki : Orienta-Konsultit Oy. <http://lhc.ucsd.edu/MCA/Paper/Engestrom/expanding/toc.htm>
- Faure, P. (1991), « Utilisation de l'ordinateur en biologie-géologie. Biologie-géologie », *Revue de l'association des professeurs de biologie-géologie*, n° 3, p.457-460
- Faure-Vialle, B. (2004), *Stratégies d'apprentissage des lycéens en biologie*. 7^e Biennale de l'Éducation et de la Formation, Débat sur les recherches et les innovations, Lyon. En ligne : <http://www.inrp.fr/Access/Biennale/7biennale/Contrib/affich.php?&num=7206>

- Fournier, F. (2001), *Un environnement d'apprentissage technologique pour la compréhension du concept de mesure en sciences expérimentales*. Thèse de doctorat, Montréal, Université de Montréal.
- Fournier, F., M. Riopel, G. Raiche, P. Potvin et K. Sodoké (2007), *Proposition pour l'utilisation du portfolio électronique dans le contexte de l'ExAO*. Communication donnée lors du 9^e colloque francophone de Robotique Pédagogique. La Ferté Bernard, France : CFRP.
- Gonzalez-Castanoa, F.J., L. Anido-Rifon, J. Vales-Alonso, M. J. Fernandez-Iglesia, . M. Llamas Nistalb, P. Rodriguez-Hernandez et J. M. Pousada-Carballo (2001), « Internet access to real equipment at computer architecture laboratories using the ava/CORBA paradigm ». *Computers & Education, Volume 36, Issue 2, February 2001*, p.151-170.
- Grégoire, inc., R. & T. Laferrière, (2001), *Apprendre ensemble par projet avec l'ordinateur en réseau : Guide à l'intention des enseignants et des enseignantes*. [http ://www.tact.fse.ulaval.ca/fr/html/sites/guidep.html#1.1](http://www.tact.fse.ulaval.ca/fr/html/sites/guidep.html#1.1)
- Girouard, M. & P. Nonnon (1999), « La lunette cognitive pour l'acquisition d'un langage graphique de codage, son influence sur l'atteinte d'objectifs terminaux des cours de physique à l'éducation des adultes », dans *Actes du Ve colloque international de robotique pédagogique*. FSE, Université de Montréal.
- Issroff, K. & E. Scanlon (2002) « Using technology in Higher Education : an Activity Theory perspective ». *Journal of Computer Assisted Learning* 18, p. 77-83.
- Lazarowitz, R. and P. Tamir (1994), « Research on using laboratory instruction in science », In D. L. Gabel *Handbook of research on science teaching and learning*. Maxwell Macmillan Canada, Toronto, p. 94-128.
- Linn, M.C. J.W. Layman et R. Nachmias (1987), « Cognitive consequences of micro-computer-based laboratories : graphing skills development », *Contemp Educ Psychol* 12(3), p. 244–253.
- Marcotte, A. et F. Fournier (2007), *Exemples de recherches de développement sur des environnements d'apprentissage en ExAO*. Actes du 9^e colloque francophone de Robotique Pédagogique. La Ferté Bernard, France : CFRP.
- Marcotte, M. (2004), *Les apports de l'expérimentation assistée par ordinateur (ExAO) en pédagogie par projet en Sciences de la nature au collégial*. Thèse de doctorat, Montréal, Université de Montréal. [En ligne]. [http ://www.theses.umontreal.ca/theses/FAC4.html](http://www.theses.umontreal.ca/theses/FAC4.html)
- McCorduck, P. (1985), *The universal machine : Confessions of a technological optimist*. New York : McGraw Hill.
- McRobbie, C. J., & G. P. Thomas (1998), « The use of microprocessor-based learning in senior chemistry Does technological innovation always

result in improved learning ? » *Paper presented at the annual conference of the Australian Association for Educational research*, Adelaide.

- Michelet, S. J.-M. Adam, J.-D. Pierre., C. Martel et V. Guéraud, (2007), « Une infrastructure logicielle pour instrumenter l'expérimentation des EIAH ». *Actes de la conférence EIAH*. En ligne : <http://enscientificcommons.org/27201876>
- Nachmias, R. & M. C. Linn, (1987), « Evaluations of science laboratory data : The role of computer-presented information ». *Journal of Research in Science Teaching.. vol. 24*, n° 5, p. 491-506
- Nonnon, P. (2002), « Robotique pédagogique et formation de base en science et technologie ». *Aster*, 34.
- Nonnon, P. (1998), « Intégration du réel et du virtuel en science expérimentale », 8^e *Journées Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Montpellier.
- Nonnon, P. (1986), *Acquisition d'un langage graphique de codage pour la modélisation en temps réel de données d'expérience*. Communication au 11^e Psychological Mathematical Education Congress, Canada, Montréal.
- Nonnon, P., G. Touma, F. Fournier et M. Riopel, (2007), « Un environnement informatisé d'apprentissage pour l'intégration de mathématiques, des sciences et de la technologie ». *Actes du 9^e colloque francophone de Robotique Pédagogique*. La Ferté Bernard, France : CFRP.
- 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. Montréal : Université de Montréal, Faculté des sciences de l'éducation, Département de didactique.
- Settouti, L. S. Y. Prié, A. Mille et J. C. Marty (2005), « Systèmes à base de trace pour l'apprentissage humain », *L'objet. Volume 8 – n°2*, p. 1 à 15.
- Thornton, R.K. & D.R. Sokoloff, (1990), « Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools ». *American Journal of Physics*, 58, p. 858–867.
- Touma, G. (2006), *Un paradigme d'expérimentation au laboratoire de sciences pour l'identification et l'optimisation statistique d'un modèle algébrique par interaction visuo-graphique*. Thèse de doctorat, Montréal, Université de Montréal.
- Trumper, R. (2003), « The Physics Laboratory – A Historical Overview and Future Perspectives ». *Science & Education*, 12, p.645–670.
- Vialle, B. (1999), « Utilisation de l'ordinateur dans l'enseignement d'une science expérimentale : La biologie au lycée », *La revue de l'Épi*, N° 93, La biologie au lycée, mars 1999.

Page laissée blanche intentionnellement

CHAPITRE 9



Utilisation de l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel en sciences¹

Steve Masson, Université du Québec à Montréal
Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal
Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

Grâce à de récentes techniques d'imagerie cérébrale dont l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle, il est aujourd'hui possible d'analyser la façon dont le cerveau des élèves travaille pour accomplir des tâches scolaires telles que lire, écrire, compter et même résoudre des problèmes d'ordre scientifique. Encore peu connues dans le domaine de l'éducation, ces techniques offrent pourtant d'intéres-

1. La rédaction de ce chapitre a été soutenue par une bourse ainsi que par des subventions du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada.

santes perspectives de recherche. En prenant appui sur une étude en cours portant sur les mécanismes cérébraux sous-tendant l'apprentissage des sciences, nous présenterons les avantages, les démarches et les contraintes liés à l'utilisation de l'imagerie cérébrale pour l'étude des processus du changement conceptuel.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, un nombre grandissant de chercheurs en éducation (Geake, 2003, 2004 ; Geake et Cooper, 2003 ; Goswami, 2004, 2006) et en neuroscience cognitive (Houdé, 2006 ; O'Boyle et Gill, 1998 ; Pettito et Dunbar, 2004) encouragent le développement d'une approche neuroscientifique de recherche en éducation dans un nombre croissant de publications. Ainsi, en 1999, l'OCDE lançait un projet novateur menant à la publication, en 2007, de l'ouvrage *Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage* dans lequel l'OCDE se montre clairement en faveur d'une telle approche : « La neuroscience de l'éducation débouche sur des connaissances précieuses et neuves, qui permettent d'informer politiques et pratiques éducatives » (p. 18). Puis, en 2007, le premier numéro de la revue *Mind, Brain, and Education* est publié. Il s'agit d'une revue dédiée à la recherche en éducation reposant sur une approche neuroscientifique qui a gagné le prix de la Meilleure Nouvelle Revue en sciences humaines par l'*Association of American Publishers*. En 2007 également, la première conférence de l'*International Mind, Brain and Education Society* (IMBES) a eu lieu au Texas et a réuni des chercheurs en neuroéducation. Finalement, en 2008, un ouvrage intitulé *The Educated Brain : Essays in Neuroeducation* est publié ; il regroupe plusieurs textes portant sur les fondements épistémologiques et méthodologiques du champ de recherche en émergence qu'est la neuroéducation.

Bien que les travaux de recherche soient de plus en plus nombreux, il n'existe qu'un nombre très limité d'études (dont nous discuterons plus loin) abordant des problèmes liés à l'apprentissage et l'enseignement des sciences reposant sur une approche neuroscientifique. En prenant appui sur la problématique et sur les cadres théorique et méthodologique d'une étude en cours sur l'étude des mécanismes cérébraux liés aux processus du changement conceptuel en physique à l'aide de l'imagerie cérébrale par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), ce texte discute de la pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel en

physique, ainsi que des démarches et contraintes liées à l'utilisation de ce type de technologie.

1. POURQUOI UTILISER L'IMAGERIE CÉRÉBRALE POUR L'ÉTUDE DU CHANGEMENT CONCEPTUEL ?

La pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel repose principalement sur deux arguments. Le premier est que l'imagerie cérébrale permet d'étudier les processus du changement conceptuel au niveau cérébral, ce qui peut à la fois stimuler de nouvelles hypothèses de recherche et vérifier les hypothèses existantes. Le deuxième argument – qui est en fait une illustration en appui au premier – est qu'il existe déjà des études neuroscientifiques portant sur l'étude du changement conceptuel et qui non seulement sont intéressantes, mais ouvrent de plus la voie à une vision totalement nouvelle des processus de changement conceptuel, dont le concept central est celui d'inhibition. Les deux prochaines sous-sections discutent de ces deux arguments.

1.1. Parce que l'imagerie cérébrale permet d'obtenir des données de recherche à un niveau d'analyse encore inexploré

L'apprentissage des sciences est perçu par les élèves (et souvent par les enseignants) comme un processus difficile et exigeant. La plupart du temps, cette difficulté est attribuée au fait que les sciences reposent sur des concepts abstraits (diSessa, 2006) qui exigent l'utilisation d'outils mathématiques complexes. À la fin des années 1970 et au début des années 1980, des chercheurs en didactique des sciences (par exemple, McCloskey, 1983 ; Viennot, 1979) ont proposé une hypothèse nouvelle concernant l'origine des difficultés en sciences. Selon ces chercheurs, l'apprentissage des sciences serait difficile, non pas parce qu'il repose sur un processus abstrait impliquant des habiletés particulières en mathématiques, mais parce que les élèves et les gens en général entretiennent, avant même leur premier cours de sciences, des conceptions spontanées en opposition avec les connaissances scientifiquement admises et qui viennent interférer avec l'apprentissage des sciences.

L'importance des conceptions erronées ou inappropriées des élèves dans l'apprentissage des sciences est aujourd'hui appuyée par un vaste travail de recherche incluant d'excellentes revues

(Confrey, 1990 ; Legendre, 2002 ; Wandersee, Mintzes et Novak, 1994), des répertoires très complets de dizaines de conceptions inappropriées courantes dans la plupart des domaines scientifiques (Thouin, 1996), et des bibliographies contenant des références à plusieurs milliers d'articles de recherche sur les conceptions des élèves (Duit, 2007). En fait, les conceptions inappropriées des élèves ont fait l'objet, au cours des dernières décennies, d'un effort de recherche sans précédent dans l'histoire récente de la recherche en didactique des sciences. Cet effort est justifié non seulement parce que ces conceptions inappropriées sont fréquentes, mais également parce qu'elles sont particulièrement difficiles à faire évoluer, ce qui cause un obstacle fondamental à l'enseignement des sciences : celui de la persistance des conceptions inappropriées des élèves. Cette persistance est si forte que les conceptions inappropriées perdurent même après plusieurs cours de sciences. Par exemple, malgré des études approfondies en électricité, plus de 10 % des étudiants de deuxième année en ingénierie continuent à croire qu'un seul fil est nécessaire pour qu'une ampoule s'allume (Periago et Bohigas, 2005). Cette situation n'est pas propre à l'apprentissage de l'électricité, puisque plus de 25 % des étudiants de première année du baccalauréat en physique continuent à croire dans la conception inappropriée selon laquelle une balle de métal de la même grosseur qu'une balle en plastique tombera plus rapidement au sol (Wandersee et coll., 1994).

Parallèlement aux études sur l'identification des conceptions des élèves, des chercheurs ont tenté de comprendre les processus par lesquels un individu doit passer pour réaliser un changement conceptuel, c'est-à-dire réussir le passage d'une conception inappropriée à une conception plus appropriée du point de vue de la science. L'un des premiers modèles du changement conceptuel – et l'un des plus cités dans la littérature de recherche du domaine – est celui de Posner, Strike, Hewson et Gertzog (1982). Ce modèle, inspiré de Piaget (1967) et de Kuhn (1962), suggère que le passage d'une conception inappropriée à une conception plus appropriée dépend de différentes conditions : (1) il doit y avoir insatisfaction par rapport aux conceptions existantes, (2) la nouvelle conception doit être intelligible, (3) elle doit être plausible, et (4) elle doit être fertile, c'est-à-dire elle doit donner la possibilité de trouver de nouvelles solutions à de nouveaux problèmes.

Bien que le plus cité, le modèle de Posner et coll. (1982) est loin de faire l'unanimité. En fait, il existe de nombreux modèles du changement conceptuel. Par exemple, le modèle de Duit et Treagust (2003) postule que les conceptions des élèves se situent à l'intérieur d'une structure conceptuelle. Ainsi, ce qui doit évoluer au cours du changement conceptuel, ce n'est pas simplement la conception, mais également la structure conceptuelle qui la sous-tend et la soutient. Pour Vosniadou (1994), il est important de situer la notion de changement conceptuel à un autre niveau que celui des concepts, parce que les conceptions, les structures conceptuelles et les concepts sont intégrés à une structure théorique plus grande qui les contraint. Ces grandes structures formant un « cadre théorique naïf » ne sont pas constituées de concepts – comme c'est le cas pour la notion de structure conceptuelle de Duit & Treagust (2003) – mais de présuppositions ontologiques et épistémologiques élaborées au cours de la petite enfance. Contrairement à Vosniadou, diSessa (1993) pense pour sa part que les réponses non scientifiques formulées par les élèves ne découlent pas nécessairement de théories naïves, mais qu'elles proviennent plutôt d'une utilisation inadéquate de règles ou d'outils cognitifs intuitifs et sous-conceptuels qu'on appelle les primitives phénoménologiques (p-prims). Au cours des processus de changement conceptuel, l'utilisation que fait l'apprenant d'une p-prim ou d'un ensemble de p-prims évolue parce que l'élève développe progressivement, selon diSessa (1998), des classes de coordination, c'est-à-dire des systèmes complexes de connaissances comportant plusieurs parties coordonnées incluant les p-prims (diSessa, 2006). Selon ce point de vue, le changement conceptuel est un processus par lequel un individu passe d'une utilisation intuitive de p-prims à leur utilisation systématique, qui est sous-tendue par tous les éléments organisés d'une classe de coordination ; cela revient à dire, en résumé, que le changement conceptuel est un processus par lequel l'individu développe une classe de coordination conforme au savoir scientifique. Mentionnons que de nombreux autres modèles existent, dont ceux de Chi (1992), de Pintrich (1993) et de Stavy et Tirosh (2000). Le nombre de modèles proposés, de même que le volume important d'articles sur le changement conceptuel, témoignent d'une part de l'importance de ce type de recherche sur la scène internationale et, d'autre part, de l'ampleur du travail de recherche qu'il reste à accomplir.

Il existe donc une variété de modèles hypothétiques du changement conceptuel et, bien que certains soient susceptibles de

s'enrichir mutuellement, il arrive souvent, comme nous l'avons lu au paragraphe précédent, que les modèles proposés par différents chercheurs reposent sur des bases théoriques fondamentalement opposées. L'existence de cette variété de modèles hypothétiques et souvent contradictoires démontre toute la complexité des processus mentaux impliqués dans le changement conceptuel et explique pourquoi, malgré les efforts soutenus des chercheurs, les processus fondamentaux liés au changement conceptuel demeurent encore très mal connus :

Il n'existe aucune théorie testée et bien articulée du changement conceptuel à laquelle un nombre important de chercheurs adhèrent. En fait, les études du domaine reposent sur différentes perspectives qui combinent de façon kaléidoscopique des idées théoriques et beaucoup de sens commun (diSessa, 2006, traduction libre, p. 266).

Ainsi, pour faire avancer significativement les connaissances actuelles dans le domaine du changement conceptuel et pour porter un regard neuf sur ces modèles, il nous semble essentiel de développer davantage la base de connaissances empiriques du domaine en utilisant des techniques et des méthodologies nouvelles.

L'une des façons les plus prometteuses et les plus originales de contribuer au développement de cette base de résultats empiriques de recherche est d'avoir recours aux récentes techniques d'imagerie cérébrale. Utilisée pour la première fois au début des années 1990 en psychologie (Ogawa et coll., 1992 ; Kwong et coll., 1992), l'imagerie cérébrale permet de mesurer l'activité cérébrale de différentes régions du cerveau au cours de la réalisation de tâches cognitives telles que lire, compter et même résoudre des problèmes d'ordre scientifique (Masson, 2007). Puisque nous connaissons de mieux en mieux les fonctions cognitives des différentes régions cérébrales grâce à la neuroscience cognitive (Gazzaniga, 2004 ; Houdé, Mazoyer et Tzourio-Mazoyer, 2001), il est possible de mieux comprendre la nature des ressources cognitives qui doivent être mobilisées lors de la résolution de problèmes d'ordre scientifique. Il est donc possible depuis peu d'analyser les processus du changement conceptuel au niveau cérébral en étudiant, durant l'activité cérébrale, les modifications liées à la réalisation d'un changement conceptuel (Dunbar, Fugelsang et Stein, 2007 ; Nelson, Lizcano, Atkins et Dunbar, 2007). Ces études de neuro-imagerie portant sur le changement conceptuel nous semblent particulièrement intéressantes, parce qu'elles apportent des informations sur une variable

qui n'a jamais été mesurée jusqu'à présent : l'activité cérébrale. Ces informations, combinées à celles provenant d'autres types de recherche, peuvent contribuer à construire des modèles du changement conceptuel plus complets.

Cet intérêt pour l'utilisation de la neuro-imagerie en éducation est soutenu par un nombre croissant de chercheurs, tant dans le domaine de l'éducation que dans celui de la neuroscience cognitive. Selon ces chercheurs, un des principaux avantages à utiliser l'imagerie cérébrale est de rendre possible l'étude de certains problèmes éducatifs (dont ceux liés au changement conceptuel) à un niveau d'analyse jusqu'ici inexploré, c'est-à-dire au niveau cérébral (Geake et Cooper, 2003 ; Dunbar et coll., 2007). L'accès à ce nouveau niveau d'analyse comporte des avantages certains pour la recherche. Par exemple, il stimule la formulation d'hypothèses inédites sur la nature des processus en jeu dans la réalisation de tâches scolaires et peut aider les chercheurs à choisir parmi différents modèles cognitifs en compétition, puisque l'imagerie cérébrale permet d'obtenir de l'information des contraintes imposées par le cerveau sur les processus cognitifs. De plus, selon Goswami (2004), l'imagerie cérébrale permet de connaître l'effet d'une intervention pédagogique sur le cerveau, en plus d'aider à diagnostiquer les enfants présentant des difficultés d'apprentissage.

1.2. Parce que les premiers résultats de recherche mènent à des interprétations inédites de la nature des processus de changement conceptuel

Les avantages de l'utilisation de l'imagerie cérébrale prennent forme à travers trois études récentes. Dans la première, Fugelsang et Dunbar (2005) ont étudié, à l'aide de l'IRMf, ce qui arrive au niveau cérébral lorsqu'on présente des informations (ou données) qui sont en opposition ou en accord avec les conceptions des individus concernant l'efficacité d'un médicament pour lutter contre la dépression. La présentation d'informations contredisant les conceptions des participants place ces derniers dans une situation de conflit cognitif équivalente à celle que pourrait provoquer la collecte des données inattendues dans un contexte scolaire d'expérimentation scientifique. Les informations sont présentées sous la forme d'images montrant une pilule à côté d'un bonhomme souriant (médicament efficace) ou déprimé (médicament inefficace). Les informations sont présentées l'une à la suite de l'autre par blocs contenant plus ou

moins de bonshommes souriants, ce qui permet d'obtenir des données globalement en accord ou en désaccord avec les conceptions des participants. Après la présentation du bloc d'informations, les participants doivent évaluer l'efficacité du médicament sur une échelle de 1 (basse) à 3 (élevée).

Ils ont découvert que l'hippocampe, une région du cerveau associée à l'apprentissage et à la mémoire (par exemple, Poldrack, Clark, Pare-Blagoev, Shohamy, Creso Moyano, Myers et coll., 2002), est plus activé lors de la présentation d'informations en accord avec les conceptions des participants que lors de la présentation d'informations en désaccord. Cela pourrait signifier que les individus intègrent plus efficacement les informations présentées lorsque ces dernières sont en accord avec leurs conceptions. Ils ont également découvert que le cortex cingulaire antérieur associé à la détection de conflit (Botvinick, 2007), le cortex préfrontal dorsolatéral gauche lié à l'inhibition (Goel et Dolan, 2003) et le précuneus lié au transfert de ressources attentionnelles (Mazoyer, Wicker et Fonlupt, 2002) sont plus activés lors de la présentation d'informations qui s'opposent aux conceptions des individus que lors de la présentation d'informations qui y concordent.

Ces découvertes suggèrent que le cerveau détecte d'abord, à l'aide du cortex cingulaire antérieur, l'existence d'un conflit entre la conception sur l'efficacité du médicament et les données présentées. Ensuite, au lieu d'activer des régions cérébrales liées à l'apprentissage comme l'hippocampe, le cerveau, en ayant recours au cortex préfrontal dorsolatéral, met fin à l'attention requise par la tâche, comme si les données étaient sans intérêt puisqu'erronées. Finalement, le cerveau active le précuneus pour détourner son attention de la tâche. Selon Dunbar et coll. (2007), cela montre clairement qu'une stratégie pédagogique axée uniquement sur le conflit cognitif, c'est-à-dire sur la présentation de données incompatibles avec les conceptions des individus, ne produira pas de changement conceptuel, puisque les participants à l'étude semblent traiter les informations reçues comme si elles étaient erronées et sans intérêt plutôt qu'intéressantes et pouvant susciter des apprentissages.


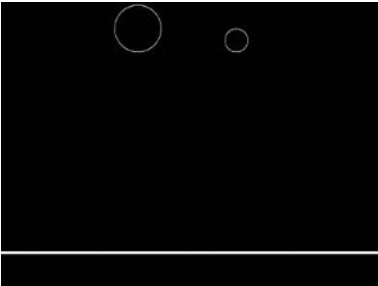
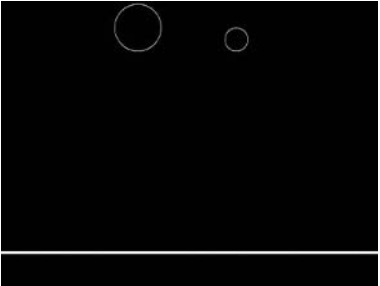
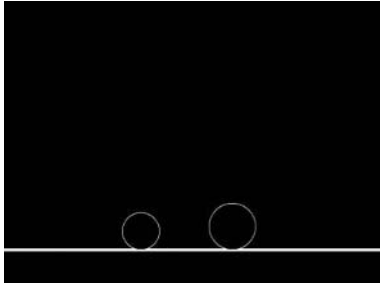
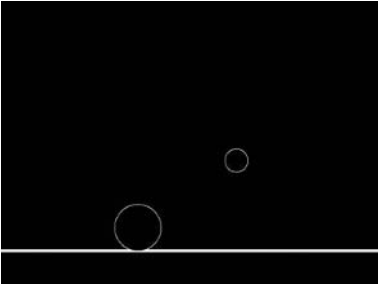
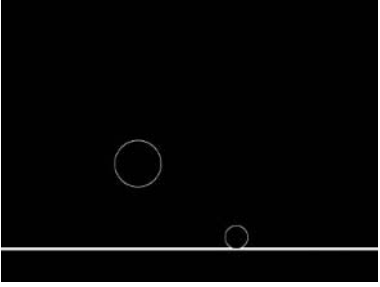
Dans la deuxième étude, Dunbar et ses collaborateurs (Dunbar et coll., 2007 ; Pettito et Dunbar, 2004) ont tenté d'explorer les mécanismes cérébraux qui sous-tendent les processus du changement conceptuel en physique mécanique. Pour ce faire, ils ont com-

paré l'activité cérébrale de deux groupes. Un premier groupe est formé d'étudiants universitaires qui n'ont suivi aucun cours de sciences. Un second est formé d'étudiants universitaires ayant suivi au moins cinq cours de physique. Les étudiants des deux groupes possèdent des moyennes universitaires comparables et la proportion d'hommes et de femmes y est identique. La tâche cognitive demandée aux participants consiste à appuyer sur un bouton pour dire si le film montrant deux balles qui tombent est conforme à ce qui arriverait dans un environnement sans frottement (voir tableau 1). On présente aux participants des films naïfs (c'est-à-dire conformes aux conceptions des novices : la balle la plus grosse tombe plus vite), des films scientifiques (c'est-à-dire conformes aux conceptions des experts : la balle la plus grosse tombe à la même vitesse que la plus petite) et des films de contrôle (c'est-à-dire en contradiction avec les conceptions des individus des deux groupes : la balle la plus petite tombe plus rapidement).

L'un des résultats les plus intéressants de cette étude est que les étudiants novices en physique ayant répondu de façon scientifique à la tâche présentée activent notamment leur cortex cingulaire antérieur (lié à la détection de conflits) malgré le fait que les participants affirment ne pas percevoir de conflits entre leurs conceptions et les informations présentées. Selon Dunbar et coll. (2007), cela pourrait signifier que les novices n'ont pas réalisé un profond changement conceptuel, mais arrivent à inhiber leurs réponses inappropriées. Cette idée d'inhibition est particulièrement intéressante, parce qu'elle remet en question la représentation habituelle des chercheurs en matière de processus du changement conceptuel, représentation qui consiste souvent à effacer ou à restructurer en profondeur les connaissances antérieures. Elle pave aussi la voie à une nouvelle façon de concevoir l'apprentissage des sciences.

Plusieurs théoriciens du domaine de l'éducation voient la réorganisation conceptuelle comme *le* but principal de l'éducation, et considèrent le changement conceptuel d'une façon telle que les élèves ne seront plus capables de conceptualiser leurs anciennes théories après un changement conceptuel (la notion d'incommensurabilité de Kuhn). Cependant, les résultats des expériences rapportées dans ce chapitre indiquent que, même quand le changement conceptuel semble avoir eu lieu, les élèves ont encore accès à leurs anciennes théories naïves, et ces théories semblent avoir été activement inhibées plutôt que réorganisées et absorbées dans une nouvelle théorie. (Dunbar et coll., 2007, traduction libre, p. 8)

TABLEAU 1
Exemples de tâche cognitive en mécanique
 (les stimuli sont des films et le tableau ne présente que les première et dernière images)

	Stimulus scientifique	Stimulus naïf	Stimulus de contrôle
Première image du film	a 	c 	e 
Dernière image du film	b 	d 	f 

Dans une troisième étude portant cette fois sur les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en chimie (plus précisément, concernant les changements de phase de la matière), Nelson et coll. (2007) ont demandé à des novices (n'ayant suivi aucun cours autre que celui de chimie générale au secondaire et n'ayant pas suivi de cours de chimie depuis au moins deux ans) et à des experts (ayant suivi au moins quatre cours de chimie) d'indiquer si une image montrant des molécules représente bien ce qui arrive aux molécules d'un liquide après son évaporation. Comme en mécanique, la tâche est composée de stimuli scientifiques, de stimuli naïfs et de stimuli de contrôle.

Ces chercheurs ont observé que les experts activent davantage le cortex préfrontal, alors que les novices sollicitent davantage des régions du lobe temporal inférieur et du lobe occipital. Ces résultats s'accordent avec les résultats obtenus par Houdé et coll. (2000) concernant le raisonnement logique. À l'instar de Houdé et coll. (2000), Nelson et coll. (2007) observent que, pour réussir la tâche, les participants doivent inhiber leur stratégie spontanée et inappropriée s'appuyant seulement sur des informations superficielles au profit d'une stratégie plus complexe impliquant des mécanismes d'inhibition et de contrôle cognitif qui mobilisent des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le cortex préfrontal.

Ces trois études ont des implications considérables sur la recherche portant sur les processus du changement conceptuel. La première remet en question l'efficacité de l'utilisation de stratégies pédagogiques strictement basées sur le conflit cognitif. La seconde conteste l'idée fondamentale selon laquelle le changement conceptuel implique une éradication ou une restructuration majeure des connaissances antérieures et propose d'inclure, dans notre interprétation des processus du changement conceptuel, le concept d'inhibition. La troisième fournit les premiers éléments d'un modèle qui expliquerait de quelle façon les connaissances antérieures peuvent être inhibées grâce à un meilleur contrôle cognitif. Sans l'utilisation de la neuro-imagerie, aucune de ces découvertes n'aurait vu le jour.

2. COMMENT UTILISER L'IMAGERIE CÉRÉBRALE POUR L'ÉTUDE DU CHANGEMENT CONCEPTUEL ?

Après avoir traité de la pertinence d'utiliser l'imagerie cérébrale pour l'étude du changement conceptuel, nous présentons maintenant les différentes étapes et contraintes liées à la réalisation d'un projet de recherche impliquant la neuro-imagerie. Pour illustrer notre propos, nous donnons l'exemple d'une étude en cours les mécanismes cérébraux qui sous-tendent le processus du changement conceptuel en physique à l'aide de l'IRMf.

2.1. En définissant des hypothèses de recherche opérationnelles

Dans un projet de neuro-imagerie, les hypothèses de recherche jouent un rôle central. Elles doivent à la fois s'appuyer sur les connaissances existantes quant au fonctionnement du cerveau et s'avérer suffisamment opérationnelles pour rendre possible l'analyse des données. En général, une hypothèse prendra la forme : « Si la variable indépendante X augmente (ou diminue), alors l'activité de la région cérébrale Y devrait augmenter (ou diminuer). » (Huettel, Song et McCarthy, 2004).

Les hypothèses de la recherche en cours s'appuient sur des éléments des études antérieures discutées à la section précédente. Premièrement, à la fois dans l'étude de Fugelsang et Dunbar (2005) et dans celle de Dunbar, Fugelsang et Stein (2007), le cortex cingulaire antérieur, une région associée à la détection de conflits selon Botvinick (2007), est plus activé lorsqu'on présente des informations qui entrent en conflit avec les conceptions antérieures des participants. Deuxièmement, à la fois dans l'étude de Houdé et coll. (2000) et dans celle de Nelson et coll. (2007), on observe que les novices d'un domaine utilisent davantage des régions cérébrales associées à des stratégies perceptuelles, alors que les experts activent davantage des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le lobe frontal. La théorie de Botvinick permet de lier ces deux résultats expérimentaux : l'activation du cortex cingulaire antérieur détecte les conflits qui signalent la nécessité d'utiliser des fonctions cognitives de haut niveau situées dans le cortex préfrontal.

Nous appuyant sur ces études, nous croyons que, pour réaliser un changement conceptuel, l'individu doit apprendre à inhiber ses réponses inappropriées en mettant plus à profit des régions céré-

brales liées à la détection de conflits (cortex cingulaire antérieur) et au contrôle cognitif (régions du cortex préfrontal). Les hypothèses retenues sont donc les suivantes :

Hypothèse 1 : Les novices activent davantage le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal après avoir subi un conflit cognitif.

- ♦ Si vrai, alors l'inhibition et le contrôle cognitif pourraient jouer un rôle dans le processus de changement conceptuel.

Hypothèse 2 : Les experts activent davantage le cortex cingulaire antérieur et le cortex préfrontal que les novices :

- ♦ Si vrai, alors l'inhibition et le contrôle cognitif jouent un rôle constant dans la formulation de réponses scientifiques.

2.2. En choisissant un échantillon de participants assez homogène et assez grand

Pour détecter des différences statistiquement significatives, il faut non seulement un nombre suffisant de sujets par groupe, mais il faut aussi que la variabilité cérébrale entre les sujets d'un groupe ne soit pas trop élevée. Pour réduire la variabilité entre les sujets d'un même groupe, il est nécessaire de déterminer des critères de sélection favorisant l'obtention d'un échantillon homogène.

Dans notre étude, les participants des deux groupes (experts et novices) sont des hommes droitiers âgés de 20 à 35. La cote R des études collégiales ainsi que la moyenne universitaire des deux groupes sont comparables d'un groupe à l'autre. Pour cette raison, les individus présentant une cote R ou une moyenne universitaire atypique, c'est-à-dire inférieure à 2,7 sur 4,3 ou supérieur à 4,0 sur 4,3 sont exclus de l'étude. Nos groupes de sujets sont formés de 15 personnes. Les 15 participants novices sont des étudiants de troisième année d'un baccalauréat non scientifique (par exemple, psychologie, administration) qui n'ont jamais suivi de cours optionnels en sciences durant leur parcours scolaire, et dont les réponses à un questionnaire montrent qu'ils adhèrent à des conceptions inappropriées. Les 15 participants experts sont des étudiants de troisième année d'un baccalauréat scientifique (par exemple, physique, chimie, génie) qui ont suivi un minimum de quatre cours universitaires en

physique mécanique et en électricité, et dont les réponses au questionnaire montrent qu'ils possèdent des conceptions appropriées. Plus l'écart d'expertise est grand entre novices et experts, plus nombreuses sont les chances que la différence entre les groupes soit significative. Cependant, pour des raisons associées au recrutement, il n'est pas réaliste de penser qu'il soit possible de recruter autant d'experts et de novices à un niveau supérieur à celui du baccalauréat.

2.3. En choisissant la technique d'imagerie cérébrale la plus appropriée pour tester les hypothèses de recherche

Il existe plusieurs techniques d'imagerie cérébrale pour mesurer un signal corrélé avec l'activité cérébrale. Chacune des techniques comporte des avantages et des inconvénients. La tomographie par émission de positrons permet de mesurer la variation locale de débit sanguin (ce qui peut être utile pour répondre à des questions de recherche en lien avec la réponse physiologique à l'activation cérébrale), mais cette technologie nécessite l'injection de marqueurs radioactifs dans le système sanguin. Plus ancienne, cette technique n'offre pas une résolution spatiale aussi bonne que l'IRMf. L'électroencéphalographie a une excellente résolution temporelle et mesure directement l'activité électrique du cerveau, mais ne permet pas la localisation de l'activation. La magnétoencéphalographie offre une excellente résolution spatiale et temporelle en plus de mesurer directement les champs magnétiques produits par les potentiels d'action des neurones. Par contre, cette technologie ne permet pas de mesurer l'activité sous-corticale du cortex cingulaire antérieur qui nous intéresse. L'imagerie optique, ou tomographie optique, facilite la localisation et est moins sensible aux mouvements de tête que les autres techniques, en plus d'être relativement silencieuse, mais la résolution spatiale est moins bonne, et cette technologie, comme la magnétoencéphalographie, ne permet pas d'atteindre le cortex cingulaire antérieur.

L'IRMf est choisie dans notre étude parce qu'il s'agit de la seule technique d'imagerie non invasive (c'est-à-dire qu'elle ne requiert pas l'utilisation de marqueurs radioactifs comme la tomographie par émission de positrons) qui permet d'étudier l'activation de régions sous-corticales, comme le cortex cingulaire antérieur.

L'IRMf est une technologie récente, utilisée seulement depuis le début des années 1990. L'appareil est composé d'un aimant supraconducteur puissant (de 1,5 à 3,0 Tesla, et parfois même plus), de gradients magnétiques utilisés pour la localisation spatiale et de générateurs d'ondes électromagnétiques qui agissent aussi comme des antennes captant le signal. Le principe de l'IRMf repose sur le fait que, lors de l'activation d'une région cérébrale, on observe une augmentation locale de la concentration d'hémoglobine oxygénée. Comme l'hémoglobine oxygénée et l'hémoglobine désoxygénée ne présentent pas les mêmes propriétés magnétiques, on observe une variation de signal lorsque la concentration change et que l'activité cérébrale varie.

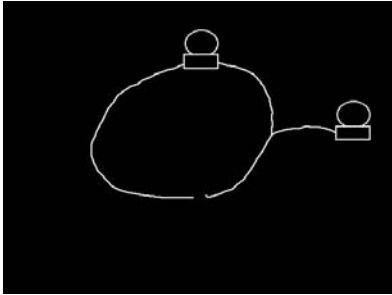
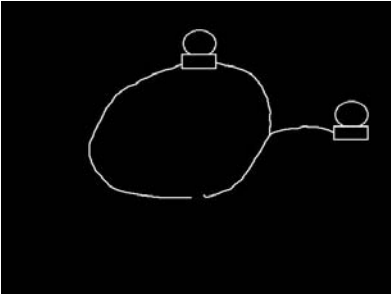
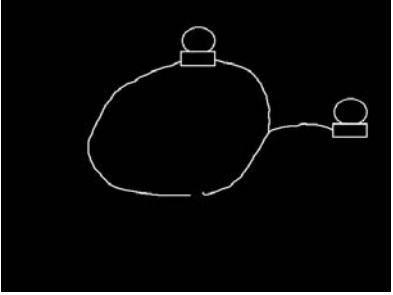
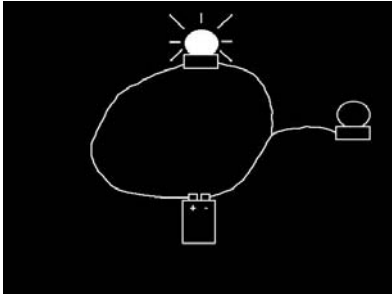
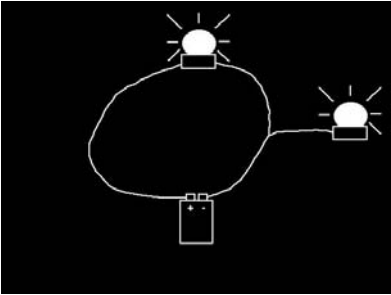
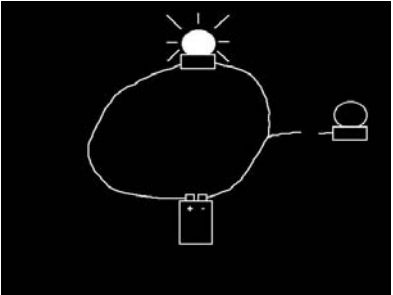
2.4. En concevant des tâches cognitives qui respectent les contraintes liées à l'utilisation de l'imagerie cérébrale

Pour concevoir des tâches cognitives utilisables en neuro-imagerie, il faut respecter un ensemble de contraintes qu'impose l'utilisation de l'IRMf. Premièrement, lors de l'acquisition des données, la tête des participants doit demeurer complètement immobile, puisque des mouvements de tête de l'ordre de quelques millimètres peuvent rendre les données inutilisables. À cause de cette contrainte, il est préférable d'éviter de demander aux participants de fournir des réponses verbales ou écrites. On peut cependant demander aux participants d'appuyer sur des boutons, la tâche devant donc impliquer un choix de réponses. En raison du bruit de l'appareil durant l'acquisition des données, il est difficile de présenter des informations verbales aux participants, les informations visuelles sont donc à privilégier (images, films, etc.). En plus des contraintes liées à l'acquisition des données, il existe des contraintes liées à l'analyse des données. Il faut savoir que le signal découlant de l'activation d'une région cérébrale est très faible (de l'ordre de 1 à 2 % plus grand que le niveau de base). Pour maximiser les chances de détecter une différence statistiquement significative, il faut plusieurs sujets (10 à 20 sujets par groupe, selon l'hypothèse de recherche à vérifier) ainsi que plusieurs mesures pour chacune des conditions expérimentales (habituellement, entre 20 et 30 mesures).

Dans notre étude sur les mécanismes cérébraux du changement conceptuel en physique, la tâche cognitive demandée au participant s'inspire de celle de Dunbar et coll. (2007) et consiste à déterminer (en appuyant sur l'un ou l'autre des boutons) si chaque stimulus présenté à l'écran est conforme à ce qui se passerait en situation réelle. Les stimuli utilisés dans la tâche mettent en scène deux conceptions particulières, l'une en mécanique et l'autre en électricité. Ces conceptions courantes et inappropriées sont largement documentées en éducation (Confrey, 1990 ; Wandersee et coll., 1994) : les objets plus lourds tombent plus vite (dans un environnement sans friction) et un seul fil est nécessaire pour allumer une ampoule. Pour chacune des conceptions, on présente aux participants des stimuli naïfs (c'est-à-dire conformes aux conceptions inappropriées des novices), des stimuli scientifiques (c'est-à-dire conformes aux conceptions des experts) et des stimuli de contrôle (auxquels les novices et les experts répondent de la même façon). Les tableaux 1 et 2 présentent quelques exemples d'images tirées des stimuli utilisés dans la tâche.

Deux aspects distinguent notre étude des études antérieures. Premièrement, aucune étude n'a porté sur les mécanismes cérébraux du changement conceptuel en électricité (seuls les mécanismes cérébraux liés au changement conceptuel en mécanique et en chimie ont été étudiés). Deuxièmement, nous allons faire subir un conflit cognitif aux participants en leur donnant, au milieu de la tâche, les réponses scientifiquement appropriées. Ces réponses scientifiques s'opposent aux réponses inappropriées que les novices auront fournies précédemment. En comparant l'activité cérébrale avant et après ce conflit cognitif, nous serons en mesure de déterminer les modifications dans l'activité cérébrale engendrée par cette intervention.

TABLEAU 2
Exemples de tâche cognitive en électricité

	Stimulus scientifique	Stimulus naïf	Stimulus de contrôle
Première image du film	a 	c 	e 
Dernière image du film	b 	d 	f 

Les stimuli sont présentés selon un protocole événementiel qui consiste à alterner de façon aléatoire stimuli naïfs, stimuli scientifiques et stimuli de contrôle. La séance d'IRMf de chaque sujet se déroule en trois étapes :

- 1) On présente d'abord les stimuli en deux séries de 5 minutes comprenant chacune 60 stimuli en mécanique et 60 en électricité (soit, pour chaque série : 20 stimuli de contrôle + 20 stimuli naïfs + 20 stimuli scientifiques). Chaque stimulus est présenté pendant environ 2 secondes suivies de 3 secondes de repos en moyenne (temps de repos variant de 2,5 à 3,5 secondes)
- 2) On présente ensuite les réponses de chacune des catégories de stimuli deux fois (on montre le stimulus, puis une seconde image donne la réponse en écrivant « Bon » ou « Mauvais »). Durant cette étape d'une minute, le sujet n'appuie sur aucun bouton.
- 3) On présente finalement à nouveau les deux séries de stimuli présentées lors de l'étape 1.

2.5. En prétraitant et en analysant les données de la façon la plus appropriée pour tester les hypothèses de recherche

Après avoir défini des hypothèses de recherche opérationnelles, déterminé les critères de sélection des participants pour obtenir des groupes assez homogènes, choisi la meilleure technique d'imagerie pour répondre à l'hypothèse posée, et élaboré une tâche cognitive respectant les contraintes liées à l'imagerie cérébrale, il reste à prétraiter et à analyser les données. Afin d'être en mesure de comparer les images les unes aux autres, nous devons corriger le mouvement car, rappelons-le, un déplacement de la tête de l'ordre de 2 mm peut rendre les données inexploitable. Pour y arriver, l'algorithme de Cox et Jesmanowicz (1999) peut être utilisé. Cet algorithme considère le cerveau comme un objet rigide et applique des transformations spatiales selon six paramètres (trois paramètres associés aux translations en x, y et z, ainsi que trois paramètres liés aux trois angles possibles de rotation de la tête) pour aligner les images d'une série par rapport à une image de référence (par exemple, la troisième). En réalisant une correction du mouvement, on s'assure qu'une région du cerveau est à la même position durant

toute la période de l'acquisition des données, ce qui est essentiel pour faire les analyses.

Une fois la correction du mouvement réalisée, il est nécessaire d'améliorer le rapport signal sur bruit en procédant à un lissage des données. Ce lissage consiste à répartir le signal de chacune des unités de volumes (ou voxels) du cerveau aux voxels environnants. Pour ce faire, on répartit le signal selon une fonction gaussienne d'une largeur d'environ 6 mm à la moitié de la hauteur du maximum (environ deux fois la taille d'un voxel). En plus d'améliorer le rapport signal sur bruit en diminuant les pics des intensités extrêmes et en renforçant la valeur des voxels fortement activés entourés de voxels qui sont eux aussi fortement activés, cela diminue les risques de considérer des artefacts comme des régions significativement activées. Un autre avantage considérable du lissage est de faciliter la détection de régions qui sont activées chez plusieurs sujets. En effet, comme chaque cerveau est différent, le lissage permet d'éviter la situation où un voxel ne serait pas clairement activé parce que les régions cérébrales d'intérêt d'une personne ne se trouvent pas exactement dans les mêmes voxels que celles d'une autre.

Pour tempérer les données de plusieurs sujets et comparer l'activité cérébrale des sujets, il faut procéder à la normalisation des cerveaux des individus. En effet, puisque chaque cerveau possède une forme différente et que, pourtant, nous voulons comparer l'activation de régions précises, il est nécessaire de modifier la forme des cerveaux des sujets pour qu'ils aient tous la même largeur, la même longueur, etc. Les logiciels permettant d'accomplir cette normalisation repèrent les contours d'une image de référence et les contours des images du cerveau à transformer. Le cerveau de référence du *Montreal Neurological Institute*, formé de la moyenne de 152 cerveaux, peut être utilisé à cette fin. Après avoir identifié les contours, les logiciels les normalisent afin qu'ils soient similaires à l'image de référence.

Une fois les données corrigées pour le mouvement, lissées et normalisées, on peut évaluer si une région est clairement activée à partir d'un test-t. Les analyses statistiques se basent sur un modèle linéaire général dans lequel on suppose que les données (y) sont modélisables à partir de la combinaison linéaire de différents facteurs (x_i) ayant différentes pondérations (β_i) ainsi qu'une certaine variabilité inexpliquée par le modèle (ϵ).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (1)$$

Les facteurs dépendent du design de l'expérience, c'est-à-dire de l'ordre de présentation des stimuli (départ, durée, etc.), mais aussi d'autres facteurs, tels l'activation de base (au repos) et des facteurs liés à la dérive temporelle du signal due à l'appareillage. Les facteurs qui dépendent du design sont modélisés par la multiplication de la fonction de la réponse hémodynamique (c'est-à-dire la façon dont le signal augmente progressivement à partir du début de la présentation du stimulus jusqu'à son déclin progressif quelques secondes après la présentation du stimulus). Ensuite, par la méthode des moindres carrés, on obtient les valeurs des différentes pondérations (β) qui minimisent ε . Sous forme matricielle comprenant les valeurs de tous les voxels à tous les temps, on obtient :

$$Y = X \beta + \varepsilon \quad (2)$$

Pour déterminer quelles sont les régions qui sont clairement activées, c'est-à-dire si β est significativement plus grand que zéro, on utilise un test-t divisant la moyenne de la pondération des facteurs ($\bar{\beta}$) par l'écart-type des pondérations :

$$t = \frac{\bar{\beta}}{\text{Écart-type}(\beta)} \quad (3)$$

Pour déterminer s'il existe une différence importante entre deux régions ou deux groupes, on a également recours à un test-t en utilisant $\beta_a - \beta_b$ au lieu de β .

La détermination du seuil de signification est problématique à cause du nombre considérable de voxels impliqués (par exemple, $n = 100\ 000$). Si on fixe le seuil à $\alpha = 0,05$, un nombre considérable de voxels paraîtront avoir été clairement activés (5000), mais ils ne l'auront pas été. Si l'on applique la correction de Bonferroni pour les comparaisons multiples,

$$\alpha_{\text{bon}} = \alpha / n \quad (4)$$

on obtient $\alpha_{\text{bon}} = 0,05/100\ 000 = 0,000\ 000\ 5$, ce qui est trop strict et risque d'augmenter les possibilités que des régions cérébrales ne paraissent pas vraiment activées, alors qu'en réalité elles le sont. La correction de Bonferroni est habituellement pertinente si l'on postule que tous les voxels sont indépendants, mais ce n'est pas le cas ici. D'abord, les voxels adjacents sont fortement corrélés (pour des raisons physiologiques, mais aussi techniques liées à la saisie

du signal d'IRMf) et, ensuite, puisqu'un lissage spatial est appliqué aux données, les voxels deviennent nécessairement corrélés les uns aux autres. La solution consiste à déterminer le seuil de signification à partir de la théorie des champs gaussiens aléatoires (Worsley et coll., 1995). Cette théorie évalue le nombre de voxels qui sont réellement indépendants (R) à partir de la corrélation spatiale qui est supposée gaussienne, et dont on cherche la largeur à la moitié de l'intensité (V). Après avoir déterminé V par la théorie des champs gaussiens aléatoires, on peut estimer le nombre de voxels indépendants par :

$$R = n / V^3 \quad (5)$$

Si $V = 3$, alors le nombre de voxels indépendants est réduit de 3^3 fois. Dans notre étude, la signification sera déterminée de cette façon.

Habituellement, nous ne voulons pas connaître l'activité cérébrale d'un seul individu, mais plutôt celle d'un groupe entier de sujets, alors il faut tempérer les résultats de l'ensemble des sujets. Il existe trois façons de le faire. La première est une analyse à effets fixes dans laquelle on combine tous les points de tous les sujets dans une seule matrice pour ensuite réaliser des statistiques. La seconde est une analyse à effets aléatoires réalisée en deux temps. On obtient d'abord les cartes statistiques de chacun des sujets et on compare ensuite statistiquement l'ensemble des cartes ainsi obtenues. Chacune de ces deux méthodes comporte des avantages et des inconvénients (Huettel et coll., 2004). La première méthode est très sensible aux données extrêmes et ne permet pas d'extrapoler les résultats à l'ensemble de la population à l'étude. Si, par exemple, sur un échantillon de 10 sujets, nous avons deux sujets qui réagissent fortement aux stimuli, alors on peut obtenir des résultats statistiquement significatifs pour l'ensemble du groupe, même si huit des sujets n'ont pas réagi à la tâche. La seconde comporte pour sa part l'avantage de permettre de généraliser les résultats à la population étudiée, parce que les données de chacun des sujets ont été testées statistiquement et que les cartes statistiques obtenues ont été ensuite testées pour voir si elles étaient statistiquement comparables. Cependant, elle est particulièrement stricte, et il existe un risque important de ne pas obtenir de résultats statistiquement significatifs, alors que l'effet est bien présent. La troisième façon est une alternative à ces deux types d'analyse : l'analyse mixte qui utilise des algorithmes de calculs différents pour se situer dans un

continuum entre les analyses à effets fixes et celles à effets aléatoires. Dans notre étude, nous comptons utiliser les algorithmes d'analyse à effets mixtes développés par Worsley, Liao, Aston, Petre, Duncan, Morales et coll. (2002).

CONCLUSION

Comme nous l'avons vu, l'imagerie cérébrale offre des opportunités de recherche inédites et des plus prometteuses. En permettant d'obtenir des résultats de recherche sur une variable dépendante qui n'a jamais pu être mesurée auparavant (l'activité cérébrale), cette technologie permet de contribuer de manière considérable au développement des connaissances sur les processus du changement conceptuel. Déjà, les premières études de ce domaine en émergence donnent la possibilité de remettre en question la représentation communément admise selon laquelle le changement conceptuel implique l'effacement ou la restructuration des connaissances antérieures, et de proposer de nouveaux concepts comme celui d'inhibition. Bien que des plus intéressantes, l'utilisation de l'imagerie cérébrale impose cependant de nombreuses contraintes qui rendent complexe et exigeante la démarche de recherche, de la formulation d'hypothèses opérationnelles à l'analyse des données,.

L'une des étapes les plus difficiles dans un projet de recherche impliquant la neuro-imagerie est l'élaboration d'une tâche cognitive répondant aux contraintes imposées par cette technologie. Heureusement, au fur et à mesure que les études en neuro-imagerie se développeront, de plus en plus de tâches connues par les chercheurs pourront être utilisées et réutilisées dans différents contextes de recherche par différents chercheurs, comme c'est le cas actuellement en neurosciences cognitives. D'ailleurs, depuis quelques années, un certain nombre de tâches ont été développées pour étudier notamment la lecture et, plus récemment, les mathématiques. À partir de ces tâches qui seront de plus en plus nombreuses et de plus en plus adaptées aux problèmes liés au domaine de l'éducation, il sera possible d'envisager une diversité d'études. Par exemple, on pourra étudier les fonctions cérébrales impliquées dans la réalisation d'une tâche, comparer l'activité cérébrale de novices et d'experts en sciences, et même étudier l'effet d'une intervention pédagogique sur le cerveau en faisant réaliser la tâche aux participants avant et après l'intervention. Mieux encore, il sera possible de comparer les effets de différentes approches pédagogiques sur le cerveau telles

que l'enseignement magistral et l'apprentissage par la découverte. Bref, dans les prochaines années, les études utilisant l'imagerie cérébrale seront de plus en plus nombreuses et contribueront manifestement à développer nos connaissances sur les processus liés à l'apprentissage des sciences et des savoirs scolaires en général.

BIBLIOGRAPHIE

- Botvinick, M. M. (2007), « Conflict monitoring and decision making : reconciling two perspectives on anterior cingulate function », *Cognitive, Affective, & Behavior Neuroscience*, 7 (4), p. 356-366.
- Chi, M. T. H. (1992), « Conceptual change within and across ontological categories : Examples from learning and discovery in science », dans R. Giere (Ed.), *Cognitive models of Science : Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Minneapolis, MN : University of Minnesota Press, p. 129-186.
- Confrey, J. (1990). « A review of the research on student conceptions in mathematics, science, and programming », dans C. B. Cazden (Ed.), *Review of Research in Education* 16, Washington, NW : American Educational Research Association, p. 3-56.
- Cox, B. et A. Jesmanowicz, (1999), « Real-time 3D image registration for functional MRI », *Magnetic Resonance in Medicine*, 41, p. 1014-1018.
- diSessa, A. A. (1993), « Toward an epistemology of physics », dans *Cognition and Instruction*, 10 (2-3), p.105-225.
- diSessa, A. A. (2006), « A history of conceptual change research : threads and fault lines », dans R. K. Sawyer (Ed.), *Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, Cambridge, UK : Cambridge University Press, p. 265-281.
- Duit, R. (2007), « Bibliography on students' and teachers' conceptions and science education », Retrieved March 12th, 2007, from <http://ipn.uni-kiel.de/aktuell/stcse/stcse.html>
- Duit, R. et D. F. Treagust (2003), « Conceptual change : a powerful framework for improving science teaching and learning », *International Journal of Science Education*, 25 (6), p. 671-688.
- Dunbar, K. N., J. A. Fugelsang et C. Stein, (2007), « Do naïve theories ever go away ? Using brain and behavior to understand changes in concepts », dans M. C. Lovett & P. Shah (Eds.), *Thinking with Data : 33rd Carnegie Symposium on Cognition*, Mahwah, NJ : Erlbaum, p. 193-206. Retrieved May 20th, 2008, from <http://www.dartmouth.edu/~kndunbar/publications.html>
- Fugelsang, J. A. et K. N. Dunbar (2005), « Brain-based mechanisms underlying complex causal thinking », *Neuropsychologia*, 43 (8), p. 1204-1213.

- Gazzaniga, M. S. (2004), *Cognitive neurosciences III*. Cambridge, MA : MIT Press.
- Geake, J. et P. Cooper (2003), « Cognitive neuroscience : implications for education », *Westminster Studies in Education*, 26 (1), p. 7-20.
- Geake, J. G. (2003), « Adapting Middle Level educational practices to current research on brain functioning », *Journal of the New England League of Middle Schools*, 15(2), p. 6-12.
- Geake, J. G. (2004), « Cognitive neuroscience and education : two-way traffic or one-way street ? », *Westminster Studies in Education*, 27 (1), p. 87- 98.
- Goel, V. et R. J. Dolan (2003), « Explaining modulation of reasoning by belief », *Cognition*, 87 (1), p.11-22.
- Goswami, U. (2004), « Neuroscience and education », *British Journal of Educational Psychology*, 74 (1), p. 1-14.
- Houdé, O. (2006), « Neuropédagogie ? Entretien avec Olivier Houdé réalisé par Gilles Marchand », *Le Monde l'intelligence*, 4, p. 18-19.
- Houdé, O., B. Mazoyer et N. Tzourio-Mazoyer (2001), *Cerveau et psychologie : introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Houde, O., L. Zago, E. Mellet, S. Moutier, A. Pineau, B. Mazoyer et coll. (2000), « Shifting from the perceptual brain to the logical brain : The neural impact of cognitive inhibition training », *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (5), p.721-728.
- Huettel, S. A., A. W. Song et G. McCarthy, (2004), *Functional magnetic resonance imaging*. Sunderland, USA : Sinauer Associates Inc.
- Kuhn, T. S. (1962), *The structure of scientific revolutions*. Chicago : University of Chicago Press.
- Kwong, K. K., J. W. Belliveau, D. A. Chesler, I. E. Goldberg, R. M. Weisskoff, B. P. Poncelet et coll (1992), « Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation », *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 89, p. 5675-5679.
- Legendre, M.-F. (2002), « Le rôle du raisonnement qualitatif dans les processus de changement conceptuel et ses implications pour l'enseignement », dans R. M. J. Toussaint (Ed.), *Changement conceptuel et apprentissage des sciences, recherches et pratiques*, Montréal : Les Éditions Logiques, p. 177-203.
- Masson, S. (2007), « Enseigner les sciences en s'appuyant sur la neurodidactique des sciences », dans P. Potvin, M. Riopel & S. Masson (Ed.), *Enseigner les sciences : regards multiples*. Québec : Éditions MultiMondes.
- Mazoyer, P., B. Wicker, et P. Fonlupt (2002), « A neural network elicited by parametric manipulation of the attention load », *NeuroReport*, 13 (17), p. 2331.

- McCloskey, M. (1983, April), Intuitive Physics. *Scientific American*, p. 122-130.
- Nelson, J. K., R. A. Lizcano, L. Atkins et K. Dunbar (2007, November 17), *Conceptuel judgments of expert vs. novice chemistry students : an fMRI study*. Paper presented at the 48th Annual meeting of the Psychonomic Society, Hyatt Regency Hotel Long Beach, California.
- O'Boyle, M. W. et H. S. Gill (1998), « On the relevance of research findings in cognitive neuroscience to educational practice », *Educational Psychology Review*, 10 (4), p. 397-409.
- OCDE (2007), *Comprendre le cerveau : naissance d'une nouvelle science de l'apprentissage*. Paris : Éditions de l'OCDE.
- Ogawa, S., D. W. Tank, R. S. Menon, J. M. Ellermann, S.-G. Kim, H. Merkle et coll. (1992), « Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation : Functional brain mapping using MRI », *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 89 p. 5951-5955.
- Periago, M. C. et X. Bohigas (2005), « A study of second-year engineering students' alternative conceptions about electric potential, current intensity and Ohm's law », *European Journal of Engineering Education*, 30 (1), p. 71-80.
- Pettito, L.-A. et K. Dunbar (2004, October 6-8), *New findings from educational neuroscience on bilingual brains, scientific brains, and the educated mind*. Paper presented at the Conference on Building Usable Knowledge in Mind, Brain, & Education, Harvard Graduate School of Education.
- Piaget, J. (1967), *Biologie et connaissance*. Paris : Gallimard.
- Pintrich, P. R. (1993), « Beyond cold conceptual change : The role of motivational beliefs and classroom contextual factors in the process of conceptual change », *Review of Educational Research*, 63 (2), p. 167-199.
- Poldrack, R. A., J. Clark, E. J. Pare-Blagoev, D. Shohamy, J. Creso Moyano, C. Myers et coll. (2001), « Interactive memory systems in the human brain », *Nature*, 414 (6863), p. 546-550.
- Posner, G. J., K. A. Strike, P. W. Hewson et W. A. Gertzog (1982), « Accommodation of a scientific conception : Toward a theory of conceptual change », *Science Education*, 66, p.211-227.
- Stavy, R. et D. Tirosh, (2000), *How Students (Mis-)Understand Science and Mathematics : Intuitive Rules. Ways of Knowing in Science Series*. New York : Teachers College Press.
- Thouin, M. (1996), *Les conceptions des élèves et les activités d'apprentissage en sciences de la nature au primaire*. Montréal : Faculté des sciences de l'éducation de l'Université de Montréal.
- Viennot, L. (1979), « Spontaneous Reasoning in Elementary Dynamics » *European Journal of Science Education*, 1 (2), p. 205-221.

- Vosniadou, S. (1994), « Capturing and modeling the process of conceptual change », *Learning and Instruction*, 4 (1), p. 45-69.
- Wandersee, J. H., J. J. Mintzes et J. D. Novak (1994), « Research on alternative conceptions in science », dans D. L. Gabel (Ed.), *Handbook of research on science teaching and learning*, New York : Macmillan. p. 177-210.
- Worsley, K. J., C. H. Liao, J. Aston, V. Petre, G. H. Duncan, F., Morales et coll. (2002), « A general statistical analysis for fMRI data », *NeuroImage*, 15, p. 1-15.

CHAPITRE 10



Suivi informatique des cheminements pour la recherche en éducation scientifique¹

Martin Riopel, Université du Québec à Montréal

Patrice Potvin, Université du Québec à Montréal

François Boucher-Genesse, Université du Québec
à Montréal

Gilles Raïche, Université du Québec à Montréal

Valérie Djédjé, Université du Québec à Montréal

RÉSUMÉ

Les micromondes sont des simulations informatisées qui favorisent l'interaction avec des objets ou des phénomènes scientifiques.

1. Les recherches présentées dans ce chapitre ont été soutenues par des subventions de la Fondation canadienne pour l'innovation, du Conseil de recherche en sciences humaines du Canada et du Fond québécois pour la société et la culture.

Ces applications conviennent bien à des situations ouvertes où les élèves recherchent relativement librement réponses et explications. En considérant trois prototypes de micromonde pour l'évaluation ou le suivi informatique des cheminements développés ou utilisés au Laboratoire mobile pour l'étude des cheminements d'apprentissage en sciences (LabMÉCAS) de l'Université du Québec à Montréal, ce texte présente les caractéristiques communes et essentielles qui permettent à ces environnements informatisés de rendre compte des actions effectuées par les élèves. Il présente aussi quelques différences entre ces prototypes, ainsi que leur influence sur la qualité et la pertinence du suivi informatique obtenu lors des mises à l'essai.

INTRODUCTION

En sciences, les micromondes intégrés à des environnements d'apprentissage informatisés offrent aux élèves des possibilités intéressantes de construire de nouvelles connaissances, de mettre à l'épreuve des hypothèses, de se poser des questions, d'organiser leur pensée et de développer des compétences (Edwards, 1998). Cependant, même si les avantages propres à ces environnements technologiques sont uniques, peu de chercheurs ont saisi l'opportunité de les utiliser aussi pour suivre les cheminements des élèves. Cette utilisation permettrait pourtant de mieux comprendre les processus cognitifs impliqués dans l'apprentissage des sciences. Bien entendu, les démarches des élèves ne s'inscrivent pas nécessairement dans un processus linéaire, ce qui rend leur étude et leur analyse complexes (Mercier et coll. dans cet ouvrage). En réponse à cette complexité, ce sont justement les capacités de calcul et d'analyse de ces environnements technologiques qui pourraient contribuer de façon originale à la recherche en didactique des sciences.

Ce chapitre présente d'abord les considérations technologiques ainsi que le contexte de développement au LabMÉCAS. Il décrit ensuite trois prototypes d'environnement d'apprentissage informatisé qui permettent, chacun à sa façon, un suivi informatique des cheminements, soit :

- ◆ une simulation interactive d'une durée de quelques minutes, qui vise à évaluer l'utilisation relative des primitives phénoménologiques *force as a mover / force as a deflector* ;

- ◆ une simulation de jeu vidéo d'une durée d'environ une heure, dont l'objectif est d'évaluer la compétence 1 (*chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique*) en sciences chez les élèves de 5^e secondaire ;
- ◆ un environnement d'apprentissage ouvert qui vise à soutenir l'apprentissage de la mécanique au collège durant tout un trimestre, en combinant l'utilisation de séquences vidéo réelles, l'animation d'objets simulés ainsi que les modes de représentation numérique, symbolique et graphique des paramètres physiques associés à la mécanique.

Ce texte se conclut par une brève comparaison des caractéristiques déterminantes de chacun de ces prototypes et de leur influence sur les résultats préliminaires obtenus lors des mises à l'essai et sur le suivi des cheminements.

1. CONSIDÉRATIONS TECHNOLOGIQUES

Une des étapes initiales dans la conception d'environnements d'apprentissage et d'évaluation informatisés est le choix de l'environnement de développement. Dans le contexte scolaire, ce choix n'est pas sans conséquence. En effet, il n'existe pas encore dans ce milieu de consensus sur la plateforme matérielle et logicielle à utiliser. En choisissant un développement qui privilégie l'une des plateformes, Mac ou PC, par exemple, on s'expose à des difficultés d'implantation dans les écoles qui utilisent l'autre plateforme. Heureusement, il existe aujourd'hui des langages (par exemple, Java de la compagnie Sun, Flash de la compagnie Adobe, et Silverlight de la compagnie Microsoft) qui permettent de développer des applications internet riches qui s'exécuteront sur toutes les plateformes. Le tableau suivant, tiré de RIAS (2009), présente le taux de présence des modules d'extension (*plug-in*) pour ces trois langages dans les navigateurs Web pour les principales plateformes. Comme Flash domine pratiquement sur toutes les plateformes, il a été choisi par l'équipe du LabMÉCAS pour le développement des nouveaux prototypes. Ce choix facilitera son déploiement dans les écoles.

TABLEAU 1
**Taux de présence des modules d'extension (*plug-in*)
 des langages Flash, Silverlight et Java
 dans les navigateurs Web selon RIAS (2009)**

OS	Flash (%)	Silverlight (%)	Java (%)
Linux	83	2	28
Mac OS X	95	18	96
Windows 2000	97	4	60
Windows 2003	51	10	39
Windows XP	99	20	74
Windows Vista	99	30	86
Windows 7	100	83	0
Total	97	21	75

En plus de la programmation de l'application elle-même, le suivi informatique des cheminements suppose que des informations seront régulièrement conservées dans une base de données (ou l'équivalent). Afin de faciliter son déploiement pour un grand nombre d'élèves répartis dans plusieurs écoles, dans plusieurs régions, etc., la base de données a tout avantage à se trouver sur un serveur web. Ainsi, a aussi dû être fait le choix du langage de programmation du serveur et de la base de données. Dans un contexte éducatif, la combinaison PHP/MySQL a été sélectionnée parce qu'elle est très répandue et qu'elle utilise exclusivement des logiciels libres (et donc gratuits pour les écoles).

Ces choix technologiques pour le développement des prototypes présentent plusieurs avantages qu'on peut résumer ainsi :

- ◆ les applications pourront être distribuées facilement sur Internet, sans qu'il soit nécessaire d'installer sur les ordinateurs de nouveaux logiciels ou de nouveaux modules d'extension des navigateurs web (les élèves et les enseignants ont en effet rarement accès aux droits administrateur sur les ordinateurs dans les écoles) ;

- ◆ les applications pourront fonctionner sans déclin de performance sur la majorité des ordinateurs actuellement disponibles dans les écoles ;
- ◆ le coût des outils nécessaires à la création des applications sera minime, voire nul ;
- ◆ les applications pourront envoyer de l'information à un serveur grâce à Internet, et ce, à partir de n'importe quel type d'ordinateur ou de système d'exploitation ;
- ◆ puisque le langage choisi permet de développer des applications internet riches, l'esthétique finale des applications pourra être attrayante.

Enfin, dans un contexte de développement en collaboration avec des étudiants diplômés qui n'ont pas forcément une grande expertise en programmation, Prayaga (2007) propose que le langage Flash soit privilégié, entre autres, parce qu'il présente la courbe d'apprentissage la plus rapide.

2. CONTEXTE DE DÉVELOPPEMENT

2.1. Catégories d'environnements d'apprentissage informatisés

Les micromondes se classent dans la seconde catégorie des environnements d'apprentissage informatisés tels qu'ils sont présentés dans le tableau suivant, tiré de Riopel et coll. (2007). En effet, les micromondes correspondent toujours à des simulations assistées par ordinateur. Cependant, certains micromondes (dont ceux présentés dans ce texte) possèdent aussi des caractéristiques de la troisième catégorie (évaluation assistée par ordinateur). Avec les avancées récentes des technologies, d'autres encore (en cours de développement au LabMÉCAS) possèdent même des caractéristiques de la cinquième catégorie (communauté virtuelle éducative) ou de la première catégorie (expérimentation assistée par ordinateur). Ainsi, dans un contexte de développement réaliste où les applications deviennent de plus en plus complètes, de plus en plus intégrées et de plus en plus complexes, il ne faut pas nécessairement se limiter aux catégories habituelles.

TABLEAU 1
Catégories d'environnements
informatisés d'apprentissage humain

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 capable 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 proposés et compilés par un ordinateur, localement ou à distance, et susceptibles de mettre en évidence certains besoins des élèves dans le but de les diriger vers les ressources correspondant 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 élèves peuvent interagir.
Communauté virtuelle éducative (CVE)	Environnement qui permet à des groupes d'élèves, sous la supervision de modérateurs, de collaborer au moyen de la technologie, comme le font les chercheurs.

Pour ce qui relève du soutien à l'apprentissage, les micromondes conviennent bien à des situations ouvertes qui encouragent l'exploration et l'expérimentation (Edwards, 1998). En ce sens, ils se rapprochent de la vision de l'apprentissage prônée par le constructivisme, et peuvent être intégrés à la méthode du compagnonnage cognitif qui soutient un apprentissage grâce à la confrontation à des situations-problèmes réalistes. Dans ce genre de situations, l'élève est invité à comprendre le fonctionnement d'un système technique ou d'un phénomène scientifique en se référant à ses propres observations et à se construire une représentation du système ou du phénomène étudié. Cependant, les environnements informatisés de simulation ne permettent pas toujours de soutenir aussi la modélisation informatisée. On doit donc distinguer ces deux types d'environnement. Selon Alessi et Trollip (2001), un environnement de

simulation éducatif est basé sur la modélisation d'un phénomène, d'un dispositif ou d'un processus que l'élève apprend à maîtriser en interagissant avec la simulation. Toujours selon ces auteurs, un environnement de modélisation se distingue en permettant à l'élève de ne pas utiliser un modèle préconçu, mais en lui fournissant plutôt les outils adéquats pour construire son propre modèle à partir de résultats ou d'observations destinés à représenter, à prédire ou à expliquer le phénomène, le dispositif ou le processus à l'étude.

Actuellement, un type particulier de simulation occupe une place de plus en plus grande. Ces simulations ludoéducatives sont désignées par l'expression consacrée de « jeux vidéo ». Malone (1981) a remarqué que les jeux vidéo constituent une grande source de motivation pour les utilisateurs. Cette motivation, très importante en situation d'apprentissage, est basée sur l'imagination, le défi et la curiosité. Dans un contexte éducatif, les jeux vidéo sont capables de stimuler l'intérêt de l'élève pour l'apprentissage et d'améliorer sa capacité de rétention (Hogle, 1996 ; Prensky, 2001). La plupart des jeux vidéo sont des applications très interactives exigeant des utilisateurs un certain type de fonctionnement cognitif qui fait appel à la concentration, à la mémorisation, à l'anticipation, à la construction de représentations spatiales et à la mise en place de stratégies élaborées. Ces jeux mobilisent et développent des compétences qui relèvent de la résolution de problèmes, mais aussi, dans certains cas, de la pensée critique et même de la collaboration dans une perspective socioconstructiviste.

2.2. Processus de modélisation scientifique dans les jeux vidéo

L'activité scientifique consiste à construire des modèles de différents phénomènes réels. Au cours des dernières décennies, l'activité de modélisation a été profondément modifiée dans plusieurs disciplines grâce aux outils informatiques. Parmi les courants épistémologiques énumérés par Legendre (2005) et Riopel (2005) relatifs à l'activité scientifique, le réalisme et le constructivisme sont les plus actuels. 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*. Bien que différentes, ces deux visions semblent se compléter, au moins partiellement, dans certains contextes. Dans tous les cas, deux mouvements de la pensée sont considérés.

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 (*Riopel et coll., 2007*).

Des chercheurs en didactique des sciences et des sciences cognitives (*Mellar et coll., 1994*) ont estimé que l'activité de modélisation chez les élèves contribue de façon significative à leur développement cognitif. L'activité de modélisation en classe s'inscrit généralement dans une vision constructiviste de l'apprentissage. Il s'agit de construire des représentations de phénomènes, après les avoir observés, en interagissant, par exemple, avec un dispositif informatique. Les compétences cognitives que l'activité de modélisation met en œuvre sont très variées : représenter, expliquer, communiquer, convaincre, anticiper, concevoir, contrôler, etc. Les environnements de modélisation constituent des outils à très fort potentiel cognitif. Selon Bliss (1994), les recherches actuelles en sciences de l'éducation et en psychologie cognitive nous apprennent que les activités de modélisation peuvent renforcer le processus d'apprentissage : au cours de la construction d'un modèle, les élèves expriment des idées et des modèles mentaux. Les modèles, comme les représentations iconiques et graphiques, permettent aux idées abstraites de revêtir un aspect concret. Ces représentations jouent un rôle de soutien cognitif qui accompagne la pensée et le raisonnement (*Téodoro, 1994*).

Pour soutenir la modélisation, plusieurs éducateurs en science encouragent maintenant l'enseignement qualitatif et conceptuel de la physique, une méthode qui ne repose pas uniquement sur l'application de formules mathématiques, mais aussi sur des expériences (réelles ou simulées) effectuées par les élèves et sur des démonstrations (réelles ou simulées) réalisées par les enseignants, et qui aident à mieux comprendre un phénomène sur des bases conceptuelles (Forbus, 1997 ; Hewitt, 2001). Cette ligne de pensée est très similaire aux théories d'apprentissage en mathématique de Papert (1981). Il est possible d'expliquer une partie de cette préférence par la réalité changeante des jeunes à l'ère des communications. En effet, 97 % des adolescents aux États-Unis jouent sur un ordinateur, Internet, un appareil portable ou une console (Lenhart

et coll., 2008). Prensky (2001) décrit les jeunes de cette génération comme des « natifs digitaux », à l'inverse de la génération précédente des « immigrants digitaux » qui ont eu à s'adapter aux nouvelles technologies. Les jeunes ont grandi avec ces technologies – elles font partie intégrante de leur culture. L'auteur suggère aussi que leur façon de penser et d'analyser l'information est fondamentalement différente de leurs prédécesseurs. Réalisant l'attrait de ce nouveau médium pour rallier les élèves, plusieurs chercheurs ont découvert un effet positif des jeux sur l'apprentissage (Blunt, 2007 ; Chuang et Chen, 2007 ; Shaffer, 2008). En effet, non seulement ces jeux offrent une situation de rétroaction instantanée (Gee, 2007), mais ils appliquent directement les principes d'apprentissage connus (Rieber, 2006). Poussés par ces résultats encourageants, les investissements dans l'industrie de l'apprentissage par les jeux atteignaient déjà 125 millions de dollars américains en 2006 (Blunt, 2007).

Les micromondes qui s'apparentent à des jeux vidéo auraient le potentiel d'aider à l'apprentissage des sciences. Mais ont-ils les caractéristiques nécessaires pour soutenir une démarche vraiment scientifique ? Une étude récente a analysé les forums de discussion Internet d'un des jeux commerciaux les plus populaires, *World of Warcraft*, afin d'observer les méthodologies utilisées par les joueurs (Steinkuehler et Duncan, 2008). Elle présente des preuves empiriques sur le potentiel du jeu pour encourager une épistémologie scientifique. Quatre-vingt-six pour cent des discussions en groupe ont été engagées dans la « construction d'un savoir collectif » plutôt que dans de simples discussions, alors que 65 % de ces mêmes discussions reflétaient une épistémologie évaluatrice, où l'information est constamment remise en question, et sujette à changement si des arguments convaincants sont fournis. La communauté de joueurs ressemble ainsi fortement à une communauté scientifique.

Ce type d'approche de la part des joueurs est nécessaire, parce que le problème est de taille. La complexité des jeux vidéo d'aujourd'hui dépasse même les concepteurs de jeu, qui tentent d'en équilibrer les mécanismes en analysant leur propre expérience comme joueurs, sans être à même de connaître et de comprendre tous les mécanismes impliqués dans la conception. Un livre complet a même été dédié à l'étude de la complexité de *World of Warcraft* (Corneliusson et Rettberg, 2008). Cette complexité est suffisamment

importante pour favoriser l'exploration libre et la mise en oeuvre d'une multitude de tactiques et de stratégies. L'étendue des connaissances nécessaires à l'accomplissement d'une quête est telle que les joueurs bâtissent en groupe des théories et des modèles en n'hésitant pas à utiliser les outils nécessaires à cette tâche. Ainsi, selon Steinkuehler (2004), il n'est pas rare de voir des joueurs démontrer leurs théories à l'aide de fichiers Excel, créer des modèles sous forme d'équations mathématiques simples, pour ensuite discuter entre eux de la meilleure hypothèse. Bien que tous ces efforts servent ultimement à détruire un dragon dans un univers virtuel, la démarche suivie n'en reste pas moins scientifique. Le rapport de Steinkuehler et Duncan (2008) conclut en encourageant les liens entre le milieu de l'école et celui des jeux vidéo éducatifs. Une des façons proposées est d'offrir à tous les jeunes l'accès à ces jeux en leur fournissant un espace de jeux intellectuellement riches, dans un environnement à la fois technologique et éducatif. Un des objectifs du LabMECAS est de développer de tels jeux et de les rendre accessibles sur les ordinateurs actuellement disponibles dans les écoles. À ce titre, les choix technologiques présentés dans la section précédente sont déterminants.

3. QUESTIONS DE RECHERCHE

Les considérations précédentes concernant l'utilisation de micromondes dans un contexte éducatif ont contribué à la formulation de critères pour encadrer le développement de prototypes de micromondes. Ces critères ont permis de maximiser la qualité du suivi informatique des cheminements d'apprentissage.

- ◆ **Critère 1. Des défis suffisamment complexes.** En effet, si les défis à relever à l'intérieur du micromonde sont trop élémentaires, l'élève n'aura pas à utiliser une démarche de modélisation scientifique pour arriver à ses fins. Par ce critère, on tente d'éviter l'erreur la plus fréquente rapportée par Prensky (2001) concernant les jeux vidéo basés sur des défis insignifiants qui, en plus de limiter la valeur éducative de ces jeux, les rendent beaucoup moins intéressants.
- ◆ **Critère 2. Une complexité contrôlée.** Si, par exemple, *World of Warcraft* peut encourager dans une certaine mesure une démarche de modélisation scientifique, sa

prodigieuse complexité rendrait impossible son utilisation pour évaluer de façon automatique les compétences des joueurs. En effet, le design du jeu est trop ouvert pour attribuer automatiquement une seule signification aux actions posées. Par exemple, si un élève tente d'isoler une variable dans un problème complexe, la seule façon de s'en rendre compte dans ce type de jeu serait d'analyser ses écrits ou encore de lui poser des questions en entrevue. Il serait évidemment très difficile d'automatiser ce processus.

- ◆ **Critère 3. Une interactivité pertinente.** Pour pouvoir rendre compte automatiquement des cheminements, le micromonde doit proposer une interactivité qui facilite la réalisation de la tâche, en la dirigeant le moins possible, mais en permettant à l'élève de ne donner qu'un seul sens à sa démarche. De cette façon, sa démarche pourra être évaluée automatiquement.

En respectant ces critères, le développement des prototypes de micromondes tentait de fournir, au moyen d'une démonstration de faisabilité, des éléments de réponses aux trois questions de recherche suivantes concernant le suivi des cheminements :

- ◆ Comment évaluer automatiquement la qualité de l'utilisation relative des primitives phénoménologiques (*force as a mover / force as a deflector*) lors de l'application interactive d'une force sur un objet en mouvement ?
- ◆ Comment évaluer automatiquement des éléments de la compétence 1 (*chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique*) en sciences chez les élèves de 5^e secondaire dans un contexte adisciplinaire ?
- ◆ Comment interpréter automatiquement les étapes de cheminement d'un élève lors de situations de modélisation scientifique en mécanique au collège durant un trimestre ?

Enfin, pour chacun des prototypes, les étapes générales suivantes ont permis, en boucles successives, de coordonner les travaux.

- ◆ Concevoir une application qui accompagne de façon aussi ouverte que possible les cheminements dans le contexte de la question choisie.
- ◆ Dresser une liste des actions qui rendent compte de l'ensemble des cheminements possibles.
- ◆ Construire une procédure automatisée d'interprétation de ces actions.
- ◆ Mettre à l'épreuve cette procédure en l'intégrant dans l'application.

Nous présentons brièvement les trois prototypes dans les prochaines sections en insistant sur leur capacité à suivre automatiquement le cheminement des élèves.

4. PRÉSENTATION DES PROTOTYPES

4.1. Prototype A : évaluation d'une primitive phénoménologique

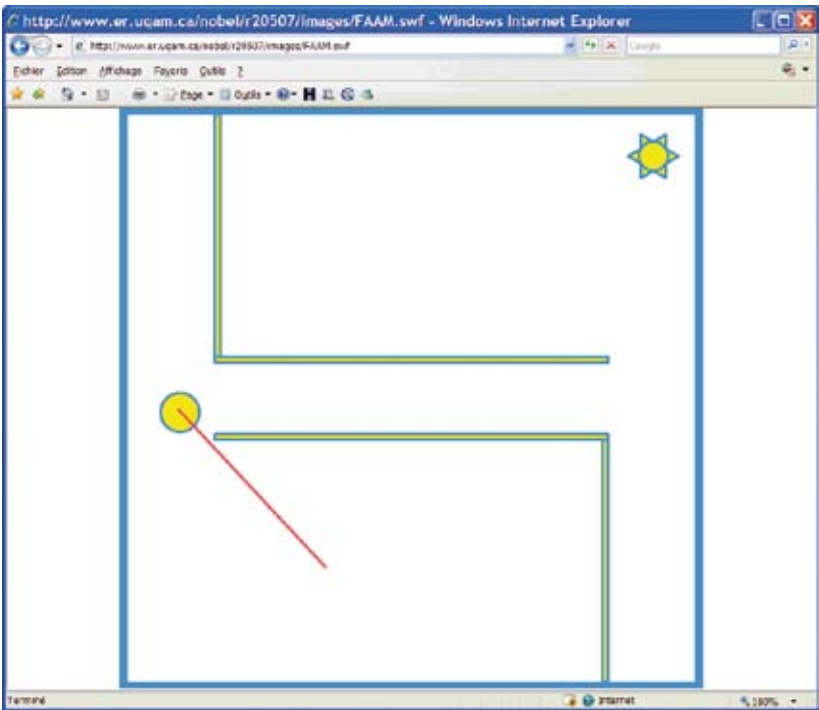
Le premier prototype s'inscrit dans la perspective de diSessa (1993), qui soutient que la conception n'est pas l'unité première de la compréhension, mais qu'elle correspond en fait à l'expression de quelque chose de plus fondamental, de plus difficile à cerner, qu'il appelle « le sens de la mécanique », et qui se rapproche d'une certaine façon de ce que les enseignants nomment « l'intuition physique ». Pour diSessa, ce serait un espace cognitif responsable de produire des jugements concernant des situations en physique. Pour produire des jugements, cet espace cognitif considérerait des paramètres d'entrée qu'il déterminerait, mettrait en relation, puis traiterait à l'aide de primitives phénoménologiques (ou p-prims), qui sont d'une certaine façon analogues aux fonctions primitives d'un programme informatique. diSessa a d'ailleurs élaboré sa perspective à partir de son expérience avec les logiciels LOGO et DYNATURTLE (diSessa, 1983).

Ce qui est particulièrement intéressant avec les p-prims, c'est que, contrairement aux conceptions, elles ne semblent pas évoluer. Les experts semblent utiliser les mêmes p-prims, mais les utilisent mieux. Ainsi, on pourrait être tenté de croire que les p-prims correspondent vraiment à des éléments fondamentaux de la compréhension. Quand on tente d'expliquer les conceptions à l'aide des p-prims, apparaît un autre argument, qui semble appuyer le fait que les p-prims soient des objets plus fondamentaux que les conceptions. On se rend compte que plusieurs conceptions peuvent être expliquées avec la même p-prim. En fait, les p-prims sont toujours impossibles à expliquer ou à analyser par le sujet : elles correspondent au cœur même de l'explication. C'est même ainsi qu'on arrive à les identifier : elles obéissent au principe d'impénétrabilité.

Le premier prototype s'intéresse plus particulièrement à l'évaluation de l'utilisation des p-prims *force as a mover* / *force as a deflector* qui ont été décrites par diSessa (1993) et qu'on peut résumer ainsi : la p-prim *force as a mover* considère qu'un objet se déplace dans la direction de la force appliquée et proportionnellement à celle-ci ; la p-prim *force as a deflector* considère plutôt que la force appliquée se combine au mouvement pour produire un changement de direction, cette seconde p-prim étant plus compatible avec la seconde loi de Newton ($F = ma$).

La situation du micromonde a été choisie de façon à créer une opposition dans l'utilisation des deux p-prims. La figure 2 présente cette situation : on demande à l'élève d'orienter la flèche rouge avec la souris afin que la balle rejoigne l'étoile. La flèche agit comme une force et l'inertie de la balle a été augmentée afin de rendre la tâche plus complexe que normalement. Un pointillé (invisible pour l'élève) a été ajouté sur la figure pour indiquer la trajectoire souhaitée pour la balle. La figure présente le moment critique où la force doit être orientée perpendiculairement (*force as a deflector*) au mouvement pour faire dévier correctement la balle. Préalablement, il a fallu appliquer une force parallèle au mouvement (*force as a mover*) pour la mettre en mouvement à partir du repos.

FIGURE 1
L'opposition des p-prims
force as a mover / force as a deflector



Dans ce prototype déployé expérimentalement sur le web, tous les mouvements de la souris et de la balle sont enregistrés sur un serveur, dans une base de données, tel que c'est illustré dans le tableau 2. Ces enregistrements permettent de suivre les chemine-ments des élèves.

TABLEAU 2
**Les enregistrements permettant
 le suivi informatique avec le prototype A**

Compteur (ms)	Date			Heure	Souris X	Souris Y	Balle X	Balle Y
1 204 174 714 296	Wed	Feb	27	20:58:34	32	63	30	30
1 204 174 715 796	Wed	Feb	27	20:58:35	35	91	30	30
1 204 174 718 562	Wed	Feb	27	20:58:38	35	85	31	31
1 204 174 719 593	Wed	Feb	27	20:58:39	31	102	31	33
1 204 174 719 812	Wed	Feb	27	20:58:39	29	107	30	37
1 204 174 720 531	Wed	Feb	27	20:58:40	33	146	31	44
1 204 174 720 765	Wed	Feb	27	20:58:40	27	155	31	56
1 204 174 720 890	Wed	Feb	27	20:58:40	29	170	31	68

À partir des données du tableau, on peut évaluer la direction de la force par rapport à la trajectoire optimale de la balle et ainsi déterminer si la force a été appliquée correctement à chaque instant. La *p-prim force as a mover* doit être utilisée initialement pour mettre la balle en mouvement. Ensuite, la *p-prim force as a deflector* doit être utilisée à certains moments précis pour modifier l'orientation de la trajectoire. La qualité de ces utilisations peut être évaluée pour des sections stratégiques de la trajectoire ou plus globalement. On peut remarquer que ce premier prototype respecte les trois critères énoncés précédemment (complexité, contrôle, pertinence) pour une tâche simple qui peut être réalisée rapidement. En contrepartie, la mise à l'essai préliminaire a montré que cette situation simplifiée ne peut demeurer intéressante pour l'élève que durant quelques minutes.

4.2. Prototype B : évaluation d'une compétence

Le second prototype, plus élaboré, s'intéresse à l'évaluation d'une compétence. Il s'inscrit dans la perspective actuelle du monde de l'éducation qui privilégie ce type d'évaluation. Comme le proposaient *Glaserfeld et Cobb* (1983), il met l'accent sur l'organisation réussie par l'élève de sa propre expérience conceptuelle plutôt que sur la reproduction correcte de ce que fait l'enseignant. Cette

construction de sa propre expérience aide l'élève à développer sa capacité à réussir dans l'exercice d'une fonction.

Compétence évaluée

Ce prototype a été développé pour un projet de recherche plus large qui vise à comparer l'évaluation de la compétence 1 (*chercher des réponses ou des solutions à des problèmes d'ordre scientifique ou technologique*) des élèves de 5^e secondaire en sciences et en technologie, avant et après la réforme des programmes au Québec. Le LabMÉCAS a conçu cette simulation informatisée sous forme d'un jeu vidéo qui permet, durant une période de 45 minutes, d'évaluer quelques composantes de cette compétence chez les élèves. Il est projeté de l'utiliser pour évaluer plusieurs centaines d'élèves de plusieurs écoles de la commission scolaire de Montréal en 2009 (derniers élèves de 5^e secondaire avant la réforme), puis en 2011 (premiers élèves de 5^e après la réforme) et en 2013. Les différences entre les résultats de ces élèves des mêmes écoles seront analysées afin que soient fournies des données concrètes sur les effets du nouveau programme de formation.

Le prototype correspond à une simulation de restaurant vietnamien où l'élève prend la place du chef cuisinier qui tente de satisfaire un client particulièrement difficile : le vieux sage du village présenté dans la figure 2. Ce dernier revient quotidiennement goûter la soupe tonkinoise, et montre son appréciation à l'aide d'un score. L'élève peut changer la quantité de chaque ingrédient dans la soupe pour découvrir les goûts du sage. Chaque dimanche, le vieux sage évalue si la soupe de l'élève est suffisamment bonne pour qu'il change de niveau. Cette situation est suffisamment complexe (critère 1), puisque l'élève a un choix de trois ingrédients à placer dans la soupe, chacun influençant le score final à sa façon. Il s'agit donc d'isoler l'effet de trois variables agissant simultanément sur le système.

Le gouvernement du Québec suggère quatre composantes de la compétence 1 dans un contexte scientifique. Bien que toutes ces composantes soient utilisées par les élèves lorsqu'ils tentent de trouver les quantités d'ingrédients d'une soupe parfaite, seulement deux seront évaluées de façon automatique par l'application : le choix du scénario d'investigation et l'analyse des résultats. La structure de ce jeu offre une complexité contrôlée (critère 2), puisque l'application dirige les étapes de la démarche scientifique, ce qui lui

permet d'analyser et d'évaluer les performances de l'élève. Ce contrôle est toutefois assez libre pour permettre à l'élève d'établir ses propres stratégies d'expérimentation à l'aide d'une interactivité pertinente (critère 3) pour l'évaluation.

FIGURE 2

Le vieux sage goûte à sa soupe quotidienne

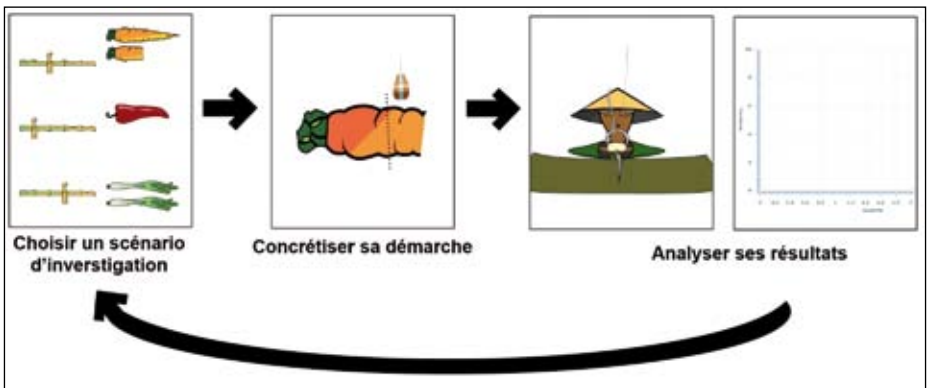


Contexte adisciplinaire

Le contexte de la simulation, un restaurant vietnamien, a été choisi en fonction de son éloignement des sciences traditionnelles. En effet, l'appropriation de la compétence 1 devrait se détacher des connaissances propres aux disciplines enseignées à l'école en sciences, telles que la biologie, la physique, les mathématiques, etc. Elle ne devrait pas s'appliquer à un champ de connaissance particulier. Ce détachement entre la compétence et la discipline la rend particulièrement difficile à évaluer dans un contexte disciplinaire. En effet, un élève peut posséder plus de connaissances qu'un autre dans un domaine en particulier et s'en sortir mieux lors d'une évaluation en laboratoire, par exemple. Il n'a pas nécessairement utilisé une méthodologie scientifique, mais il en savait assez sur le domaine pour atteindre l'objectif demandé. Il est apparu intéressant de trouver un contexte d'évaluation dans lequel les élèves possèdent tous le même niveau de connaissances. Ce contexte devait en plus être suffisamment familier pour que les élèves comprennent bien le problème qu'ils ont à résoudre.

La simulation d'un restaurant offre un problème compréhensible où les connaissances antérieures des élèves n'ont pas d'importance. Tous les goûts sont dans la nature, et une démarche de modélisation scientifique permettra de déterminer si le vieux sage aime mieux la carotte que le piment dans sa soupe. Les étapes de cette démarche sont présentées dans la figure 3. Le problème est assez complexe : il y a trop de variables pour déduire des connaissances avec des essais faits au hasard. Le choix du type de goûteur, le vieux sage, est aussi important. Tous les élèves doivent comprendre que ce client ne changera pas de goût chaque jour : le vieux sage reflète l'image même de l'invariance, du savoir absolu.

FIGURE 3
Cycle de la démarche de modélisation scientifique
dans le jeu de la cuisine



Suivi des cheminements

La démarche de l'élève commence par le choix du scénario d'investigation. Cette planification peut être évaluée automatiquement puisque l'application enregistre tous les tests effectués par l'élève. Ainsi, elle est à même de vérifier si l'élève tente d'isoler une variable en ne modifiant que la quantité d'un ingrédient à la fois. Si au contraire la série de tests effectués comporte un nombre changeant d'ingrédients, il s'agira d'un indicateur fiable d'une démarche moins catégorique, manquant de rigueur scientifique.

Toute démarche de modélisation scientifique possède une partie expérimentale où les hypothèses sont mises à l'épreuve. Dans le jeu du restaurant, cette seconde étape consiste à couper les légumes en morceaux afin d'arriver approximativement à la quantité désirée. Les élèves décident de leur objectif (couper une carotte et demie) et ils pourront plus tard décider d'en couper un peu moins s'ils le désirent (une carotte et un quart) pour observer la différence. L'étape de découpage des légumes est la plus plaisante du jeu, car elle nécessite une certaine dextérité avec la souris. Cette partie est cruciale pour donner une expérience plaisante à l'élève. Il s'agit en fait d'une des techniques de conception fréquemment utilisées par l'industrie du jeu : en permettant à l'élève de changer le rythme de son expérience avec une partie plus manuelle, on l'aide à se concentrer sur le problème intellectuel par la suite.

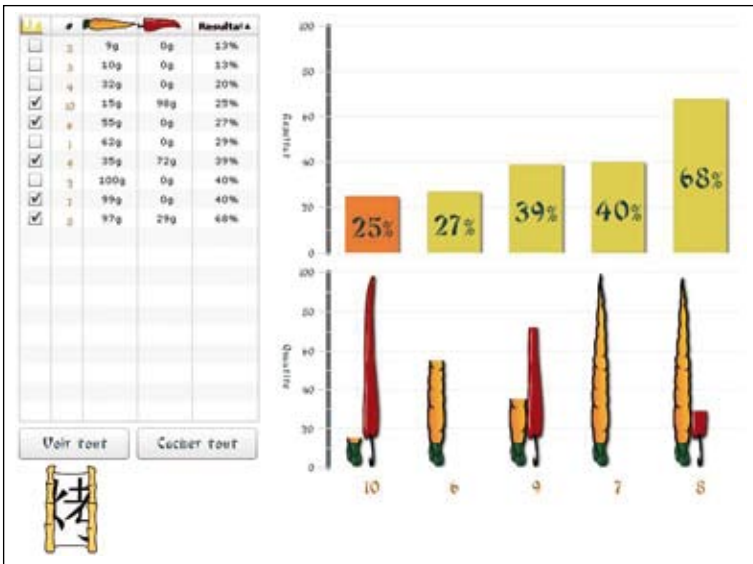
Les quantités d'ingrédients obtenues lors du découpage varient toujours un peu, ce qui introduit une incertitude dans la démarche de l'élève. Ce dernier doit procéder à plusieurs tests afin de vraiment cerner l'appréciation du vieux sage pour un type de légumes. L'incertitude associée au découpage n'est pas étrangère à l'incertitude causée par les manipulations en laboratoire dans un cadre scolaire plus traditionnel. L'élève doit accepter que ses démarches ne lui permettent pas de tester l'hypothèse désirée, et ajuster sa technique afin d'arriver aux tests désirés.

L'élève devra comprendre quels éléments de la simulation seront pertinents pour l'aider à atteindre son but, en procédant à la recherche et à l'analyse des règles sous-jacentes du jeu. Il doit, par exemple, comprendre l'effet d'ajouter deux légumes différents dans la même soupe. Comment les résultats se combineront-ils ? Est-ce qu'une moyenne ou une somme des goûts du vieux sage pour chaque légume déterminera le résultat final ? Cependant, toutes les étapes ne peuvent pas être évaluées automatiquement et de façon précise par l'application. En effet, comment savoir exactement à quel instant l'élève a compris une règle ? Avec quelle méthode ? Certaines composantes de la compétence ne pourront donc pas faire partie des résultats de la recherche, bien qu'elles fassent partie intégrante du jeu.

Pour la dernière étape présentée dans la figure 3, l'élève se voit offrir des outils d'analyse qui lui permettront de formuler des hypothèses. En retour, Il sera possible pour l'application d'évaluer de façon automatisée la validité de ces hypothèses. Lorsque l'élève

désire comprendre l'influence de la quantité de carottes dans la soupe sur le score du goûteur, il peut consulter la section des graphiques et classer ses essais par ordre croissant de la quantité de carottes. Si un test ne semble pas pertinent à son analyse, il peut le retirer du graphique afin de ne voir que les résultats utiles à son questionnement.

FIGURE 4
Le graphique utilisé pour comprendre
les goûts du vieux sage



Pour bien suivre la démarche de l'élève, l'application doit connaître ses hypothèses afin d'évaluer sa capacité à les formuler. Une solution serait d'observer les quantités d'ingrédients choisies chaque jour et la progression du score. Mais si l'élève explore une nouvelle piste de solution, son score pourrait être temporairement plus bas. Il a donc fallu trouver une façon fiable de connaître la meilleure hypothèse courante de l'élève. Le goûteur du dimanche répond à cette exigence en motivant l'élève à produire sa meilleure soupe une fois par semaine. Chaque dimanche, le goûteur ne fait pas que donner un score : il lui permettra aussi, si le score est suffisamment élevé, de passer au prochain niveau et d'utiliser un nouveau légume.

Mises à l'essai préliminaires

Les mises à l'essai préliminaires de ce prototype de jeu adisciplinaire ont permis de démontrer sa capacité à suivre automatiquement les cheminements de plusieurs centaines d'élèves. Des travaux sont en cours pour évaluer la validité de cet outil. La compétence estimée des élèves au jeu adisciplinaire sera, par exemple, comparée à leurs résultats scolaires en science ou à l'évaluation d'un expert indépendant, afin d'établir des corrélations s'il y a lieu.

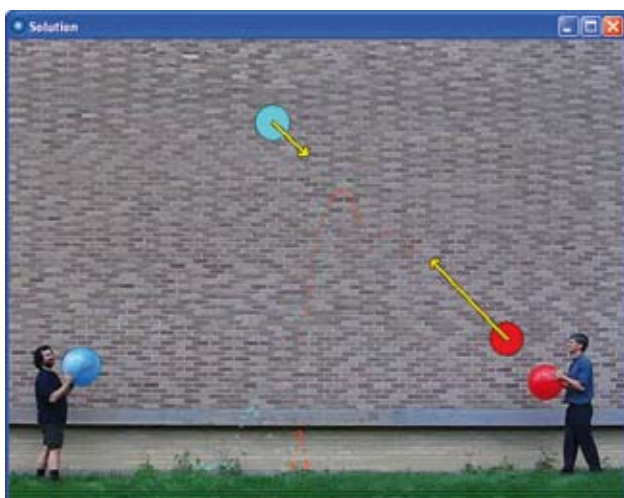
Si la compétence estimée par ce prototype s'avère représentative de la compétence évaluée par des moyens plus traditionnels, ce type de jeu pourrait être utilisé pour évaluer aussi d'autres compétences. En effet, l'évaluation par les jeux vidéo ne se limite pas aux contextes adisciplinaires – un jeu étant essentiellement une simulation d'un milieu. Il serait, par exemple, déjà possible d'imaginer un environnement plus général de physique mécanique, où les élèves prédisent à l'aide de la souris les mouvements d'un objet.

4.3. Prototype C : suivi du processus de modélisation scientifique

Le troisième prototype, encore plus complexe, vise à soutenir l'apprentissage ouvert de la mécanique au collège durant tout un trimestre. Il tente de combiner certains avantages des expérimentations assistées par ordinateur à d'autres des simulations assistées par ordinateur. Il permet, dans un premier temps, d'analyser le mouvement d'objets sur une séquence vidéo, d'en extraire rapidement les graphiques de la position, de la vitesse, de l'accélération, de la force, de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique, etc. Ce logiciel offre aussi la possibilité de superposer des objets simulés à la séquence vidéo. Ces objets sont des balles, des parois et des ressorts, dont les élèves peuvent ajuster les paramètres pour tenter de reproduire le mouvement observé. Les images et les graphiques extraits de la séquence vidéo peuvent ainsi être directement comparés aux images et aux graphiques associés à la simulation. L'interaction avec le logiciel ressemble à un jeu de stratégie où la théorie, pilotée par les élèves, se confronte à la réalité, filmée aussi par les élèves. Une description plus complète du troisième prototype, de la démarche entourant sa conception et du contexte de ses mises à l'essai, peut être trouvée dans Riopel et coll. (2007) et ne sera pas reprise ici.

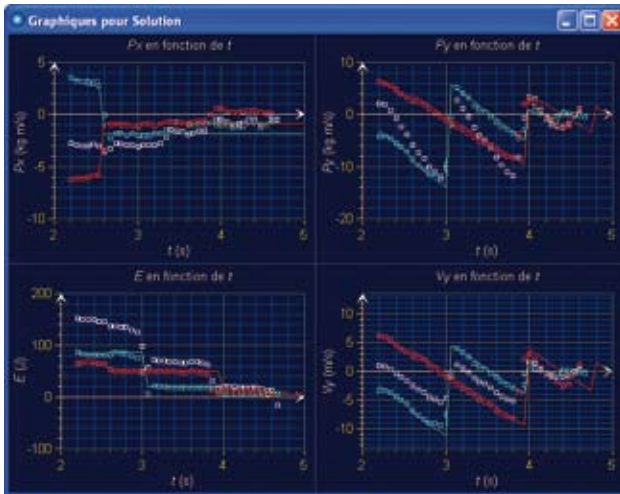
On peut cependant considérer, à titre d'exemple, la situation présentée dans la figure 5 où les élèves ont filmé deux enseignants lançant des ballons qui entrent en collision en vol. La figure correspond à la modélisation finale où deux ballons simulés (avec leur vecteur vitesse initial en jaune) ont été ajoutés dans la vidéo à un moment stratégique pour suivre la collision des ballons réels. Des points représentent aussi les positions mesurées successivement sur la séquence vidéo pour chaque ballon.

FIGURE 5
Collision à deux dimensions avec gravité



La figure 6 présente ensuite les graphiques produits aussi à l'aide du logiciel. On peut y voir la quantité de mouvement horizontale se conserver durant la première collision en vol, mais pas lors de la seconde collision avec le sol. Par contre, la quantité de mouvement verticale est modifiée par la gravité. L'énergie, quant à elle, n'est pas conservée durant la collision, et un coefficient de restitution explicite de 0,4 doit être introduit pour bien reproduire le mouvement.

FIGURE 6
Paramètres physiques pour la collision



Cet environnement d'apprentissage respecte le critère 1 en proposant les défis les plus complexes des trois prototypes. En effet, les situations filmées peuvent être très complexes et leur modélisation peut représenter tout un défi. Pourtant, cette complexité est suffisamment contrôlée (critère 2) et l'interactivité est suffisamment pertinente (critère 3) pour donner automatiquement un sens aux actions des élèves dans un contexte de modélisation scientifique : le logiciel peut produire des histogrammes décrivant la fréquence des étapes des cheminements (voir Riopel et coll., 2007). Cependant, contrairement aux deux premiers prototypes, la complexité de l'application rend très difficile l'évaluation automatique de la qualité de ces cheminements. Il semble donc qu'il faille séparer, dans ce cas, le suivi automatique des cheminements de l'évaluation proprement dite. Si la complexité de l'application favorise son utilisation prolongée durant tout un trimestre, de même que l'ouverture des situations d'apprentissage et la richesse du suivi des cheminements, cette même complexité nuit aussi à la qualité de l'évaluation automatique de la performance des élèves.

CONCLUSION

Ce chapitre a présenté le contexte de développement de trois prototypes de micromonde qui facilitent, chacun à sa façon, un suivi informatique des cheminements : le premier visait une évaluation rapide de l'utilisation de deux primitives phénoménologiques, le deuxième s'intéressait à l'évaluation d'une compétence dans un contexte adisciplinaire, et le troisième permettait un suivi à plus long terme des cheminements de modélisation scientifique.

Des critères communs ont été établis pour encadrer le développement des ces trois prototypes afin de favoriser le suivi automatique des cheminements. Cependant, les visées différentes, les durées différentes et, conséquemment, les complexités différentes des trois prototypes ont été les plus déterminantes sur la qualité du suivi et de l'évaluation de la performance des élèves. Le premier prototype, élémentaire, donnait lieu à une évaluation automatisée précise, mais ne soutenait l'intérêt des élèves que durant quelques minutes ; le deuxième prototype, en s'inspirant des jeux vidéo, comportait des étapes plus amusantes qui autorisaient une évaluation plus longue et plus complète de certains éléments d'une compétence ; le troisième prototype misait sur la richesse de l'accompagnement pour son utilisation prolongée dans un contexte scolaire, mais au prix d'une évaluation moins précise de la performance des élèves.

Bien que le temps de développement de ces prototypes soit très élevé comparativement à celui d'une évaluation plus traditionnelle (par exemple, cinq mois ont été nécessaires pour la réalisation du deuxième prototype), les retombées pour la recherche en éducation scientifique semblent plus importantes. En effet, en automatisant le suivi et l'évaluation des cheminements, on facilite la réalisation d'études impliquant un grand nombre d'élèves. De telles études ont débuté au LabMÉCAS et se poursuivront durant les prochaines années.

BIBLIOGRAPHIE

- Alessi, S. et S. Trollip (2001), *Multimedia for Learning. Methods and Development*, 3^e éd. Boston : Allin and Bacon.
- Basque, J. et S. Doré (1998), « Le concept d'environnement d'apprentissage informatisé », *The Journal of Distance Education / Revue de l'Éducation à Distance*, 13 (1), p. 40-56.

- Bliss, J. (1994), « From mental models to modelling », dans H. Mellar, J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn & C. Tompsett (Eds), *Learning with Artificial Worlds : Computers-Based Modelling in the Curriculum*, Londres : The Falmer Press, p. 27-32.
- Crandall, R. et J. Sidak (2006), *Video Games Serious Business For America's Economy*. Document Internet, www.theesa.com/files/VideoGames-Final.pdf consulté le 21 avril 2009.
- DiSessa, A. (1983), « Phenomenology and the evolution of intuition », dans Gentner D. & Stevens A.L. (Eds), *Mental models*, Hillsdale (NJ) : Lawrence Erlbaum Associates, p. 155-190.
- diSessa, A. A. (1993), « Toward an Epistemology of Physics », *Cognition and instruction*, 10 (2-3), p. 105-225.
- Edwards, L. D. (1998), « Embodying mathematics and science : Microworlds as representation », *Journal of Mathematical Behavior*, 17 (1), p. 53-78.
- Gee., J. P. (2003), *What Video Games Have to Teach US (1st edition)*. Palgrave : Macmillan.
- Glaserfeld, E. V. et P. Cobb (1983), « Knowledge as Environmental Fit », *Man-Environment Systems*, 13 (5), p. 216-224.
- Hogle, J.G. (1996), *Considering games as cognitive tools : In search of effective « edutainment »*, University of Georgia, Department of Instructional Technology. ERIC Document Reproduction Service N° ED 425 737.
- Legendre, R. (2005), *Dictionnaire actuel de l'éducation*. Montréal : Guérin.
- Malone, T.W. (1981), « Towards a theory of intrinsically motivating instruction », *Cognitive Science*, 4, p. 333-361.
- Mellar, H., J. Bliss, R. Boohan, J. Ogborn et C. Tompsett (1994), *Learning with Artificial Worlds : Computer-based Modeling in the Curriculum*. Londres : The Farmer Press.
- Mercier, J., M. Brodeur, L. Laplante, C. Girard (*dans cet ouvrage*). « L'apport d'une infrastructure informatique dans l'analyse de trace cognitive ».
- Papert, S. (1981), *Jaillissement de l'esprit*. Paris : Flammarion.
- Potvin, P. et É. Dionne (2007), « Realities and Challenges of Educational Reform in the Province of Québec : An Exploratory Research About Science and Technology Teaching », *McGill Journal of Education*, 42 (3).
- Prayaga, L. (2007), « Introductory Game Programming Instruction with OOP - What is required, How is it addressed, and Which language wins ? », *Journal of Object Technology*, 6 (8).
- Prensky, M. (2001), *Digital Game-Based Learning*. New York : McGraw-Hill.

- Rich Internet Application Statistics (2009), *Real world stats of RIA plugin deployments*. Reston, VA : DreamingWell. <http://www.riastats.com>, consulté le 10 mars 2009.
- Riopel, M., G. Raïche, P. Potvin, F. Fournier et P. Nonnon (2007), « Une approche intégrée de la modélisation scientifique assistée par l'ordinateur », *Aster - Recherches en didactique des sciences expérimentales*, 43, p. 57-80.
- Riopel, M. (2005), *Épistémologie et enseignement des sciences*. Chicoutimi : Les classiques des sciences sociales, 30 p.
- Téodoro, V.D. (1994), « Learning with computers-based exploratory environments », dans S. Vosniadou, E. de Corte & H. Mandl (Dir). *Technology-based Environments, Psychological and Educational Foundations*. Berlin : Springer-Verlag.
- Thouin, M. (1999), *Problèmes de sciences et de technologie pour le préscolaire et le primaire*. Québec : Multimondes.