

Simulations informatiques adisciplinaires et résolution de problèmes ouverts : une étude exploratoire auprès d'étudiants en formation des maîtres

Marc Couture et Catherine Meyor

Volume 5, numéro 2, 2008

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/037474ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/037474ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

CRÉPUQ

ISSN

1708-7570 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Couture, M. & Meyor, C. (2008). Simulations informatiques adisciplinaires et résolution de problèmes ouverts : une étude exploratoire auprès d'étudiants en formation des maîtres. *Revue internationale des technologies en pédagogie universitaire / International Journal of Technologies in Higher Education*, 5(2), 50-67. <https://doi.org/10.7202/037474ar>

Résumé de l'article

Les simulations adisciplinaires présentent les mêmes caractéristiques que les autres simulations informatiques, sauf qu'elles ne sont associées à aucun référent ou phénomène particulier. Nous proposons d'abord un modèle des processus qu'effectuent les concepteurs et les usagers en rapport avec une simulation, ce qui permet de cerner les conditions conférant à la simulation un caractère disciplinaire (ou non), du point de vue de chacun de ces acteurs. Nous décrivons ensuite les versions successives, de moins en moins disciplinaires, d'une simulation que nous avons développée et expérimentée dans un cours d'épistémologie s'adressant à de futurs enseignants. Nous présentons enfin, comme résultats d'une recherche exploratoire, les caractéristiques des démarches de résolution de problème que nous avons observées dans une activité d'apprentissage ouverte fondée sur cette simulation.

Tous droits réservés © CREPUQ et, 2009



Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter en ligne.

<https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit

Cet article est diffusé et préservé par Érudit.

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche.

<https://www.erudit.org/fr/>

Simulations informatiques adisciplinaires et résolution de problèmes ouverts : une étude exploratoire auprès d'étudiants¹ en formation des maîtres

Marc **Couture**
Télé-université (Université du Québec à Montréal)
mcouture@teluq.ugam.ca

Catherine **Meyor**
Département d'éducation et pédagogie
Université du Québec à Montréal
meyor.catherine@ugam.ca

Compte rendu d'expérience

Résumé

Les simulations adisciplinaires présentent les mêmes caractéristiques que les autres simulations informatiques, sauf qu'elles ne sont associées à aucun référent ou phénomène particulier. Nous proposons d'abord un modèle des processus qu'effectuent les concepteurs et les usagers en rapport avec une simulation, ce qui permet de cerner les conditions conférant à la simulation un caractère disciplinaire (ou non), du point de vue de chacun de ces acteurs. Nous décrivons ensuite les versions successives, de moins en moins disciplinaires, d'une simulation que nous avons développée et expérimentée dans un cours d'épistémologie s'adressant à de futurs enseignants. Nous présentons enfin, comme résultats d'une recherche exploratoire, les caractéristiques des démarches de résolution de problème que nous avons observées dans une activité d'apprentissage ouverte fondée sur cette simulation.

Mots-clés

Simulation informatique, résolution de problèmes, apprentissage ouvert, épistémologie

Abstract

Domain-independent simulations share the same characteristics as usual computer simulations, with the exception of being related to no particular referent or phenomenon. We first propose a model of the processes followed respectively by designers and end-users of a simulation, which reveals the conditions that make a simulation domain dependent (or not) from the perspective of each of these actors. We then present the successive, less and less domain-dependent, versions of a simulation we developed and tested in a university-level epistemology course intended for prospective teachers. Finally, we describe the main characteristics of the problem-solving processes we observed among these students, engaged in an open-ended learning activity based upon this simulation.

Keywords

Computer simulation, problem-solving, open-ended learning, epistemology

Introduction

Les premières utilisations de la simulation informatique en enseignement remontent au début des années 1970 (Lewis et Bullock, 1972), notamment avec la mise en place du système PLATO IV (Grossman et Walter, 1978). Depuis, à la faveur de l'apparition des ordinateurs personnels et, surtout, de l'évolution de leurs capacités de calcul et d'affichage permettant une interactivité et un réalisme toujours croissants, les simulations informatiques se sont répandues en éducation, qu'ils s'agisse de « simples » simulations (Breuer, Molkenthin et Tennyson, 2006), de laboratoires virtuels (Meisner et Hoffman, 2005), de micromondes (Rieber, 2004) ou de jeux de simulation (de Castell et Jenson, 2007; Sauvé, Renaud, Kaufman et Marquis, 2007). Ces applications présentent des avantages pédagogiques indéniables (Rieber, 2005; Vogel *et al.*, 2006). Elles peuvent entre autres servir de base pour des situations d'apprentissage ouvertes authentiques (de Jong et van Joolingen, 1998; Jungck, 1991; Rieber, 2002), souvent associées à la « pédagogie de la découverte » (de Jong, 2006; Reid, Zhang et Chen, 2003; van Joolingen, de Jong et Dimitrakopoulos, 2007) ou à l'apprentissage par problème (Lehti, Lehtinen et Murtonen, 2005; Maxwell, Mergendoller et Bellisimo, 2004; Rendas, Rosado Pinto et Gamboa, 1999; Soderberg et Price, 2003).

Cependant, la plupart de ces simulations sont associées à un contenu disciplinaire riche et complexe. En fait, beaucoup d'entre elles ont été conçues principalement afin de favoriser l'apprentissage des concepts disciplinaires (White, 1993; Windschitl et Andre, 1998). Même les simulations visant l'apprentissage d'habiletés dites « génériques » (Giljers et de Jong, 2005; Rivers et Vockell, 1987; Tennyson et Breuer, 2002) sont généralement liées à une discipline ou à un domaine particulier.

Quelques rares travaux ont abordé l'usage de simulations non disciplinaires, qualifiées dans la littérature de *domain-independent*, *context-free* ou *content-free*. Ainsi, W. B. Rouse, S. H. Rouse, Hunt, Johnson et Pelligrino (1980) ont étudié la formation au diagnostic de pannes au moyen de simulations

dites *context-free*. Anderson (1982) a développé, pour une étude sur la formation aux « plans d'expérience » en psychologie expérimentale, diverses versions d'une simulation, dont une véritablement non disciplinaire, en soulignant ainsi ses avantages sur le plan de l'étude des habilet s g n riques :

Unlike in most learning-type simulations, when students use the Context Free Instructional Simulation (CFIS), they are confronted with a problem that has no link to any situation in real life. [...] Students [...] cannot, as many seem to want to do, collect the data but base their conclusions not on the data at hand but on what they expect, or what they "know" should happen (p. 19).

Soulignons également les travaux de Larochelle et ses collaborateurs qui ont conçu au milieu des années 1980 une simulation informatique baptis e bien   propos *L' nigmatique*, dont le caractère disciplinaire était volontairement atténué et, surtout, non explicité (Larochelle et Désautels, 1992).

Pour voir réapparaître ce type de simulation, il faut attendre l'étude récente de Johnson, Moher, Cho, Edelson et Russell (2004), menée auprès d'élèves du primaire et faisant intervenir des simulations très simples, au contenu disciplinaire minimal, de même que les travaux de Blech et Funke (2005), qui ont développé et expérimenté une application appelée ColorSim, que Kluge (2008) qualifie de *fictitious and context-free microworld (MW)*. Comme l'affirme celle-ci :

To avoid the uncontrolled influence of prior knowledge in the experiment, designers strove to make ColorSim fictitious and context free, meaning that the structure of the MW cannot be derived from previous knowledge of a certain domain and must be learned by all participants (p. 162).

Force est de constater que ces travaux semblent être demeurés des cas isolés, aucun d'eux ne citant les précédents, et qu'ils n'ont donc pas permis l'émergence d'un courant de recherche sur le caractère disciplinaire (ou non) des simulations ou sur le potentiel de simulations non disciplinaires. Le présent travail, qui propose une réflexion théorique sur le concept de simulation adisciplinaire et présente les résultats d'une étude exploratoire fondée sur l'utilisation de telles simulations, vise à suggérer des pistes à cet égard.

1. Simulations disciplinaires et adisciplinaires

Qu'est-ce qui détermine le caractère disciplinaire ou non d'une simulation? Une simulation peut-elle devenir véritablement (ou complètement) non disciplinaire – c'est-à-dire adisciplinaire?

Nous postulons d'abord que le caractère disciplinaire d'une simulation n'est pas une caractéristique intrinsèque de celle-ci. À l'instar d'autres caractéristiques comme le réalisme et la fidélité, il s'agit plutôt d'un *jugement* porté sur elle par un acteur concerné, par exemple le concepteur de la simulation, ou encore un usager, ce dernier pouvant être un expert d'une discipline, un étudiant inscrit dans un programme disciplinaire, ou encore un usager sans qualifications particulières. Ainsi, une même simulation pourrait être jugée plus ou moins disciplinaire par chacun de ces acteurs; ce jugement sera fondé en bonne partie sur l'expérience de cet acteur avec la simulation, plus précisément sur les tâches qu'il accomplira en lien avec celle-ci. Ces tâches sont partie intégrante des processus associés au développement d'une simulation, d'une part, et à son utilisation, d'autre part.

1.1 L'adisciplinarité dans la conception d'une simulation

Le développement d'une simulation informatique est un processus (figure 1, à la page suivante) faisant intervenir divers acteurs qui permet de passer d'un phénomène naturel (P), souvent appelé « référent », à un environnement informatique avec lequel un usager interagit via l'interface (I) d'entrée (clavier, souris, etc.) et de sortie (moniteur, haut-parleurs) d'un ordinateur. Ce passage doit respecter la condition suivante : les observations que les usagers peuvent effectuer sur les entités ou les caractéristiques du phénomène simulé, que celui-ci soit laissé à lui-même ou soumis à leurs actions, doivent reproduire avec un certain degré de réalisme et de fidélité (Alessi, 1988; Hays et Singer, 1989) les observations réalisées dans les recherches portant sur ce phénomène. Entre ces deux étapes, diverses tâches doivent être effectuées. Tout d'abord, un *concepteur*² doit choisir une représentation (R) du phénomène fondée sur une analyse de ce que les *chercheurs* de la ou des disciplines concernées ont observé en rapport avec le phénomène et sur les explications théoriques qu'ils ont élaborées. Le concepteur doit ensuite construire, sur la base de cette représentation, souvent en adaptant ou en particularisant un modèle développé par les chercheurs, un modèle dynamique (M) pouvant reproduire les principales caractéristiques observables du phénomène, ou du moins celles qui l'intéressent. Souvent, ce modèle, déjà une simplification de la réalité (et de sa représentation), doit être de nouveau simplifié (M') afin d'être traduit par un *programmeur* en un code informatique (C) approprié aux ressources dont on dispose (budget, capacité des machines, limites des langages ou logiciels). Ce code doit entre autres relier les caractéristiques de l'interface (périphériques d'entrée et de sortie) aux paramètres du modèle. En parallèle, un *infographe* crée une représentation picturale, plus ou moins réaliste, des objets participant au phénomène et de leurs comportements (mouvements, transformations) aux fins d'affichage dans l'interface de sortie.

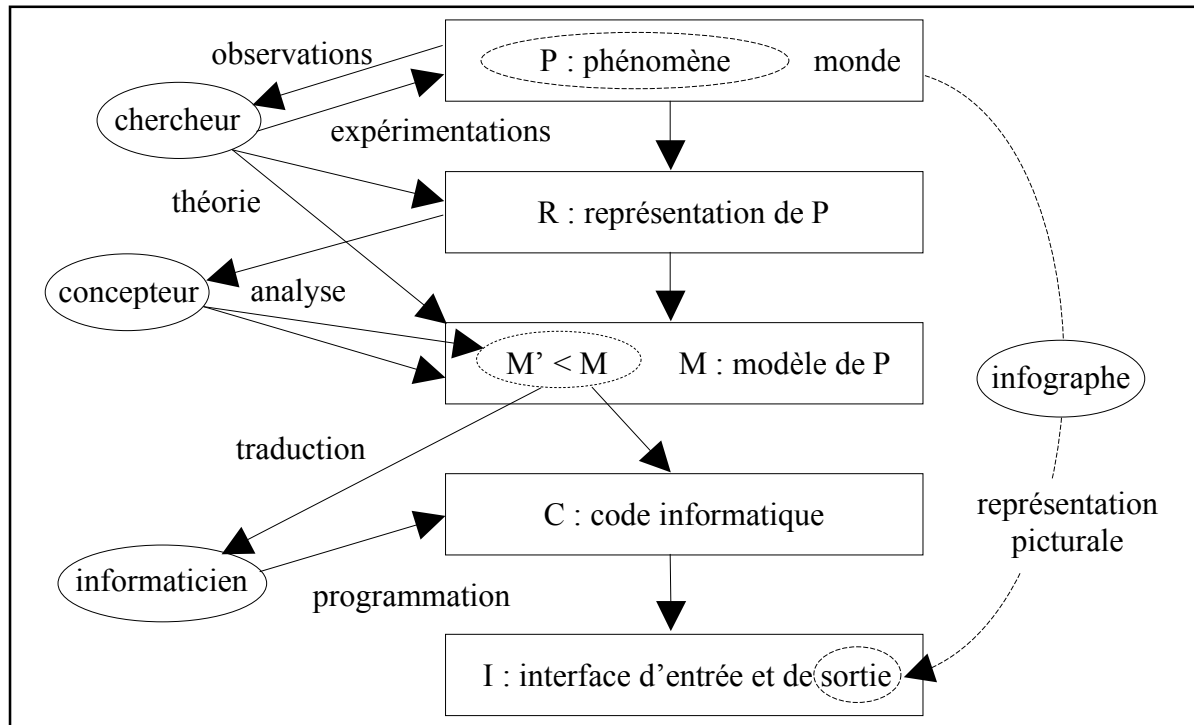


Figure 1. Du phénomène à la simulation informatique : les acteurs (ellipses) et leurs tâches (flèches) dans le processus de développement d'une simulation disciplinaire (rectangles)

Dans ce processus, les aspects disciplinaires sont présents non seulement aux étapes de la représentation et de la modélisation, mais déjà, comme l'enseigne l'épistémologie contemporaine, à celles de l'observation et de l'expérimentation, qui portent en elles la marque des structures disciplinaires (concepts, lois, théories).

Pour développer une simulation adisciplinaire, il faut éliminer les deux premières étapes du processus (figure 2, à la page suivante). Le concepteur construit alors directement un pseudo-modèle (M') comprenant des éléments (paramètres et variables) qui ne sont fondés sur aucune représentation particulière et qui sont reliés entre eux par des relations (logiques, mathématiques) analogues à celles que l'on retrouve dans les modèles élaborés dans les diverses disciplines. Par exemple, les paramètres pourront être la position d'objets présents qui se

déplacent (à l'écran) selon des lois ou des règles qui n'ont rien à voir avec les lois de la mécanique newtonienne, ou avec celles qui décrivent le comportement d'animaux. De plus, comme la nature des objets figurant dans un phénomène renvoie généralement à une discipline, ou encore à quelques disciplines bien déterminées, les entités affichées dans l'interface de sortie devront être complètement non figuratives. Dans les deux cas, un jugement devra être porté : le concepteur devra juger que le pseudo-modèle ne correspond réellement à aucune discipline, ni même à aucun phénomène connu (de lui), et l'infographe devra juger que la représentation qu'il a créée est vraiment non figurative.

Dans ces conditions, on peut se demander si le terme « simulation » convient à une telle application, qui pourrait tout aussi bien être qualifiée d'« animation interactive ».

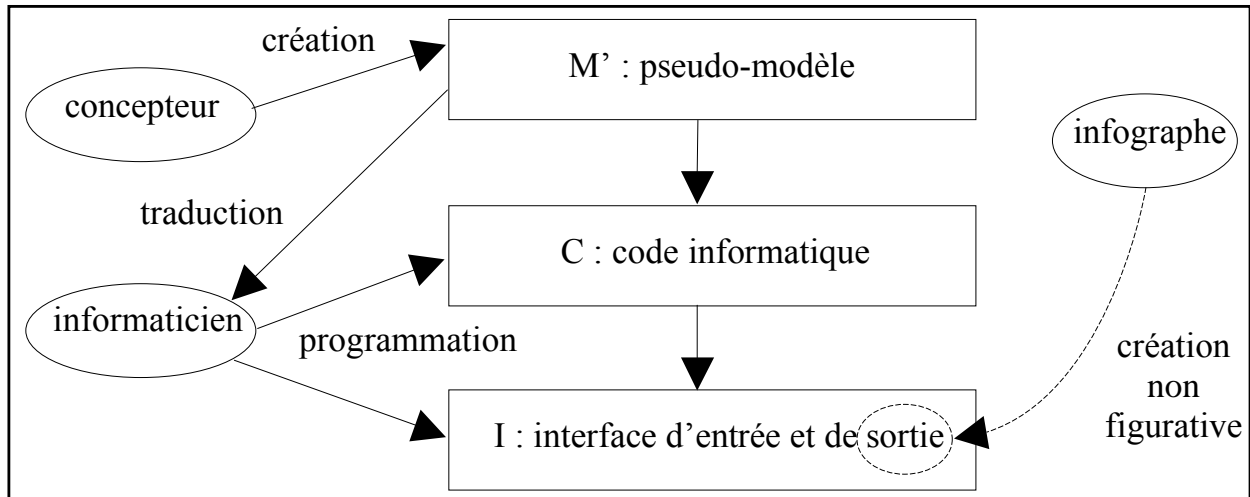


Figure 2. Développement d'une « simulation » adisciplinaire : point de vue du concepteur

1.2 L'adisciplinarité d'une simulation du point de vue de l'utilisateur

De son côté, l'utilisation d'une simulation fait intervenir un seul acteur : l'utilisateur. Du point de vue de celui-ci, la situation se présente différemment; en fait, les choses sont en quelque sorte inversées (figure 3, à la page suivante). En effet, l'utilisateur d'une simulation n'a pas accès directement au phénomène que celle-ci veut reproduire. Cependant, l'observation des éléments représentés dans l'interface de sortie lui permet en général, surtout si la simulation est tant soit peu réaliste, de reconnaître le phénomène, ou du moins son contexte (flèche pointillée dans la figure). De plus, un discours d'autorité – il peut s'agir des explications du professeur ou encore des informations affichées par le

logiciel – lui fournit généralement des informations plus ou moins précises sur le phénomène simulé. Ces deux sources d'information confèrent déjà un caractère disciplinaire à la simulation. Par ses observations et ses interactions avec l'interface et l'analyse qu'il fait de celles-ci – tâches guidées, le cas échéant, par ses connaissances du phénomène et de la discipline concernée –, l'utilisateur se construit une représentation du phénomène, puis en élabore un modèle descriptif ou explicatif.

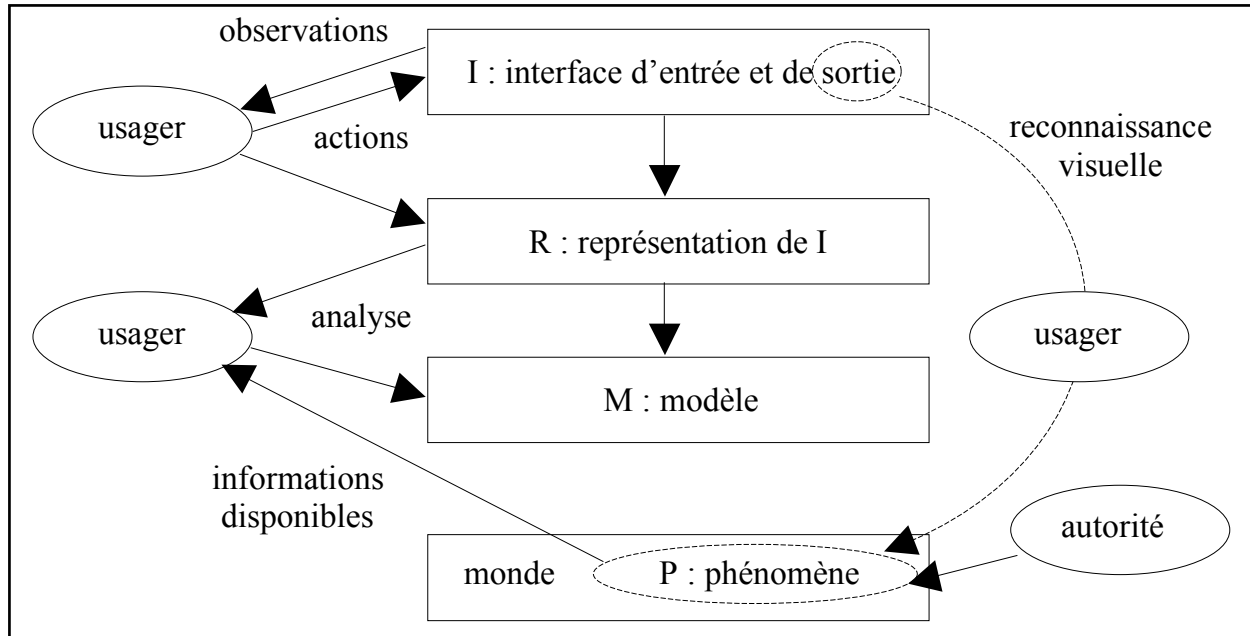


Figure 3. De la simulation à la construction d'un modèle : les tâches de l'utilisateur d'une simulation disciplinaire

Par contre, s'il ne dispose d'aucun indice ou information quant à la nature d'un phénomène sous-jacent (figure 4, à la page suivante), parce qu'on ne lui fournit aucune information sur un phénomène (que la simulation soit disciplinaire ou non du point de vue du concepteur) et que les entités représentées à l'écran ne permettent d'établir aucune correspondance avec un phénomène connu, l'utilisateur se retrouve devant une alternative :

- soit il juge que la « simulation » ne correspond à aucun phénomène connu ou, ce qui est équivalent, qu'elle constitue à elle seule le phénomène qu'il explore; la simulation est alors adisciplinaire, de son point de vue, ce qui ne l'empêche pas de se construire une représentation, puis un modèle de ce « phénomène »;

- soit il tente d'associer, par analogie, la simulation et ses divers éléments constitutifs à un phénomène qu'il connaît (pointillés dans la figure 4); la simulation lui apparaît alors comme disciplinaire, et il tentera de vérifier si le comportement des entités affichées correspond à ce que ses connaissances, tant spontanées que disciplinaires, lui suggèrent à propos de ce phénomène.

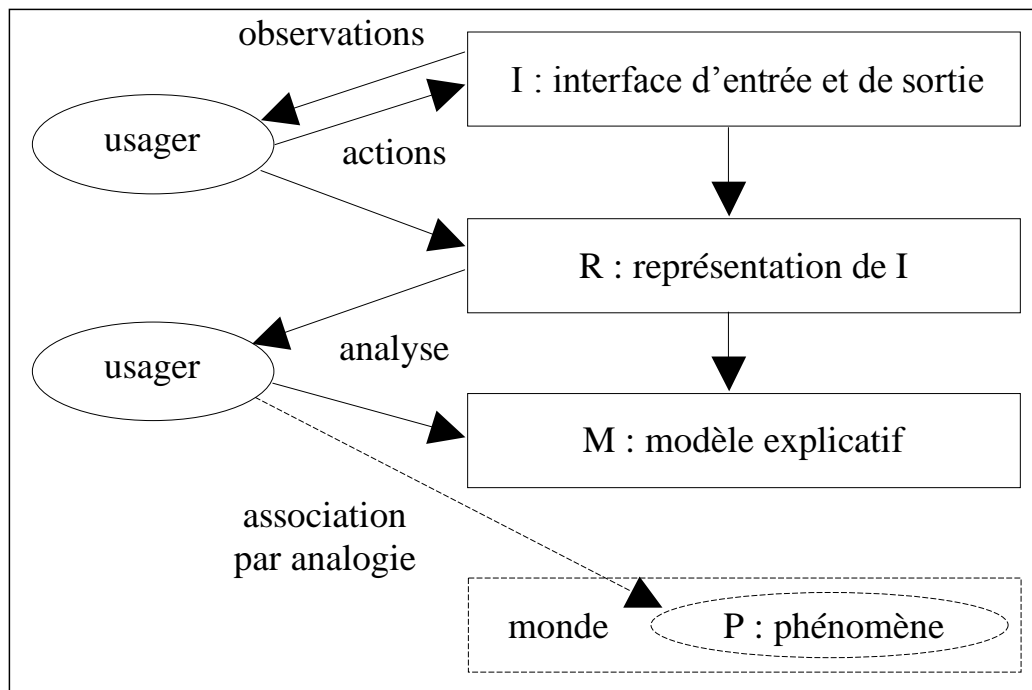


Figure 4. De la simulation à la construction d'un modèle : les tâches de l'utilisateur d'une simulation (adisciplinaire du point de vue du concepteur)

2. La conception des *Boîtes noires* : vers une simulation adisciplinaire

Aux fins d'une activité d'apprentissage ouverte portant sur l'épistémologie, dans un cours universitaire s'adressant à de futurs enseignants, nous avons développé sur une période de trois ans une série de simulations appelées « Boîtes noires » (Meyor et Couture, 2007)³. Ces simulations se distinguaient de celles qui ont été évoquées plus haut, notamment par le recours à une architecture fondée sur des agents (Klopfer, Colella et Resnick, 2002). Sur la base de règles très simples à caractère probabiliste décrivant le comportement et l'interaction d'agents, ces simulations permettent de reproduire – ou de générer – des phénomènes dits « émergents » où, entre autres, l'on ne retrouve pas le déterminisme qui caractérise généralement les simulations informatiques.

Les deux premières Boîtes noires (BN) que nous avons développées (figures 5 et 6, à la page suivante) reproduisaient des phénomènes naturels, ou du moins s'en inspiraient; il s'agissait donc toujours de simulations disciplinaires, du point de vue du concepteur. Cependant, la représentation non figurative employée dans les deux cas ne suggérait pas un phénomène précis, et aucune indication n'était fournie aux étudiants quant à la nature du phénomène; les BN présentaient donc le potentiel d'être perçues comme adisciplinaires par ceux-ci. Les deux simulations, que nous désignerons ici sous les appellations *L'Attracteur étrange* et *Les Attracteurs étranges*, respectivement⁴, se distinguaient surtout par la présence, dans la seconde, d'un plus

grand nombre d'outils ou de fonctions permettant de faciliter les observations et la prise de mesures (tableau 1). Selon les versions, ces mesures pouvaient porter sur le nombre d'entités, la distance qu'elles parcourent dans un temps donné, la forme de leur trajectoire, leur « durée de vie », leur taille, leur couleur, ainsi que sur les changements de ces caractéristiques en fonction des interactions entre entités (passage à proximité, collision, fusion, etc.).

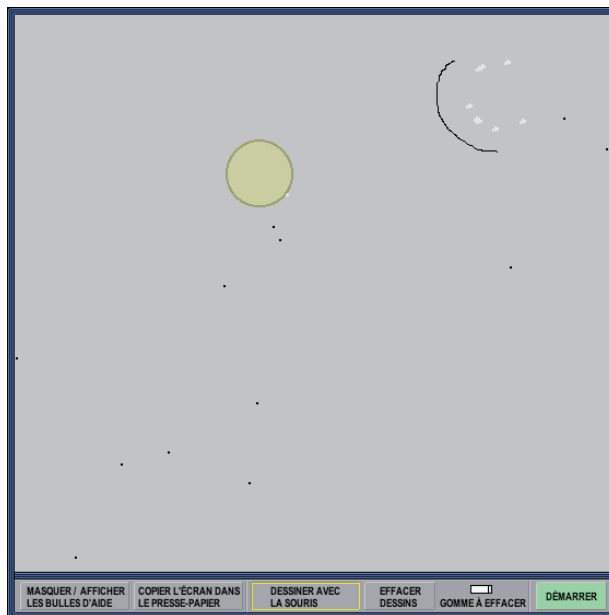


Figure 5. Première version de la BN : L'Attracteur étrange. Des « entités » (points noirs) mobiles sont attirées par l'entité circulaire (qui peut être déplacée) et déposent parfois des « taches » blanches sur son pourtour.

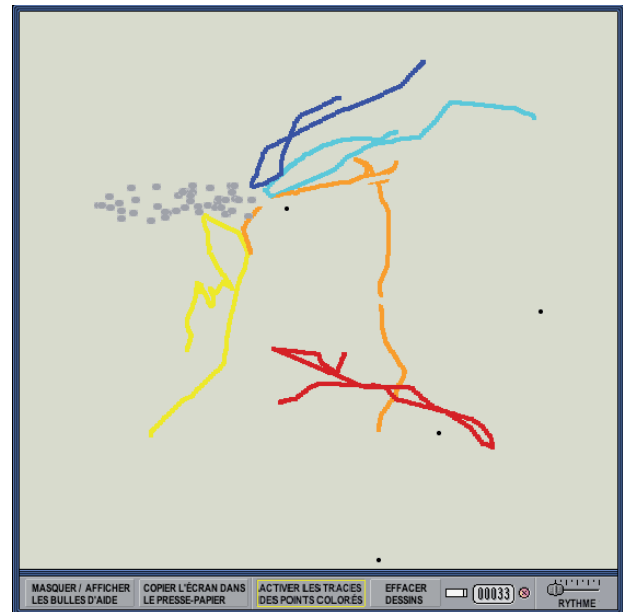


Figure 6. Deuxième version de la BN : Les Attracteurs étranges. Des « entités » mobiles dont on peut enregistrer les trajectoires (traits colorés) sont attirées vers des entités fixes (taches grises) qui disparaissent au contact des premières. Le nombre initial d'entités de chaque type peut être fixé par l'utilisateur.

Nous avons également conçu et expérimenté une troisième BN, *Les Sphères*, qui ne correspondait, du point de vue du concepteur, à aucun phénomène connu ou envisagé (figure 7, à la page suivante). La seule trace d'une référence disciplinaire dans le pseudo-modèle élaboré par le concepteur était constituée des lois de la mécanique employées pour la modélisation du mouvement des « entités ». En effet, le modèle leur attribue des masses et inclut des forces qui en modifient le mouvement, tel que le prévoient les lois de la mécanique (la deuxième loi de Newton, notamment). Toutefois, ces forces ne correspondent pas à celles qui interviennent dans les phénomènes naturels connus (du concepteur); par exemple, les entités sont freinées par une force résistive qui diminue avec leur taille, ce qui est le contraire de ce que nous enseigne la physique. La représentation des entités – des sphères, la forme tridimensionnelle la plus simple qui existe,

sur le plan mathématique – et la convention adoptée pour distinguer les types d’entités, soit les couleurs primaires (synthèse soustractive), visaient à prévenir toute référence à un phénomène donné. Soulignons à cet égard que les sphères peuvent se traverser mutuellement librement, sans aucune déformation, mais en émettant un son synthétique caractéristique, ce qui vise à contrer l’association à des bulles ou à des balles que pourrait suggérer cet-

te représentation picturale. Rétrospectivement, on peut cependant se demander si le choix de la sphère comme forme sans connotation disciplinaire était approprié, étant donné son emploi très fréquent dans les représentations en sciences physiques (des atomes aux planètes, en passant par les boules de billard...). Il n’est pas inutile de préciser que cette simulation (incluant les formes sphériques qu’elle affiche) est un « produit dérivé » d’une simulation de mouvements moléculaires développée par un des auteurs (MC) dans un autre contexte.

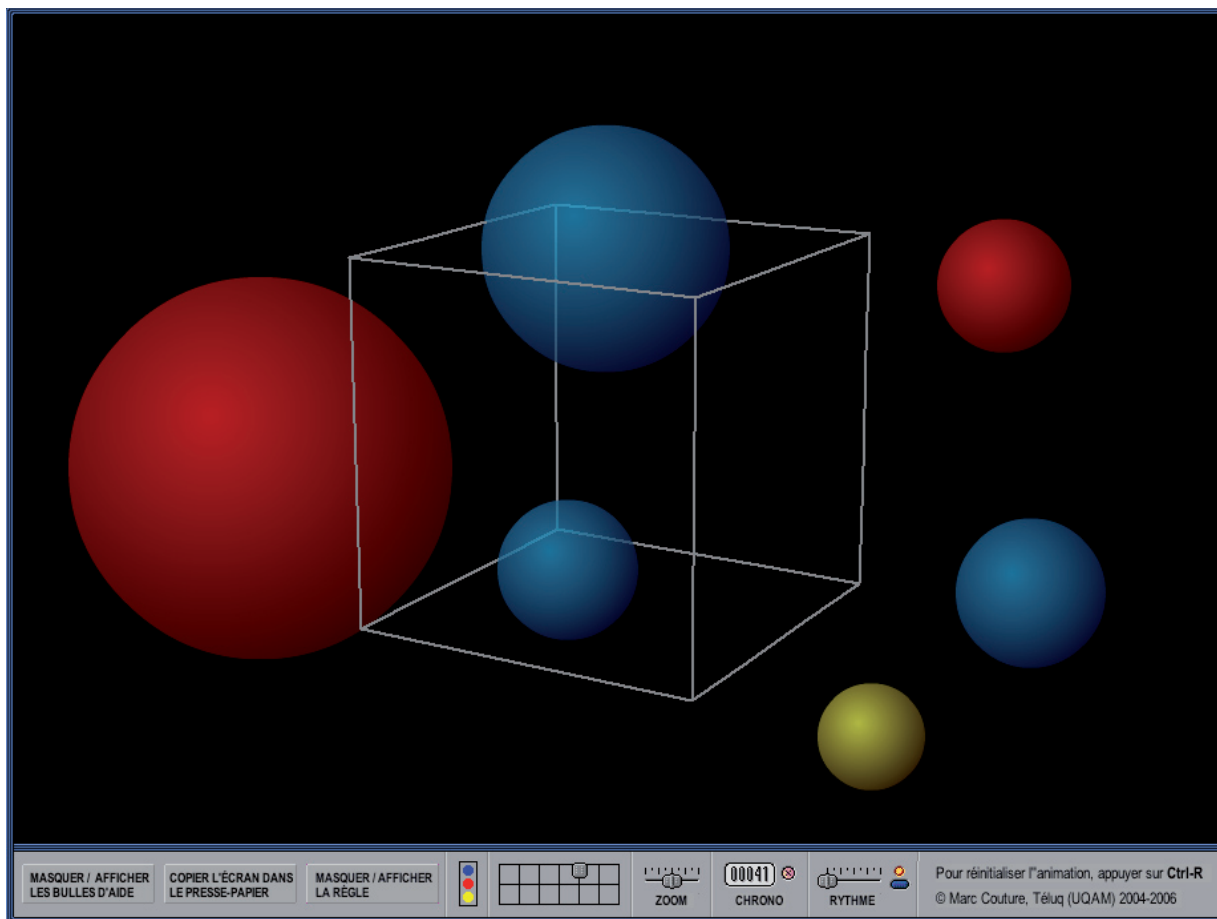


Figure 7. Troisième version de la BN : Les Sphères. Des « entités » (sphères colorées) que l’on peut lancer avec la souris se déplacent avec une tendance à revenir dans la zone cubique centrale; une collision entre deux sphères produit un son et peut entraîner leur fusion.

Tableau 1. Outils ou fonctions visant à faciliter l'observation ou la mesure disponibles dans l'interface des trois versions de la Boîte noire

Outils ou fonctions	1. L'Attracteur étrange	2. Les Attracteurs étranges	3. Les Sphères
Effectuer une copie de l'écran de la simulation	X	X	X
Interrompre/reprendre le déroulement de la simulation	X	X	X
Ralentir/accélérer le rythme de déroulement de la simulation		X	X
Afficher le « temps » écoulé (synchronisé avec le rythme de déroulement)		X	X
Modifier le point de vue d'observation : zoom et rotation (3D seulement)			X
Dessiner avec la souris	X		
Afficher une règle (échelle en pixels)			X
Associer des numéros et des couleurs aux entités mobiles		X	
Enregistrer les traces des entités mobiles		X	
Déplacer les entités avec la souris	X		X
Modifier le nombre d'entités		X	X

Une des caractéristiques marquantes de l'évolution des BN est le lien étroit, tel que l'envisage le paradigme de la recherche fondée sur le design (Cobb, Confrey, DiSessa, Lehrer et Schauble, 2003; Design-Based Research Collective, 2003), entre la conception des simulations, leur utilisation en classe et l'approfondissement des notions théoriques entourant le concept de simulation adisciplinaire. Notre présence lors des séances de laboratoire nous a en effet permis, tout au long de ce processus, de

tenir compte des réactions et suggestions des étudiants tant pour des ajustements immédiats dans chacune des versions que pour la conception des versions successives, que ce soit en ce qui concerne l'interactivité, la nature des outils d'observation et de mesure ou les caractéristiques qui semblaient favoriser une interprétation disciplinaire du phénomène. Notons que dans ce processus, la même personne (MC) jouait le rôle de concepteur, de programmeur et d'infographe.

3. Le contexte pédagogique

Les trois BN ont été successivement utilisées, en 2004, 2005 et 2006, comme support à l'apprentissage dans un cours d'épistémologie en formation des maîtres⁵. Nous inspirant au départ de l'approche conçue et mise en pratique par Désautels et ses collaborateurs (Nadeau et Désautels, 1984; Larochelle et Désautels, 1992), nous avons défini des modalités pédagogiques premières que nous avons révisées par la suite, d'année en année, en considérant d'une part le contexte particulier de l'expérience sous ses dimensions d'apprentissage et d'enseignement – ce qui inclut l'enracinement phénoménologique qui caractérise notre pratique (Meyor, 2006) – et d'autre part les commentaires des étudiants. Nous avons décrit en détail ailleurs (Meyor et Couture, 2007) l'évolution de ces modalités. Nous nous pencherons ici sur les démarches de résolution de problèmes empruntées par les étudiants dans une situation d'apprentissage ouverte.

Adoptant le point de vue de Mayer et Wittrock (1996, p. 47), nous définissons la résolution de problèmes comme « le processus cognitif qu'un individu emprunte pour atteindre un but lorsqu'aucune méthode de solution ne lui paraît évidente », « processus cognitif » devant être compris au sens large, en considérant non seulement la cognition, mais aussi l'affectivité, l'imagination, le langage, etc. Par ailleurs, une situation d'apprentissage sera qualifiée d'« ouverte » lorsqu'on accorde à l'apprenant une responsabilité importante dans l'interprétation des données fournies, la définition des buts à atteindre, le choix des méthodes et des stratégies, et la nature des réponses ou solutions acceptables.

Ici, le problème proposé aux apprenants consistait à élaborer, en équipes, une explication rationnelle – prenant la forme d'une thèse – du phénomène présenté par l'ordinateur, à l'exposer au groupe et à la défendre au besoin. Le caractère ouvert de la situation est attesté par le fait qu'aucune autre consigne ne leur était fournie, par exemple, quant à la dé-

finition des termes « explication » et « rationnel », quant à la nature du programme informatique, de même qu'en ce qui touche les moyens ou stratégies d'investigation, de gestion du travail d'équipe ou de présentation des résultats. En particulier, aucune consigne n'était fournie quant à l'utilisation des outils de mesure ou d'observation intégrés aux simulations, ni à celle d'outils de mesures extérieurs à celles-ci, telles les montres ou encore les règles de plastique qui auraient pu être employées pour mesurer des distances sur le moniteur.

4. L'expérimentation

Pendant les trois années au cours desquelles la BN a été utilisée, nous avons assisté aux séances de « laboratoire » et aux présentations des équipes. Nous avons également recueilli des informations et des indices concernant les démarches de résolution de problèmes empruntées par les apprenants au moyen des productions qui étaient exigées dans le cours : des journaux de bord individuels et les documents décrivant les « thèses » de chacune des équipes. L'observation de l'activité en « laboratoire » de 25 équipes et l'analyse de neuf journaux de bord de l'année 2005, rédigés individuellement⁶, nous permettent d'en ressortir des caractéristiques que nous avons observées à des degrés que, compte tenu de la nature exploratoire de la recherche, nous n'avons toutefois pas encore mesurés. Nous en exposerons ici quatre. L'intérêt de les présenter réside dans leur caractère frappant, voire déconcertant pour les professeurs – car non saisissable dans la pédagogie plus « dirigiste » qui anime davantage nos cours –, et agissant comme un véritable révélateur de certains aspects de la formation des étudiants⁷. Par ailleurs, l'ordre dans lequel nous exposons ces caractéristiques reflète leur ordre d'apparition lors de la démarche de résolution de la BN par les étudiants.

4.1 La réduction de la rationalité à la science

La première caractéristique relève de l'interprétation même des données de base du problème, plus particulièrement de la signification que les étudiants, dans ce contexte, attribuent au terme « rationalité ». Nous avons constaté que, malgré leur ancrage disciplinaire varié, et malgré le fait que rien, dans les simulations, ne pointait vers l'une ou l'autre des disciplines scientifiques (et les chercheurs présents en classe se gardaient bien d'encourager les étudiants dans cette voie), les étudiants assimilent et réduisent spontanément la rationalité à la science : est rationnel ce qui est scientifique. Il est ainsi question, dans les journaux de bord, de :

... recherche de critères de la culture scientifique pour réaliser des expériences permettant d'arriver à des résultats concluants (J-9);

... prépondérance du rationnel, suivant l'aspect scientifique de notre société (J-5);

... démontrer de façon empirique que le phénomène BN représentait une entité objective à l'aide d'explications biologiques éprouvées. Cette attitude se réclame d'une vérité et d'une connaissance vraie qui ont la prétention à l'universalité et à l'objectivité (J-6);

... incrédulité qu'une thèse ayant pour origine des éléments relevant de l'imaginaire pouvait être valable (J-8).

Par ailleurs, cette science est d'emblée comprise comme science de la nature – ou science formelle, car elle inclut les mathématiques. Ainsi, la demande d'une explication rationnelle est spontanément interprétée comme demande d'une explication scientifique, ce qui a souvent pour effet, dans un premier temps, de désarmer les étudiants provenant des autres domaines, qui disposent d'un bagage disciplinaire (comprenant notamment des stratégies) peu approprié aux démarches de résolution de problèmes scientifiques. S'il y a prise de conscience de cet état de la connaissance, elle ouvre nécessairement à des perspectives inédites sur la BN :

... il est extrêmement rare que nous réalisions à quel point certaines facettes de [cette] culture peuvent interférer avec la conception et la compréhension d'un objet donné (approche scientifique de la BN, recherche de quelque chose de très rationnel, de démontrable) (J-5).

4.2 Le recours à l'analogie comme mode d'explication de la BN

Une deuxième caractéristique est le recours à l'association par analogie (figure 4, à la page 56) comme stratégie de résolution privilégiée. Une bonne partie du temps de réflexion et de discussion en équipe est consacrée à la recherche d'un phénomène qui « ressemble » ou « fait penser » à ce qu'ils observent. Et même si rien dans l'environnement informatique ou dans les consignes (orales ou écrites) qui leur sont fournies ne suggère que l'ordinateur représenterait un phénomène particulier, ils viennent presque tous assez rapidement à supposer qu'ils observent la simulation d'un phénomène précis qui relève d'une discipline. En accord avec l'adéquation science-rationalité mentionnée plus haut, leurs premières hypothèses concernaient en général des phénomènes biologiques ou physiques correspondant parfois, pour les deux premières BN, aux phénomènes mêmes qui avaient inspiré le concepteur. Pour la troisième, *Les Sphères*, comme on l'a souligné plus haut, les interprétations physiques (atomes, planètes) ont rapidement surgi. Le fait que le programmeur des BN leur ait été décrit comme un scientifique a sans doute également favorisé cette réaction. Cependant, ces hypothèses étaient généralement rejetées assez rapidement au profit du choix de phénomènes relevant généralement des sciences humaines et sociales, avec une prédominance pour la psychologie et l'éducation (voir le tableau 2, qui répertorie l'ensemble des thèses proposées au cours des trois années de l'expérimentation). Cela n'étonnera pas de la part d'étudiants dont la moitié de la formation a été consacrée à des cours (dont celui où se déroulait l'activité) reliés à ces domaines. Seules deux équipes ont opté pour une explication non dis-

ciplinaire, l'une ayant puisé dans l'imaginaire de l'enfance (les Pokémons) et l'autre ayant choisi de considérer le comportement des entités informatiques comme étant le phénomène à expliquer, ce qui l'a amenée à qualifier le phénomène... d'« antiphénomène ».

Tableau 2. Éventail des thèses proposées par les étudiants

DOMAINE				
Psychologie/éducation	Biologie	Mathématique/ physique	Psychologie/ sociologie/ politique	Aucun
Année 2004 – L'Attracteur étrange (figure 5)				
Individus à la recherche du savoir	Dualité cerveau-esprit Cerveau et traitement de l'information			
Année 2005 – Les Attracteurs étranges (figure 6)				
Acquisition de la connaissance	Cellules en développement	Théorie du chaos	Représentation d'une collectivité	Anti-phénomène
Résolution d'un problème	La vie		Dynamique psychosociale	Pokémons
Processus d'apprentissage	Lutte bactéries/ cellules			
Année 2006 – Les Sphères (figure 7)				
Acquisition de connaissances	Idées/ cerveau		Modèle politique en démocratie	
Processus d'apprentissage			Attraction du pouvoir	
Assimilation de la connaissance			Collectivité	
Schématisation du questionnement				
La connaissance				
Centre émotionnel				
Dynamique interrelationnelle				

Dès que les équipes adoptent de manière définitive une lecture du phénomène, c'est celle-ci qui dirige les processus de représentation et de modélisation. On observe d'ailleurs, chez quelques étudiants, mais de façon réitérée, une extrême difficulté, voire l'impossibilité, dès lors qu'ils ont statué sur la nature du phénomène, à voir autre chose que ce qu'ils y voient, autrement dit à se décentrer :

Lorsque j'ai eu l'idée de la résolution de la BN, c'était comme si un vide se formait autour de cette représentation et rien d'autre n'existait [...]. Je ne savais pas comment les autres équipes pouvaient trouver des théories autres que la nôtre. [...] J'étais intriguée de connaître de quelle façon les autres voyaient et observaient le phénomène de la BN et de quelle façon ils parvenaient à voir autre chose que ce que moi-même j'étais capable de voir (J-2);

J'avoue avoir été pris par ma propre théorie, car à partir du moment où nous l'avons admise, nous avons cessé d'observer les autres potentialités; j'avais conscience de ce fait (J-5).

À cela s'ajoutent la clarté de l'évidence :

Mais oui! Cela nous semble soudain une évidence. Pourquoi ne pas y avoir pensé plus tôt? (J-6);

les effets du langage utilisé pour exprimer l'idée :

Nous étions souvent bloqués sur une idée; cela nous empêchait de voir d'autres optiques, notamment à cause du langage utilisé (J-4);

ceux de la perception animée par la croyance :

Nous analysons dans la BN ce que nous voulons analyser. On connaît, on s'attarde principalement à ce qu'on veut connaître; on ne comprend que ce qu'on veut comprendre d'une situation. Même si nous avons une centaine d'heures supplémentaires, je ne crois pas que nous verrions les détails que nous avons omis (J-4);

et ceux du travail de l'idée elle-même :

Plus nous réfléchissons, plus nous formulons nos propos, plus nous y croyons (J-2).

Ces modalités, qui trouvent leur écho dans les réactions aux révolutions scientifiques survenues au cours de l'histoire (Kuhn, 1962), sont révélatrices de ce que Morin (1992) qualifie d'« existentialité de la connaissance ». La démarche de résolution de la BN les met particulièrement bien en évidence.

4.3 Limite des mesures et analyses de la BN

Une troisième caractéristique concerne le caractère limité des stratégies de prise de mesures et d'analyse de celles-ci mises en œuvre par les apprenants. On l'a vu, le soin de définir la méthode qu'ils emploieront pour observer le phénomène et s'en faire une représentation revient aux étudiants. En accord avec l'adéquation rationalité-science, ils adoptent d'emblée ce qu'ils connaissent de la méthode expérimentale employée en sciences. Ils procèdent ainsi à des séries de mesures, correspondant à diverses valeurs, des paramètres ou propriétés sur lesquels ils peuvent agir. Nous avons cependant remarqué à cet égard que les étudiants (même ceux qui détiennent une formation scientifique) adoptent une stratégie relativement pauvre : ils se limitent à certains paramètres seulement et, pour chacun d'eux, à un nombre restreint de valeurs – environ une dizaine – pour en tirer rapidement des conclusions. De plus, ils n'emploient souvent qu'une partie des outils de mesure mis à leur disposition dans la simulation. Par exemple, peu d'étudiants ont mis à profit, dans *Les Attracteurs étranges*, la possibilité de suivre individuellement les entités mobiles, ou encore mesuré, dans *Les Sphères*, la taille de celles-ci, qui augmentait lors de la fusion de deux d'entre elles selon une loi relativement simple. Une des conséquences de cette attitude est que la possibilité d'expliquer le phénomène à l'aide de lois à caractère probabiliste leur échappe complètement, alors que des mesures plus variées et plus nombreuses leur permettraient de reconnaître des tendances de fond au-delà des variations superficielles qui s'imposent dans un premier temps. La notion même de loi est pour eux très restrictive : une loi est une rela-

tion directe, exacte et absolue entre deux variables; la moindre irrégularité ou contradiction les amène non pas à remettre leurs hypothèses en question ou à approfondir leur investigation, mais à simplement conclure à l'absence de loi.

4.4 Le « maquillage » des thèses

La quatrième caractéristique tient à la structure argumentative des thèses proposées, qui fait une large place au colmatage d'éléments venant les affaiblir, voire les infirmer :

Nous n'avons jamais remis en question la validité de la thèse. Au lieu de créer une remise en question de notre théorie, nous cherchions à trouver une explication qui convenait en dérangeant minimalement ce qui avait été avancé (J-5).

Tant l'épistémologie que l'histoire des sciences nous enseignent que même les théories les mieux établies possèdent des points faibles (le problème des « anomalies », pour reprendre l'expression de Kuhn) ou des aspects tenus dans l'ombre. Dans leur démarche de résolution de ce problème, les étudiants font pratiquement tous l'expérience d'éléments ou d'aspects du phénomène qui échappent à leur modèle ou le contredisent et qui pourraient mettre en péril l'explication qu'ils ont élaborée. Une manière fréquente de légitimer la chose est, pour eux, de passer – sans problème apparent puisqu'ils le font avec aisance et assurance – de leur thèse disciplinaire à l'intention présumée du concepteur de la BN. Ils passent – et nous font passer – ainsi sans sourciller du phénomène que représenterait la simulation au « phénomène », non disciplinaire celui-là, que constitue le modèle, voire le code informatique, élaboré par un concepteur qui voulait ceci plutôt que cela. De la métaphore au programme qui la soutient : acte magique où la fragilité ne proviendrait pas des limites de leur démarche ou de leur explication, mais de la conception même de la BN. Malgré son côté cocasse, ce procédé montre bien la difficulté à mettre au point, serait-ce pour un phénomène simple, une thèse qui se tient de bout en bout.

En terminant, revenons à la résolution de problèmes, que nous avons préalablement définie comme un processus cognitif compris au sens large (cognition, affectivité, imagination, langage, etc.), dans la dynamique respective qu'elle dévoile du point de vue de l'étudiant et qui nous renseigne, nous les enseignants, sur ce que vivent – ou peuvent potentiellement vivre – les étudiants, ce qui pourra aiguïser notre geste pédagogique. Laissons-leur la parole :

L'écriture de ce journal me confronte sans cesse aux limites langagières et cognitives de la verbalisation. Plus je tente d'approfondir ma réflexion sur mes processus mentaux, sur ma façon de construire le sens, [...], et plus je réalise la complexité de tous ces processus entremêlés ainsi que la difficulté de les expliquer de façon claire et concise (J-6);

Je voulais que la raison triomphe de la BN, je n'ai donc pas laissé beaucoup de place à l'imagination. J'ai vécu le scénario où la raison prévaut et où l'affectivité est considérée comme perturbatrice, j'ai donc minimalisé l'affectivité (J-8);

[La BN a été l'objet] d'un triple travail de cognition (rationalisation, validation ou rejet des hypothèses à partir d'une base de connaissances objectives), d'imagination (trouver la thèse, élaborer) et d'affectivité (stimulation, bonne disposition, entraîné des éléments découverts). Je considère l'intérêt et la motivation comme des prédispositions essentielles à un réel apprentissage. [Mon] attitude positive a servi de catalyseur à mon imagination et [...] c'est justement cette imagination qui nous a menés sur les pistes les plus intéressantes. [En y ajoutant l'aspect cognitif, on se retrouve dans] une interaction entre les dispositions, le flux d'idées et le mode opérationnel (J-5).

Conclusion

Une simulation informatique peut être adisciplinaire du point de vue du concepteur, du fait de l'absence complète d'un phénomène sous-jacent (ou référent), au point de ne plus réellement constituer une simulation au sens strict du terme. Elle peut l'être aussi du point de vue de l'utilisateur, lorsque celui-ci ne dispose d'aucune information ni indice quant à l'existence ou à la nature d'un tel phénomène. Nous

avons développé des versions successives, de plus en plus adisciplinaires (du point de vue du concepteur) d'une simulation appelée *Boîte noire*, dont nous avons fait la base d'une activité d'apprentissage ouverte de résolution de problème. Nous voulions ainsi offrir à des étudiants en formation des maîtres un exercice de réflexion sur l'épistémologie. L'observation des démarches des étudiants et l'analyse de leurs productions nous ont permis de mettre en évidence des caractéristiques de solution, dont les principales sont : la réduction du rationnel à ce qui relève de la science, le recours à l'analogie comme mode d'explication, le caractère limité des techniques et stratégies d'investigation employées et la difficulté de s'extraire, en dépit des problèmes que l'étudiant crée ou n'arrive pas à résoudre, d'un cadre d'interprétation qui s'impose à lui à un moment donné du processus. Ces caractéristiques renvoient, d'une part, aux présupposés épistémologiques qui déterminent en bonne partie les interprétations qu'ils donnent à l'exercice et, d'autre part, aux limites ou faiblesses des méthodes qu'ils appliquent et des démarches qu'ils empruntent.

Dans une prochaine étape, il conviendrait de poursuivre jusqu'au bout notre démarche de conception, en construisant une simulation complètement adisciplinaire (du point de vue du concepteur), c'est-à-dire sans aucun référent et sans lien avec aucune discipline. Il serait intéressant également d'étudier, d'une manière plus systématique et contrôlée, en dehors de tout contexte pouvant favoriser un champ disciplinaire particulier, les facteurs qui influencent le choix – et le rejet – des diverses explications imaginées par les étudiants. En effet, la prévalence des thèses retenues relevant de la psychologie et de l'éducation (tableau 2, à la page 62) a de quoi surprendre, malgré le contexte qui, à certains égards, les favorisait, si l'on considère tant la variété des rattachements disciplinaires des étudiants que celle des explications qu'ils émettent spontanément.

Notes

- ¹ Dans ce texte, le masculin est employé comme générique uniquement pour faciliter la lecture. Les auteurs ne perdent cependant pas de vue que la majorité des étudiants ayant participé à cette étude étaient en fait des étudiantes, et souhaitent que les lecteurs (et les lectrices) fassent de même.
- ² Dans ce texte, les termes « concepteur », « chercheur », etc. font référence à des rôles qui peuvent être joués par des personnes, certaines d'entre elles pouvant jouer plusieurs rôles. Ainsi, selon le modèle de travail adopté, le concepteur d'une simulation peut jouer les rôles de chercheur, de programmeur et même d'infographe.
- ³ Ces simulations sont accessibles en ligne : <http://www.telug.uqam.ca/spersonnel/mcouture/boitenoire>
- ⁴ Ces appellations, qui ont clairement une connotation disciplinaire (plus précisément, elles renvoient à la théorie du chaos), n'ont pas été proposées aux étudiants, pour qui toutes les versions s'appelaient *La Boîte noire*.
- ⁵ Groupes habituellement constitués d'une cinquantaine d'étudiants inscrits dans les divers champs de formation en enseignement secondaire : français, sciences humaines, mathématique, science et technologie, éthique et culture religieuse.
- ⁶ Parmi les travaux de session demandés aux étudiants en 2004 et 2005 figurait la tenue individuelle d'un journal de bord. En 2005, nous avons demandé aux étudiants l'autorisation d'utiliser leur journal à des fins de recherche et obtenu l'accord écrit de neuf d'entre eux. Il s'agit des documents notés J-1, J-2, etc., dont des extraits littéraires sont présentés un peu plus loin.
- ⁷ Par exemple, même si la spécialisation de la formation, notamment celle des futurs enseignants, s'avère être un thème largement discuté dans les milieux d'éducation, la saisir sur le vif, à l'occasion d'un exercice ouvert comme l'est l'élucidation de la BN, permet d'en saisir la portée et a pour effet de renvoyer tout pédagogue au problème qu'elle engendre dans une visée de formation générale.

Références

- Alessi, S. M. (1988). Fidelity in the design of instructional simulations. *Journal of Computer-Based Instruction*, 15, 40-47.
- Anderson, D. E. (1982). Computer simulations in the psychology laboratory. *Simulation & Gaming*, 13, 13-36.
- Blech, C. et Funke, J. (2005). *Dynamis review: An overview about applications of the Dynamis approach in cognitive psychology*. Récupéré le 24 mai 2008 du site du German Institute for Adult Education (DIE), http://www.die-bonn.de/esprid/dokumente/doc-2005/blech05_01.pdf
- Breuer, K., Molkenhain, R. et Tennyson, R. D. (2006). Role of simulation in Web-based learning. Dans H. F. O'Neil et R. S. Perez (2006), *Web-based learning: Theory, research, and practice* (p. 307-326). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Cobb, P., Confrey, J., DiSessa, A., Lehrer, R. et Schauble, L. (2003). Design experiments in educational research. *Educational Researcher*, 32, 2-10.
- de Castell, S. et Jenson, J. (2007). Digital games for education: When meanings play. *Intermedialities*, 9, 113-132.
- de Jong, T. (2006). Technological advances in inquiry learning. *Science*, 312(5773), 532-533.
- de Jong, T. et van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, 68(2), 179-201.
- Design-Based Research Collective. (2003). Design-based research: An emerging paradigm for educational inquiry. *Educational Researcher*, 32(1), 5-8.
- Gijlers, H. et de Jong, T. (2005). The relation between prior knowledge and students' collaborative discovery learning processes. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(3), 264-282.
- Grossman, M. et Walter, D. (1978). Teaching with interactive computer capabilities (PLATO: Computer-based education for animal breeding). *Journal of Dairy Science*, 61, 1308-1311.
- Hays, R. T. et Singer, M. J. (1989). *Simulation fidelity in training system design: Bridging the gap between reality and training*. New York : Springer-Verlag.
- Johnson, A., Moher, T., Cho, Y., Edelson, R. et Russell, E. (2004). Learning science inquiry skills in a virtual field. *Computers & Graphics*, 8(3), 409-416.
- Jungck, J. R. (1991). Constructivism, computer exploratoriums, and collaborative learning: Constructing scientific knowledge. *Teaching Education*, 3(2), 151-170.
- Klopfer, E., Colella, V. et Resnick, M. (2002). New paths on a StarLogo adventure. *Computers & Graphics*, 26, 615-622.
- Kluge, A. (2008). Performance assessments with microworlds and their difficulty. *Applied Psychological Measurement*, 32(2), 156-180.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. Chicago : University of Chicago Press.
- Larochelle, M. et Désautels, J. (1992). *Autour de l'idée de science. Itinéraires cognitifs d'étudiants et d'étudiantes*. Sainte-Foy, Canada : Presses de l'Université Laval.
- Lehti, S., Lehtinen, E. et Murtonen, M. (2005). Computer-supported problem-based learning in the research methodology domain. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 49(3), 297-323.
- Lewis, R. et Bullock, P. (1972). Computing. *Physics Education*, 7, 457-459.
- Maxwell, N. L., Mergendoller, J. R. et Bellissimo, Y. (2004). Developing a problem-based learning simulation: An economics unit on trade. *Simulation & Gaming*, 35(4), 488-498.
- Mayer, R. E. et Wittrock, M. C. (1996). Problem-solving transfer. Dans D. C. Berliner et R. C. Calfee (dir.), *Handbook of educational psychology* (p. 47-62). New York : Simon & Schuster Macmillan.
- Meisner, G. et Hoffman, H. (2005). Virtual interactive laboratories and e-learning. Dans G. Richards (dir.), *Proceedings of world conference on E-learning in corporate, government, healthcare, and higher education 2005* (p. 120-127). Chesapeake, VA : AACE.
- Meyor, C. (2006). Mise en scène de la subjectivité dans un contexte académique : de la vue de l'esprit au regard. *Collection du Cirp*, 2, 41-60 : http://www.cirp.uqam.ca/diffusion_collection_vol2.php
- Meyor, C. et Couture, M. (2007). Conception et expérimentation pédagogique de simulations informatiques adisciplinaires. Dans *Actes du congrès Actualité de la recherche en éducation et en formation (AREF) 2007* : http://www.congresintaref.org/index.php?cont_id=8

- Morin, E. (1992). *La méthode – 3. La connaissance de la connaissance*. Paris : Seuil.
- Nadeau, R. et Désautels, J. (1984). *Épistémologie et didactique des sciences*. Ottawa : Conseil des sciences du Canada.
- Reid, D. J., Zhang, J. et Chen, Q. (2003). Supporting scientific discovery learning in a simulation environment. *Journal of Computer Assisted Learning*, 19(1), 9-20.
- Rendas, A., Rosado Pinto, P. et Gamboa, T. (1999). A computer simulation designed for problem-based learning. *Medical Education*, 33(1), 47-54.
- Rieber, L. P. (2002). Supporting discovery-based learning with simulations. Dans R. Ploetzner (dir.), *Proceedings of the international workshop on dynamic visualizations and learning*. Tübingen, Knowledge Media Research Center.
- Rieber, L. P. (2004). Microworlds. Dans D. H. Jonassen (dir.), *Handbook of research on educational communications and technology* (2^e éd., p. 583-603). Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Rieber, L. P. (2005). Multimedia learning in games, simulations, and microworlds. Dans R. E. Mayer (dir.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (p. 549-567). New York : Cambridge University Press.
- Rivers, R. H. et Vockell, E. (1987). Computer simulations to stimulate scientific problem solving. *Journal of Research in Science Teaching*, 24, 403-415.
- Rouse, W. B., Rouse, S. H., Hunt, R. M., Johnson, W. B. et Pelligrino S. J. (1980). *Human decision-making in computer-aided fault diagnosis* (Technical Report 434). Alexandria, VA : US Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Sauvé, L., Renaud, L., Kaufman, D. et Marquis, J. S. (2007). Distinguishing between games and simulations: A systematic review. *Educational Technology & Society*, 10(3), 247-256.
- Soderberg, P. et Price, F. (2003). An examination of problem-based teaching and learning in population genetics and evolution using EVOLVE, a computer simulation. *International Journal of Science Education*, 25(1), 35-55.
- Tennyson, R. D. et Breuer, K. (2002). Improving problem solving and creativity through use of complex-dynamic simulations. *Computers in Human Behavior*, 18(6), 650-668.
- van Joolingen, W. R., de Jong, T. et Dimitrakopoulos, A. (2007). Issues in computer supported inquiry learning in science. *Journal of Computer Assisted Learning*, 23, 111-120.
- Vogel, J. J., Vogel, D. S., Cannon-Bowers, J., Bowers, C. A., Muse, K. et Wright, M. (2006). Computer gaming and interactive simulations for learning: A meta-analysis. *Journal of Educational Computing Research*, 34(3), 229-243.
- White, B. Y. (1993). ThinkerTools: Causal models, conceptual change, and science education. *Cognition and Instruction*, 10(1), 1-100.
- Windschitl, M. et Andre, T. (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), 145-160.