



Titre: Analyse, correction et évaluation de simulations éducatives pour
l'enseignement des sciences

Auteur: Fabien Coutant

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Coutant, F. (2007). Analyse, correction et évaluation de simulations éducatives
pour l'enseignement des sciences [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/8041/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8041/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Jean-Marc Robert, & Marc Laforest
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ANALYSE, CORRECTION ET ÉVALUATION DE SIMULATIONS ÉDUCATIVES POUR
L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

FABIEN COUTANT

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

AOÛT 2007

© Fabien Coutant, 2007.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-35672-2

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-35672-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

ANALYSE, CORRECTION ET ÉVALUATION DE SIMULATIONS ÉDUCATIVES POUR
L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES

présenté par : COUTANT Fabien
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès Sciences Appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. LABIB Richard, Ph.D., président
M. ROBERT Jean-Marc, doctorat, membre et directeur de recherche
M. LAFORÉST Marc, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. VIENS Jacques, Ph.D., membre

À mes parents

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur et mon codirecteur de recherche qui m'ont permis d'entreprendre ce projet. Je remercie très vivement mon codirecteur Marc Laforest pour son soutien, sa gentillesse, son sens du travail, et tous les efforts qu'il a fournis pour que ce travail progresse. Mes pensées vont aussi vers mon directeur Jean-Marc Robert qui a su me guider tout au long de ce projet et me fournir un cadre de travail idéal. Je remercie vivement les membres de mon jury M. Viens et M. Labib qui m'ont fourni des corrections judicieuses et des commentaires encourageants.

Chers collègues de la MATI, Gracia, Josée, Yan, Marianne, Stéphane et particulièrement Odile, je tiens à vous manifester mon amitié pour votre support pendant ce travail de maîtrise. J'adresse également de vifs remerciements outre-Atlantique à M. Rembowski et à Mme Dutertre, dont la gentillesse exceptionnelle m'a permis de mener à bien mon entreprise.

Un grand merci aussi à Amal, Nancy et Wyatt pour m'avoir écouté, voire supporté, à Sébastien, Alexandre, Sylvain et Laurent, et à toute l'équipe de Tapis Rouge.

Merci à tous ceux qui sont restés proches lorsque j'étais loin.

Enfin, un grand merci à mes parents et mes sœurs pour leur soutien indéfectible et infiniment précieux dans tout ce que je fais.

RÉSUMÉ

Après le succès d'outils d'expérimentation génériques comme Maple™, Matlab™ ou PSpice™, les professeurs se tournent vers les simulations qui sont des programmes beaucoup plus ciblés. Cependant, il semble qu'ils disposent de peu d'aide pour concevoir de tels outils, et que les résultats ne soient pas toujours à la hauteur des potentiels espérés. C'est ainsi que nous nous sommes proposés comme objectif général d'effectuer une recherche exploratoire sur la conception et l'amélioration de simulations éducatives de qualité. Nous nous sommes limités aux simulations destinées à l'enseignement des sciences aux niveaux secondaire, collégial et universitaire, disponibles sur l'Internet et ciblées. Le guide que nous avons conçu est destiné à des professeurs non spécialistes en programmation ou en ergonomie, disposant de ressources temporelles et humaines limitées.

Nous avons d'abord examiné dans la littérature si les simulations avaient un réel potentiel pour une utilisation pédagogique, et analysé les travaux existants susceptibles d'aider les professeurs à concevoir ou réviser des simulations. Dans un deuxième temps, nous avons conduit une étude empirique afin de recenser les problèmes existants. À partir de ces observations, nous avons ensuite élaboré une stratégie de conception et d'amélioration de simulations. Pour compléter notre étude, nous avons cherché à valider notre guide lors d'une étude expérimentale.

L'analyse des travaux existants révèle un enthousiasme certain au sujet du potentiel d'utilisation des simulations dans un contexte éducatif. De nombreux avantages leur sont reconnus, que ce soit pour l'apprenant, le contenu ou le contexte d'apprentissage. Quelques limites sont parfois relevées. En revanche, les études pratiques d'impact mettent en évidence des apports moins évidents, parfois décevants pour leurs auteurs. Nous n'avons pu trouver d'ouvrages à disposition des professeurs satisfaisants pour la conception de simulations. Les travaux techno-pédagogiques généraux manquent de précision et pèchent par leur lourdeur ; les ouvrages ergonomiques sont trop

spécialisés et ne sont pas adaptés ; tandis que les rares critères de qualité pour les simulations éducatives ne sont pas assez précis, concrets, ou justifiés.

Afin de compléter ce point de vue théorique, nous avons conduit une analyse empirique sur 150 simulations sélectionnées au hasard sur l'Internet à partir d'un bassin initial de plus de 1000 simulations. Le but fut d'examiner leurs caractéristiques, leurs défauts éventuels, ainsi que les pratiques de leurs auteurs. Nous avons constaté que le paysage des simulations était très hétérogène, que chaque auteur concevait ses outils sans que de bonnes pratiques fussent connues et reprises. De plus, nous avons observé que les simulations n'étaient pas suffisamment conçues comme des activités pédagogiques à part entière, que l'utilisateur n'était pas assez pris en considération dans la conception, ce qui entraînait des interfaces peu efficaces, en plus de problèmes ergonomiques récurrents.

Munis de ces éléments, nous avons élaboré une stratégie pour aider les professeurs à concevoir ou corriger une simulation. Dans le premier cas, elle va leur donner des indications pour aider à concevoir une maquette papier, tandis que dans le second cas, elle leur indiquera des changements qui peuvent être opérés pour améliorer la simulation existante. Le guide que nous avons conçu commence par une analyse suivie d'une typologie puis de recommandations.

L'analyse consiste en un ensemble de grilles que l'auteur remplit et qui lui permettent de prendre conscience et de préciser ses choix, de mettre en évidence d'éventuelles incohérences, et de replacer l'utilisateur final au centre des interrogations. L'analyse est découpée en trois volets interdépendants : le premier volet, dit fonctionnel, analyse la simulation comme un algorithme et décrit ses fonctionnalités brutes. Le deuxième volet, pédagogique, permet de mieux connaître l'utilisateur cible de la simulation et met en exergue où se situe l'apprentissage qu'elle permet. Le troisième volet, cognitif, analyse la manière dont l'information est représentée et comment l'utilisateur peut la percevoir. Cette dernière partie s'attache à comprendre comment les différentes interactions de l'utilisateur lui permettront de construire ses connaissances.

La typologie permet de distinguer les simulations selon leur but pédagogique générique. On distingue ainsi le type **visualisation**, dont le concepteur a le but d'enseigner le processus dans sa globalité, le type **équivalence**, dont l'objectif est de montrer la bijection entre deux représentations d'un même élément, le type **dépendance**, qui vise à enseigner comment les paramètres de sortie dépendent des paramètres d'entrée, et enfin le type **processus**, dont les simulations veulent mettre à l'épreuve un processus et montrer son fonctionnement et ses limites.

Les recommandations permettent enfin au concepteur ou au correcteur d'avoir des éléments concrets pour aider à réaliser une maquette papier de la simulation. Les recommandations communes aident le concepteur à choisir des paramètres d'entrée, à organiser le contenu de la page qui contient la simulation, à rédiger une introduction, à choisir comment les calculs vont être effectués, etc. Ensuite, selon le type de la simulation, les recommandations spécifiques donnent au concepteur des conseils plus précis et adaptés. On y indique sur quelle partie de la simulation il est préférable de mettre l'emphase et quelle importance accorder aux différents éléments. Des recommandations sont dispensées pour les symboles, les paramètres, les processus, l'organisation spatiale de la simulation, et les différentes phases de guidage.

Dans une dernière partie, nous avons mené une étude expérimentale afin de vérifier partiellement la pertinence du guide de conception et d'amélioration proposé. Notre hypothèse expérimentale est que les simulations corrigées permettent une manipulation plus satisfaisante pour l'utilisateur, plus efficace, et que les utilisateurs comprennent mieux. Pour cela, nous avons corrigé quatre simulations selon le guide et comparé comment des étudiants utilisaient chacune des versions des simulations. Après que chaque étudiant a utilisé une version de la simulation, nous avons testé leur compréhension puis leur avons soumis un questionnaire de satisfaction. Enfin, nous leur avons montré l'autre version – corrigée ou originale – de la simulation en leur demandant de commenter les différences.

Pour chaque simulation, nous avons effectivement constaté des différences entre les étudiants qui utilisaient la version originale et ceux qui utilisaient la version corrigée.

La satisfaction a cru en moyenne de 20%, et les étudiants ont obtenu de meilleurs résultats (+25%) aux examens de compréhension avec les versions corrigées, et ce, en moins de temps de réflexion (-25%). Leur efficacité a également augmenté car nous avons constaté que pour obtenir ces résultats meilleurs, ils avaient passé 15% de temps en moins sur les simulations, et qu'ils ont effectué 25% moins d'actions par minute.

Ce travail exploratoire nous a permis de dégager d'intéressantes problématiques liées à l'utilisation des simulations pour l'enseignement des sciences. En effet, malgré leur potentiel, leur réalisation est telle que les avantages pratiques ne sont pas aussi probants. En particulier, nous avons vu comment on peut les modifier pour les améliorer de manière significative. Nous avons également mis en évidence qu'il était pertinent de considérer à la fois les aspects fonctionnels, pédagogiques et ergonomiques dans la conception d'une simulation. Des études plus approfondies seront nécessaires pour justifier les différents points du guide et vérifier son impact sur la qualité des simulations.

ABSTRACT

Teachers have had some success with generic experimentation tools like Maple™, Matlab™ and PSpice™ but more recently, there has been a growing interest in simulations as targeted educative software. Unfortunately, there lacks tools to help conceive such simulations, and consequently, the results from using such simulations appear to be uneven. Our goal is to conduct exploratory research on guidelines for the correct design or improvement of educational simulations, specifically in science at the university level. As a convenient constraint, we have further limited our research to online simulations, since these are generally limited in scope and developed by dedicated teachers. The guidelines are intended for teachers with limited resources and limited knowledge of programming and ergonomics.

We began by checking the literature for research confirming the benefits of simulations in pedagogy and then surveyed existing work that proposed guidelines. We then completed an observational study of 150 randomly chosen simulations. From these observations, we were able to construct a guide for the conception and improvement of simulations. To complete our study, we attempted to validate our guidelines with the help of an experimental study.

The literature was quite enthusiastic about the use of simulations in a pedagogical context. Many advantages were found for the learner, the learning content, and the context, while a few limits are described. However, practical impact studies showed less obvious results.

We did not find guidelines for the conception of simulations that were specifically intended for teachers. General techno-pedagogical research was not precise enough and too difficult to implement; ergonomic evaluations were too specific and not well adapted to pedagogical simulations; and the few works on educational simulations lacked precision and justification.

In order to complete the theoretical study, we observed 150 simulations randomly selected from a pool of more than one thousand simulations. Our goal was to catalogue their characteristics, their potential flaws, and to determine how the authors were conceiving their simulations. We observed that the simulations landscape is very heterogeneous; each teacher conceives his simulation without external help. We also noted that those simulations were not built as pedagogical activities on their own, that the final users were not considered enough in the conception process, which lead to ineffective interfaces. We also noted some recurrent ergonomic problems.

With these elements in mind, we developed guidelines to help teachers either to conceive or to correct a simulation. In the first case, it will help them to build a model on paper of their simulation, while in the second case, it will suggest to them specific modifications they can make to the existing simulation. The guide we built starts with an analysis, then gives a typology and finally recommendations.

The analysis step in the guide is a set of tables that the teacher must fill out, thereby allowing him to identify the functional, pedagogical, and visual elements of his simulation. In this context, inconsistencies between the simulation, the knowledge of the users, and the anticipated use of the simulation can be partially highlighted. The functional part of the analysis considers the simulations like a mere algorithm and describes its raw functionalities; the pedagogical part attempts to identify what the students know, don't know and what they are expected to learn. The last part of the analysis focuses on the ergonomics and asks how the elements will be displayed and how they will be perceived. Specifically, this last part attempts to build a consistent model of how interactions with the simulation will allow the user to construct their own knowledge, in light of the results of previous two parts of the analysis.

The typology separates simulations according to their generic pedagogical goal. We differentiate the **visualization** type, whose authors aim at teaching the entire process in an intuitive way. Simulations of the **equivalence** type explain the bijection between two equivalent elements. The **dependency** type aims at teaching how some

parameters depend on other parameters. Finally, simulations of the **process** type intend to show the operation and the limits of a given process.

The common recommendations help the teachers to choose the input parameters, organize the content of the web page, write an introduction, etc. Depending on the type of the simulation, specific recommendations give more precise pieces of advice. They indicate which elements of the simulation are particularly important and worth spending time on. Those recommendations deal with the symbols, the parameters, the processes, the spatial organization of simulation, and the various phases of guidance.

In the final stage of our study, we undertook an experimental study in order to verify the relevance of the guide for the conception and improvement of simulations. Our experimental hypothesis was that the users would be more satisfied, learn more efficiently and learn more, with the help of the corrected simulations. For our experiments, we corrected four simulations according to the guide and compared how students used each version of simulations. After having students use one (randomly chosen) version of the simulation, we asked them about their satisfaction and tested their comprehension. These students were then also presented with the other version (original or corrected) of the simulation and asked to comment.

For each simulation, we indeed noticed differences between the students who used the original version and those who used the corrected version. Satisfaction increased on average by 20%, the students obtained better results (+25%) with the corrected versions at the examinations of comprehension, and answered the question faster (25% less time). Their effectiveness also increased as we pointed out that in addition to these better results, they spent 15% less time on the simulations, and that they carried out 25% less actions per minute.

This exploratory study pointed out a number of interesting problems related to the use of simulation in the teaching of science. Indeed, in spite of their potential we noted that a small number of specific recommendations could have a significant impact and that it was necessary to consider functional, pedagogical and ergonomic aspects in the correct

design of interfaces. Further studies will be required to better justify and quantify the impact of the specific recommendations and typology.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	x
TABLE DES MATIÈRES	xiv
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ANNEXES	xxi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES SIMULATIONS ET LEUR ÉVALUATION.....	3
1.1. Place de la simulation dans l'apprentissage	4
1.1.1 Définitions	4
1.1.2 Les théories de l'apprentissage.....	12
1.1.3 L'apprentissage assisté par ordinateur	17
1.2. Apports et limitations des simulations dans l'enseignement.....	20
1.2.1 Avantages.....	20
1.2.2 Efficacité pratique des simulations	27
1.2.3 Limites dans l'utilisation des simulations	29
1.3. L'évaluation des simulations.....	30
1.3.1 Critères de qualité existants pour les simulations	30
1.3.2 L'inspection ergonomique.....	32
1.3.3 Résumé et adaptation des critères	33

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EMPIRIQUE DES SIMULATIONS EXISTANTES.....	40
2.1. Limites de l'étude	41
2.1.1 Partage sur l'Internet.....	41
2.1.2 Matières	42
2.1.3 Niveaux	43
2.1.4 Étendue de la simulation et temps d'utilisation.....	43
2.2. Méthodologie.....	43
2.2.1 La recherche de simulations.....	43
2.2.2 Sélection de simulations.....	44
2.2.3 Critères.....	44
2.3. Résultats de l'étude empirique	47
2.3.1 Description générale.....	47
2.3.2 Description technique	47
2.3.3 Critères d'accompagnement pédagogique.....	55
2.3.4 Critères ergonomiques	59
2.4. Conclusion	60
CHAPITRE 3 : GUIDE D'AMÉLIORATION ET DE CONCEPTION DES SIMULATIONS	61
3.1. Objectifs et caractéristiques du guide	62
3.1.1 Place de la méthode dans le cycle de conception.....	62
3.1.2 Caractéristiques du guide	63
3.2. Analyse d'une simulation.....	65
3.2.1 Analyse fonctionnelle	65
3.2.2 Analyse pédagogique	68
3.2.3 Analyse ergonomique.....	70
3.3. Recommandations.....	72

3.3.1 Recommandations communes à toutes les simulations	72
3.3.2 Buts pédagogiques génériques.....	77
3.3.3 Recommandations pour chaque type.....	81
3.3.4 Conclusion	85
CHAPITRE 4 : VALIDATION DU GUIDE	86
4.1. Correction des simulations	87
4.1.1 Choix des simulations.....	87
4.1.2 A : Pression cinétique	89
4.1.3 B : Séries de Fourier	93
4.1.4 C : Résonance.....	96
4.1.5 D : Méthode des rectangles	100
4.2. Méthodologie.....	103
4.2.1 Sujets.....	103
4.2.2 Critères d'évaluation.....	103
4.2.3 Protocole	108
4.3. Résultats	113
4.3.1 A : Pression cinétique	114
4.3.2 B : Séries de Fourier	116
4.3.3 C : Résonance.....	118
4.3.4 D : Méthode des rectangles	120
4.3.5 Discussion.....	121
CONCLUSION	125
ANNEXES	133

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Résumé et adaptation des critères de qualité existants	34
Tableau 1.2 : Provenance des critères.....	36
Tableau 2.1 : Critères de l'étude empirique.....	46
Tableau 4.1 : Identification des simulations choisies	88
Tableau 4.2 : Caractéristiques des simulations choisies	88
Tableau 4.3 : Simulation A – Résumé des modifications.....	92
Tableau 4.4 : Simulation B – Résumé des modifications.....	94
Tableau 4.5 : Simulation C – Résumé des modifications	98
Tableau 4.6 : Simulation D – Résumé des modifications.....	103
Tableau 4.7 : Critères de mesure de la satisfaction	104
Tableau 4.8 : Critères de mesure de l'efficacité.....	106
Tableau 4.9 : Critères de mesure de la compréhension.....	107
Tableau 4.10 : Séquences de tests	111
Tableau 4.11 : Caractéristiques des séquences de test.....	112
Tableau 4.12 : Présentation des tableaux.....	114
Tableau 4.13 : Simulation A – Satisfaction.....	114
Tableau 4.14 : Simulation A - Efficacité.....	115
Tableau 4.15 : Simulation A – Compréhension.....	115
Tableau 4.16 : Simulation B – Satisfaction.....	116
Tableau 4.17 : Simulation B – Efficacité.....	116
Tableau 4.18 : Simulation B – Compréhension.....	117
Tableau 4.19 : Simulation C – Satisfaction	118
Tableau 4.20 : Simulation C - Efficacité.....	118
Tableau 4.21 : Simulation C – Compréhension	119
Tableau 4.22 : Simulation D - Satisfaction	120
Tableau 4.23 : Simulation D - Efficacité	120

Tableau 4.24 : Simulation D - Compréhension	121
---	-----

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Simulation de flux de piétons dans une station de métro	5
Figure 1.2 : Simulation d'un circuit oscillant	10
Figure 1.3 : Simulation sur l'intégration par sommes de Riemann	11
Figure 1.4 : Comparaison entre la théorie atomique et les théories de l'apprentissage	17
Figure 1.5 : Gravitlab, simulation en physique astronomique	24
Figure 2.1 : Langages de programmation utilisés	48
Figure 2.2 : Structure des écrans des simulations.....	53
Figure 2.3 : Nombre de zones présentes dans les simulations.....	53
Figure 2.4 : Présence de guidage dans les simulations	55
Figure 3.1 : Conception d'une simulation	62
Figure 3.2 : Utilisation d'une simulation existante	63
Figure 3.3 : Simulation traitant des différences entre médiane et moyenne.....	74
Figure 3.4 : Description d'une simulation en une fonction simple	78
Figure 3.5 : Illustration du type Visualisation.....	79
Figure 3.6 : Illustration du type Équivalence	79
Figure 3.7 : Illustration du type Dépendance	80
Figure 3.8 : Illustration du type Processus	80
Figure 4.1 : Simulation A – Pression originale	91
Figure 4.2 : Simulation A' – Pression corrigée	92
Figure 4.3 : Simulation B – Fourier originale.....	95
Figure 4.4 : Simulation B' – Fourier corrigée.....	95
Figure 4.5 : Simulation C - Résonance originale.....	99
Figure 4.6 : Simulation C' - Résonance corrigée	99
Figure 4.7 : Simulation D –Méthode des rectangles originale.....	102
Figure 4.8 : Simulation D' –Méthode des rectangles corrigée.....	102

Figure 4.9 : Page Internet présentée au sujet.....	109
--	-----

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : SIMULATIONS DE L'ÉTUDE EMPIRIQUE	133
ANNEXE 2 : ANALYSE DES SIMULATIONS	139
ANNEXE 3 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DE PARTICIPATION	151
ANNEXE 4 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT POUR LE DROIT A L'IMAGE.....	152
ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRES.....	153
ANNEXE 6 : GUIDE DE CONCEPTION ET D'AMÉLIORATION DES SIMULATIONS.....	157

INTRODUCTION

L'utilisation de l'informatique dans le domaine de l'éducation et de la formation peut consister, comme c'est souvent le cas, à la transposition d'un matériel déjà existant vers un support numérique. Dans ces conditions, l'ordinateur ne constitue qu'un médium, alors qu'il peut prendre une part plus active dans la formation. Avec un nombre croissant d'apprenants ayant accès à l'Internet et la présence d'outils grand public de développement informatique, on assiste à une augmentation du nombre de programmes informatiques de simulation créés par les professeurs. Ainsi, après le succès d'outils génériques comme Maple™, Matlab™ ou PSpice™, on s'intéresse de plus en plus aux simulations éducatives, qui sont plus ciblées. On les trouve en nombre croissant sur l'Internet et les éditeurs commencent à intégrer de tels outils dans leurs ouvrages.

Cependant, il n'existe pas de méthode reconnue qui permettrait aux professeurs de concevoir ou d'évaluer des simulations. Il n'y a notamment pas de caractérisation, de classification, ni de critères de qualité. De plus, les simulations sont encore réservées à des professeurs motivés ayant de très bonnes connaissances de l'informatique et de la programmation.

Dans ce contexte, ce travail de recherche se propose d'explorer le domaine afin de dégager les problématiques liées à l'usage des simulations dans un contexte pédagogique. Nous nous intéresserons particulièrement à la conception de simulations par les professeurs, avec un accent particulier sur la conception des interfaces des simulations. Il s'agira donc de rassembler des connaissances techniques, pédagogiques et ergonomiques et de les adapter à la spécificité du cas.

Pour ce faire, nous allons commencer par analyser les travaux précédents dans le domaine des simulations et des interfaces humain-machine. Ensuite, nous présenterons les résultats d'une étude empirique destinée à rendre compte de l'état de

la production actuelle. Le troisième chapitre exposera le guide que nous proposons, qui sera ensuite mis à l'essai dans le dernier chapitre.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE SUR LES SIMULATIONS ET LEUR ÉVALUATION

Ce premier chapitre nous permettra de dresser un état de l'art des connaissances actuelles dans les domaines impliqués dans ce travail, c'est-à-dire ceux des simulations en général, de l'apprentissage par ordinateur, des théories de l'apprentissage ainsi que des critères existants dans l'évaluation des simulations.

Tout d'abord, nous chercherons à définir ce qu'est une simulation. Puis nous nous orienterons vers les problématiques de l'apprentissage, dont nous commencerons par exposer les différentes théories. Le rôle de l'ordinateur dans l'apprentissage sera également explicité d'un point de vue théorique.

Dans une deuxième section seront abordés les différents apports et limitations liés à l'utilisation des simulations. Les apports théoriques autant que pratiques seront abordés.

La dernière section verra l'exposé des techniques d'évaluation qui peuvent être appliquées aux simulations, plus particulièrement dans le domaine de l'ergonomie. Nous verrons ainsi quels critères de qualité ont déjà été développés pour les simulations et en exposerons un résumé.

1.1. Place de la simulation dans l'apprentissage

Le but est ici de replacer les simulations dans un contexte plus large. Cette exploration nous permettra de mieux appréhender leurs forces et limites par rapport aux autres moyens d'apprentissage.

Après les définitions des termes centraux, nous allons décrire les différentes théories sur l'apprentissage qui ont été développées afin d'en comprendre les enjeux. En particulier, nous verrons comment l'utilisation des simulations s'accorde particulièrement bien avec le courant de pensée du constructivisme. Nous allons ensuite replacer l'utilisation des simulations dans le contexte de l'utilisation de l'outil informatique pour l'apprentissage.

1.1.1 Définitions

Pour commencer, nous allons définir ce qu'est une simulation en général, puis une simulation éducative. Quelques termes proches seront expliqués, puis nous serons alors en mesure d'identifier le périmètre du projet et de donner des exemples des simulations éducatives qui nous intéressent.

1.1.1.1. Les simulations

Dans le sens général technologique du terme, le Trésor de la Langue Française nous donne la définition suivante : "Reproduction artificielle du fonctionnement d'un appareil, d'une machine, d'un système, d'un phénomène, à l'aide d'une maquette ou d'un programme informatique, à des fins d'étude, de démonstration ou d'explication."

Par exemple, on peut utiliser des simulations pour essayer de prévoir la dispersion dans l'air d'un polluant, pour effectuer des tests lors de la conception de systèmes complexes, pour trouver des formes d'isolateurs sonores le long de tronçons de voies routières rapides, ou bien encore pour entraîner des pilotes. La figure suivante montre l'exemple d'une simulation de piétons dans une station de métro. Il y est simulé le

comportement des usagers d'un métro à leur arrivée dans la station, leur occupation des bancs, leur entrée et leur sortie d'un train. Elle permet ainsi de prévoir les circulations qui peuvent avoir lieu dans une station.

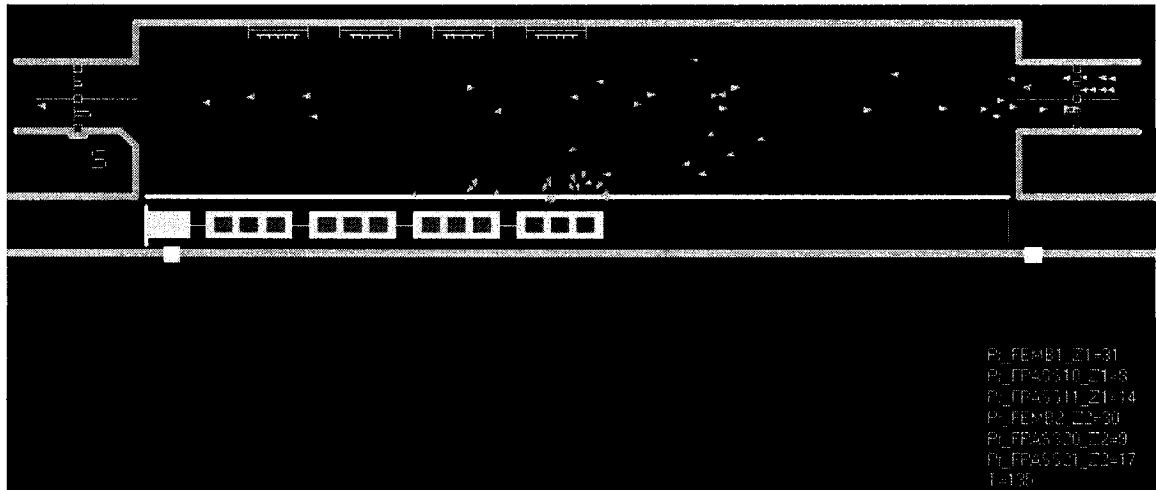


Figure 1.1 : Simulation de flux de piétons dans une station de métro¹

On distingue plusieurs critères qui permettent de différencier des simulations dans le sens général du terme. Ces caractéristiques typiques sont les suivantes :

- Simulations continues : Ces simulations reposent généralement sur la résolution numérique d'équations différentielles et leur déroulement se fait continuellement, par l'incrément d'un pas de temps. Par exemple, la simulation d'un écoulement de liquide pour lequel l'utilisateur veut voir les variations de pression sur les tuyaux fait partie de cette catégorie.
- Simulations discrètes : Le comportement de celles-ci est régi par des évènements qui surviennent et en modifient l'état courant. Dans ces simulations, les paramètres d'intérêt pour l'observation sont des évènements

¹ http://xindep.com/page_1150693092218.html

discrets, comme par exemple l'état d'un client qui attend dans une file d'attente simulée.

- Simulations combinées : Ce cas là combine les deux approches précédentes et propose une approche mixte entre l'observation de variables continues et discrètes.
- Simulations distribuées : Cela se dit d'une simulation dont les calculs sont faits de manière distribuée sur plusieurs ordinateurs. Citons également les projets de type Fight AIDS @Home², qui consistent à utiliser les capacités de calcul inutilisées des ordinateurs personnels. Lorsque l'utilisateur n'utilise pas son ordinateur, des portions de calculs complexes sont lancés, les résultats étant ensuite envoyés par l'Internet et regroupés avec ceux des autres utilisateurs. Dans le cas du projet Fight AIDS @ Home, il s'agit de calcul de simulation biologique visant à trouver des nouvelles médications contre le Sida.
- Simulations ludiques : Ce type de simulation a un but de divertissement. Tels Sim City³ ou Flight Simulator⁴, la représentation et l'interaction sont au cœur de ces simulations.
- Simulations avec matériel dans la boucle : Ces simulations font intervenir du matériel, ceci généralement à des fins de test. Ainsi, on peut par exemple tester la résistance d'une porte de voiture après un grand nombre d'ouvertures et fermetures.
- Simulations avec logiciel dans la boucle : Ce type est semblable au précédent. Cependant, c'est un logiciel qui est au centre de la simulation. Ces simulations permettent par exemple de tester la robustesse de logiciels.

² <http://fightaidsathome.scripps.edu>

³ <http://simcity.ea.com/>

⁴ <http://www.microsoft.com/games/flightsimulatorx/>

- Simulations avec humain dans la boucle : Dans ces outils, des opérateurs humains utilisent des systèmes simulés, à des fins de test de ces systèmes, ou d'entraînement. Typiquement, il s'agit par exemple de simulateurs de vol dans lesquels les pilotes se forment.
- Simulations Monte-Carlo : Les simulations Monte Carlo permettent de simuler la réponse d'un système lorsqu'il y a une incertitude sur les entrées, et d'obtenir ainsi une approximation probabiliste de la réponse. On utilise cette approche notamment dans la finance pour chiffrer des prévisions alors que les entrées sont des approximations.

1.1.1.2. Les simulations éducatives

Shannon en 1975 et Dennis en 1979 donnent deux définitions particulièrement éclairantes sur ce qu'est une simulation éducative. Shannon (1975) la définit comme le modèle d'un système existant sur lequel on conduit des expériences, pour mieux le comprendre ou tester différentes stratégies pour opérer ce système. Les simulations diminuent la complexité de la réalité en omettant certains détails, afin de permettre une focalisation sur un élément d'apprentissage. Dennis (1979) souligne que dans ce monde simplifié, les étudiants résolvent des problèmes, apprennent des procédures, sont amenés à comprendre les caractéristiques d'un phénomène et comment les contrôler, et apprennent quelles actions fonctionnent dans différentes situations.

Nous pouvons donc définir les simulations éducatives comme des représentations interactives de phénomènes, qui permettent à l'utilisateur d'expérimenter par lui-même, de développer une compréhension du phénomène et d'en intégrer un modèle dans ses connaissances.

Dans ce cadre, nous pouvons considérer que le jeu de Go, utilisé au Japon jusqu'en 1600 dans les écoles militaires, était une simulation éducative. Les bonzes puis les

samouraïs y voyaient une modélisation des stratégies militaires, et les utilisaient pour s'entraîner.

1.1.1.3. Termes connexes

On retrouve parfois aussi l'expression de "micromonde". Celle-ci désigne un environnement informatique dans lequel l'apprenant jouit d'une très grande liberté pour construire ses connaissances. Les micromondes sont historiquement liés au développement de la tortue du langage Logo⁵ et à la réflexion sur les méthodes dites de pédagogie active. Nombre de simulations peuvent être considérées comme des micromondes; cependant, certaines, très guidées et procédurales peuvent être contraires à la conception de micromonde. Ainsi, malgré de fortes similarités, les deux mots désignent des concepts différents.

Le terme "applet" désigne la technologie qui consiste à faire s'exécuter une application dans un navigateur Internet. Littéralement, il s'agit d'une petite (suffixe -let) application (préfixe app-). Les simulations étant très souvent conçues sous forme d'applet, on peut confondre simulations et applets. Cependant quelques simulations ne sont pas réalisées sous forme d'applets, ont besoin d'être téléchargées et exécutées, tandis que les simulations ne sont qu'une portion minime des applets existants.

À partir du mot applet, le nom "Physlet"⁶ a été créé et désigne une simulation réalisée à partir d'une bibliothèque d'objets standards conçus par le professeur Wolfgang Christian de l'université de Davidson de Caroline du Nord. Il a réalisé des objets tels des ressorts, des particules, des boîtes, des graphiques, etc. qu'un concepteur de simulation peut utiliser en programmant directement en html, ce qui lui permet d'avoir une approche de plus haut niveau. Le terme Physlet est une marque déposée

⁵ [http://fr.wikipedia.org/wiki/Logo_\(langage\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Logo_(langage))

⁶ <http://webphysics.davidson.edu/Applets/Applets.html>

par son auteur, libre d'utilisation non commerciale, et le moteur de recherche NatSim⁷ annonce disposer de plus de 4500 physlets.

Enfin, le terme "mathlet" désigne une simulation quelconque en sciences mathématiques réalisée sous forme d'applet.

1.1.1.4. Définition du périmètre du projet

Nous nous pencherons dans ce travail sur l'acception moderne et très utilisée des simulations éducatives, c'est-à-dire les **simulations éducatives informatiques disponibles sur Internet**. Nous nous concentrons sur l'amélioration des simulations **conçues par des professeurs**, dans le domaine des **sciences**, et aux niveaux secondaire, collégial et universitaire. Afin d'illustrer notre propos, voici deux simulations typiques du périmètre que nous avons choisi.

La simulation suivante représente un circuit électromagnétique oscillant. L'apprenant peut ici modifier les caractéristiques des éléments du circuit et en voir l'effet sur les oscillations. Une animation sur le circuit jointe à un graphique permet de comprendre le phénomène de manière visuelle.

⁷ <http://natsim.net/cgi-bin/ps/search.pl>

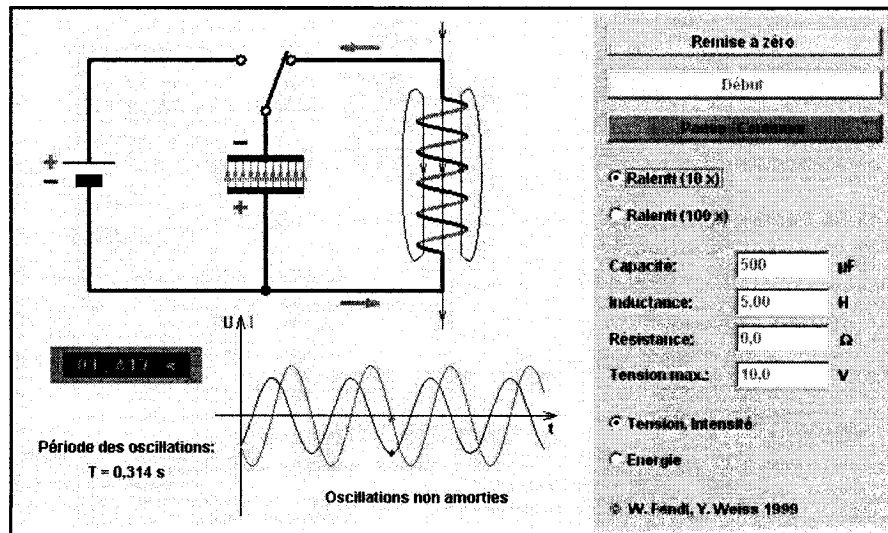


Figure 1.2 : Simulation d'un circuit oscillant⁸

Cette seconde simulation dans le domaine des mathématiques présente l'approximation de l'intégrale d'une fonction par les sommes de Riemann. On trouve les mêmes éléments que précédemment. Dans cette simulation, l'utilisateur peut choisir une fonction grâce à la liste déroulante ou en saisir une nouvelle. Il peut aussi modifier les paramètres de l'approximation et, simultanément, la courbe se modifie et le résultat s'affiche.

⁸ <http://labo.ntic.org/ph11f/osccirc f.html>

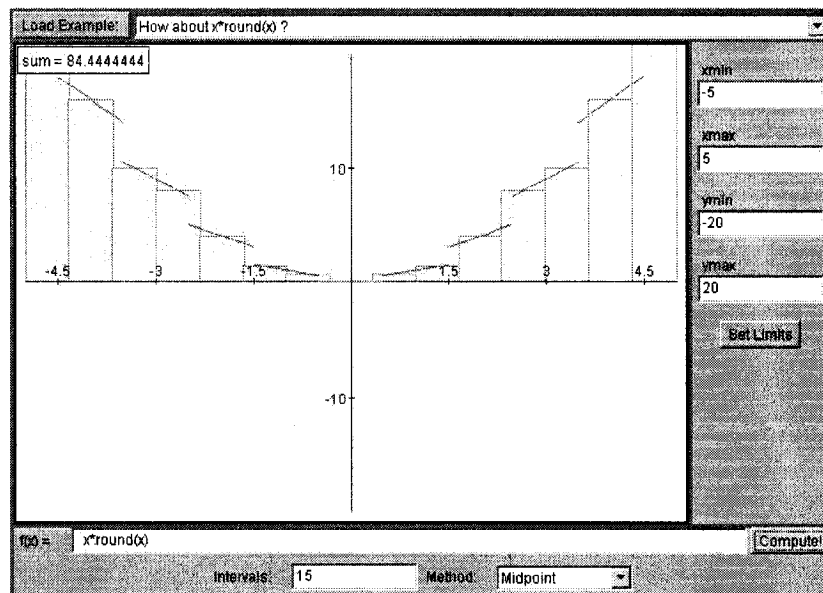


Figure 1.3 : Simulation sur l'intégration par sommes de Riemann⁹

Ces simulations se trouvent facilement sur l'Internet grâce aux moteurs de recherche publics. De nombreuses simulations sont répertoriées dans des banques de simulations telles "*Cut the knot*"¹⁰, "*Copains*"¹¹ ou encore les "*Physlets*"¹². Les professeurs déposent aussi souvent les simulations qu'ils créent sur leur site personnel, ou le site du cours. Nous avons par exemple les sites des professeurs Paul Falstad¹³, Jean-Jacques Rousseau¹⁴, Erik Neumann¹⁵ ou Guy Marion¹⁶. Enfin, il existe aussi des projets de recherche, des regroupements d'experts qui créent ou regroupent

⁹ <http://www.slu.edu/classes/maymk/Applets/Riemann.html>

¹⁰ <http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/index.shtml>

¹¹ <http://www.telelearning-pds.org/copains/math.html>

¹² http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources

¹³ <http://www.falstad.com/mathphysics.html>

¹⁴ <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/index.html>

¹⁵ <http://www.myphysicslab.com>

¹⁶ <http://abcmaths.free.fr>

des simulations et les mettent gratuitement à disposition. C'est le cas de la "*National Library of Virtual Manipulatives*"¹⁷ ou de "*Le portail des Tic*"¹⁸.

1.1.2 Les théories de l'apprentissage

Afin d'être en mesure de comprendre les enjeux de l'intégration des simulations dans l'apprentissage, nous exposons ici les problématiques liées à l'apprentissage. Nous avons retenu trois courants majeurs de la pensée moderne : le béhaviorisme, le cognitivisme et le constructivisme.

1.1.2.1. Le béhaviorisme

Le béhaviorisme en tant que théorie d'apprentissage, peut trouver ses racines dès Aristote. Dans ses essais "mémoires", il s'était concentré sur les associations que l'esprit pouvait faire entre des événements, tels que l'association de l'éclair et du tonnerre par exemple. La théorie du béhaviorisme voit l'esprit comme une boîte noire, dans le sens où seuls importent les stimuli et les réponses. L'important est donc de pouvoir mesurer les stimuli et les réponses associées, afin de pouvoir ensuite reproduire les schémas observés jusqu'à l'apprentissage des notions.

L'expérience la plus connue de Pavlov, un célèbre tenant du béhaviorisme, est celle qu'il mena sur des chiens au début des années 1890. Il remarqua que la présentation de nourriture les faisait saliver, et qu'un son de cloche seul n'avait aucun effet sur les quadrupèdes. Après avoir associé la présentation de nourriture avec un son de cloche, il nota que le son de cloche seul pouvait ensuite faire saliver le chien. Ainsi, le chien a "appris" un comportement lors de cette phase appelée phase de conditionnement.

John B. Watson fut le premier à utiliser les découvertes de Pavlov dans des études sur l'apprentissage humain vers 1920. Il fit la démonstration de conditionnement classique

¹⁷ http://enlvm.usu.edu/ma/nav/bb_dlib.jsp

¹⁸ <http://labo.ntic.org/mnumathprob.html>

sur son jeune enfant, au début insensible aux rats, qu'il conditionna à avoir peur des rats et cette peur fut spontanément généralisée à d'autres animaux de petite taille ou à poils ou texture blanche. À Watson est associé le terme "béhaviorisme", aussi dit "comportementalisme". Son article "Psychology as the behaviorist views it" (Watson, 1919) est considéré comme un manifeste du béhaviorisme. Skinner introduit pour sa part une autre forme de conditionnement, cette fois-ci sur des sujets volontaires; il s'agit du conditionnement opérant (Skinner, 1968). Il s'agit d'adaptation naturelle entre le comportement et le milieu. Le sujet aura tendance à répéter de manière instinctive les comportements qui amènent une réponse positive du milieu. Les travaux de Skinner ont débouché sur une application sur le plan éducatif, qu'on appelle l'enseignement programmé. Un dispositif présente des informations et les réponses de l'élève influencent la présentation des informations suivantes (Crowder, 1959). Des renforcements positifs ou négatifs sont donnés selon les réponses et on espère qu'ils vont conditionner naturellement l'apprenant.

1.1.2.2. Le cognitivisme

Dans le début des années 20, des limitations de l'approche comportementaliste furent mises en évidence. Certains comportements sociaux restaient inexpliqués; et ne pouvait en tout cas se contenter de voir la cognition humaine comme une boîte noire. Par exemple, on constata que des enfants n'imitaient pas forcément les comportements pour lesquels ils avaient été conditionnés, et pouvaient également intégrer de nouveaux comportements sans y avoir été conditionnés. Forts de ces mises en doute, Bandura et Walter construisirent la théorie du cognitivisme social (Bandura et Walters, 1963). Leur thèse est que les individus développent leurs comportements en observant leur environnement, de manière propre à leur activité mentale.

Contrairement aux behavioristes qui ne prennent en compte que des éléments externes, les cognitivistes vont vouloir décrire et analyser les processus cognitifs arguant que les attitudes et les perceptions de l'individu influencent l'apprentissage. Les cognitivistes soutiennent que le transfert des connaissances est déterminé par des

phénomènes internes à l'apprenant, et en partie par la décontextualisation réalisée pendant l'apprentissage (Phye, Gary D., Andre and Thomas, 1986). On voit donc que le centre d'intérêt des cognitivistes est l'étude du traitement de l'information. Ils suggèrent donc que les méthodes pédagogiques mettent l'accent sur le développement de stratégies cognitives individuelles. Ceci peut se faire au moyen d'utilisation de connaissances et d'habiletés acquises dans une variété de situations. Ils soutiennent que l'activité mentale est le lieu de réorganisations mentales, lors desquelles les nouvelles connaissances sont intégrées aux acquis antérieurs (Piaget, 1969). Ce processus s'effectue à l'aide des mêmes processus d'encodage, de stockage, de récupération et de métacognition. On voit donc que c'est "l'appareil cognitif" qui est la base du mode de pensée cognitiviste.

1.1.2.3. Les simulations et le constructivisme

La perspective constructiviste de l'apprentissage suggère que la connaissance ne doit pas être reçue de manière passive, qu'elle doit être construite – "built up" (Maher, 1991). Ainsi, dans une approche constructiviste, on veut donner aux étudiants les éléments qui leur permettront de construire, lors d'un processus interne, leurs connaissances. Le principal but est que les étudiants développent des connaissances et des compétences qui sont plus complexes, abstraites et puissantes que celles qu'ils possèdent déjà. Brooks et Brooks ajoutent que puisqu'apprendre est une recherche du sens, tout doit commencer par les questions autour desquelles les étudiants essaient de construire du "sens" (Brooks et Brooks, 1993). Comprendre le sens exige de comprendre l'entier comme ses parties, et ces parties doivent aussi être comprises dans le contexte de l'entier. Par conséquent, l'apprentissage se concentre sur des concepts primaires, non des faits isolés. Il faut de plus comprendre les modèles mentaux que les étudiants emploient pour percevoir le monde, et les hypothèses qu'ils font pour soutenir ces modèles. Le but de l'apprentissage est, pour un individu, de construire sa propre signification, pas simplement d'apprendre par cœur les "bonnes" réponses.

De manière plus concrète, les défenseurs du constructivisme (Anderson, 1996 ; Glatthorn 1994 ; Schulte, 1996) se sont mis d'accord sur les points essentiels suivants :

1. Les professeurs posent des questions ouvertes et laissent du temps pour les réponses.
2. La réflexion de haut niveau est encouragée.
3. Les étudiants sont engagés dans des expériences qui leur font émettre des hypothèses et favorisent la discussion.
4. Les étudiants utilisent des données brutes, des sources primaires, manipulent des éléments physiques et interactifs.
5. Les étudiants apportent leurs habiletés et leurs croyances dans la construction de leur propre connaissance, qui doit être une combinaison des connaissances antérieures, des nouvelles informations et d'une envie d'apprendre.

Ces critères mis en évidence, on se rend compte de la place prépondérante que peut prendre la simulation dans l'apprentissage. Reprenons les points afin d'examiner la cohérence de l'apport des simulations dans un enseignement constructiviste.

De leur proximité avec la réalité, les simulations sont davantage intégrées dans une situation concrète, et non pas extraites de leur environnement habituel, comme cela peut être le cas avec des exercices plus traditionnels. Ainsi, on a un moyen de favoriser la réflexion contextualisée de haut niveau (point 2.) et de ne pas uniquement enseigner des éléments épars, non intégrés.

Les simulations sont les moyens idéaux de réaliser la troisième volonté constructiviste. En effet, les étudiants sont laissés à eux-mêmes lors des simulations et ont loisir d'expérimenter, et pour avancer, doivent formuler des hypothèses, les tester, éventuellement les rejeter. Lors d'une mise en commun, ils peuvent partager leur expérience, et ainsi apprendre quel cheminement pouvait mener au résultat de manière efficace.

Là encore, pour le quatrième point, les simulations donnent une possibilité d'utiliser des données brutes. Souvent, l'expérimentation réelle est impossible par manque de temps ou de moyens, ce qui oblige les enseignants à fournir des contenus pré travaillés qui fonctionnent directement. Avec les simulations, la possibilité est donnée de simuler l'acquisition de données brutes. Par exemple, dans le domaine des probabilités, on peut simuler des tirages de dés par ordinateur, alors que dans un enseignement privé de simulations informatiques, on leur aurait - au mieux - donné un tableau décrivant une séquence de tirage de dés.

L'indépendance relative qu'offrent les manipulations interactives aux étudiants leur permet d'intégrer de nouvelles connaissances à leur univers préexistant (point 5.). Ils ont dû mobiliser lors de la découverte leurs connaissances antérieures, leur intuition, Il faut aussi souligner l'aspect parfois récréatif que peuvent revêtir les simulations, qui peuvent alors exciter la curiosité et la motivation des étudiants.

En conclusion, on voit que les théories ont évolué d'une conception qui ignore la cognition humaine, à un modèle où ces processus cognitifs sont étudiés, mais aussi considérés avec l'influence d'autres facteurs propres à l'apprenant, tels ses connaissances antérieures, ses croyances, etc. Brenda Mergel nous propose une analogie très parlante présentée dans la figure suivante. Elle compare l'évolution de la conception de l'apprentissage à l'évolution des connaissances sur le modèle atomique (Mergel, 1998).

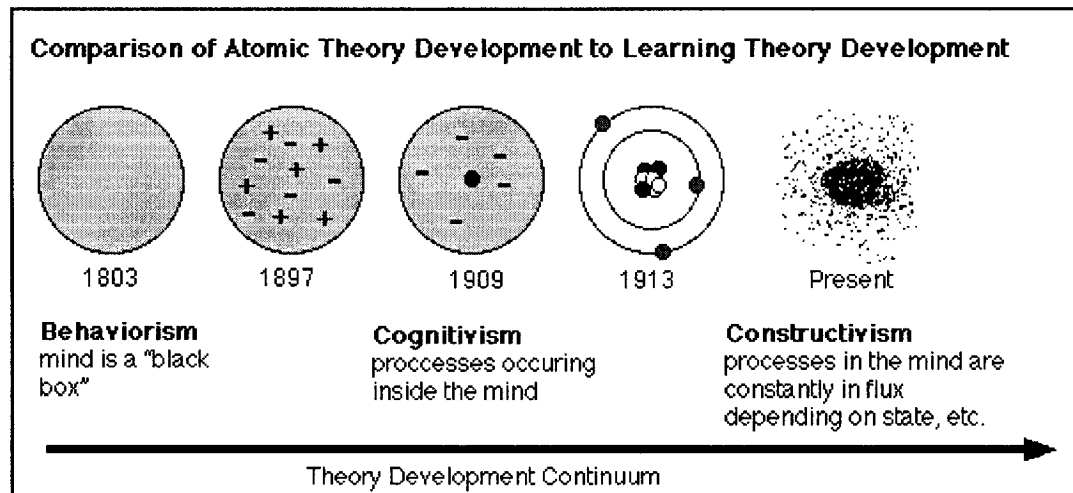


Figure 1.4 : Comparaison entre la théorie atomique et les théories de l'apprentissage

En 1803, Dalton expose une théorie où l'atome est perçu comme élément insécable (d'où le nom d'atome qui lui a été donné). En 1870, Crookes met en évidence l'existence des électrons à l'intérieur des atomes. Puis en 1909, Rutherford découvre que les électrons gravitent autour d'un noyau chargées positivement. Puis dans les années 1940, le modèle quantique est préféré, dans lequel l'électron se situe dans un nuage probabiliste autour du noyau. L'analogie avec successivement, le behaviorisme, le cognitivisme et le constructivisme met en évidence la progression dans la reconnaissance de la complexité des processus d'apprentissage.

1.1.3 L'apprentissage assisté par ordinateur

La simulation est une composante de l'apprentissage assisté par ordinateur (*Computer Assisted Instruction*). Nous allons voir quelle place tiennent les simulations dans ce contexte.

1.1.3.1. Les composantes de l'apprentissage assisté par ordinateur

L'apprentissage assisté par ordinateur inclut les tutoriels, les exercices et les simulations.

Les tutoriels assistés par ordinateur sont des programmes qui fournissent des informations découpées en modules de petites tailles, suivis de tests pour interroger l'apprenant en lui posant des questions, le plus souvent sous forme de questionnaires à choix multiples (QCM). Selon les réponses de l'apprenant, les tutoriels évaluent la compréhension du cours et peuvent renvoyer l'élève à la phase d'apprentissage en revenant à la même leçon, ou en passant à la leçon suivante. Les mécanismes de branchement peuvent aussi être plus complexes.

Les exercices présentent à l'apprenant l'occasion de tester les habiletés qu'il a acquises. Ce type de programme peut adapter les questions et les exercices aux réponses précédemment données par l'étudiant.

Enfin, les simulations, qui nous intéressent ici, sont des modèles informatisés d'un système physique ou théorique - «*computer models of physical or theoretical systems*» (Thomas et Boysen, 1984), comme nous l'avons exposé au chapitre précédent.

1.1.3.2. Les simulations dans l'apprentissage assisté par ordinateur

L'apport de l'apprentissage assisté par ordinateur a été séparé en cinq catégories par Thomas et Boysen (Thomas et Boysen, 1984). Quelques années plus tard, Thomas et Hooper ont enrichi cette catégorisation de définitions et d'exemples (Thomas et Hooper, 1991).

- Expérimenter (*Experiencing*) : On souhaite ici placer l'utilisateur dans un état propice à la découverte. C'est-à-dire qu'on expose le modèle d'un concept que l'apprenant peut manipuler à souhait, afin qu'il en acquiert une compréhension intuitive.
- Informer (*Informing*) : Cette composante revient à permettre à l'étudiant d'obtenir des informations. Ils remplacent donc les ouvrages qui donnent à l'étudiant l'exposé précis d'un sujet. Ces contenus peuvent aussi servir de future référence.
- Renforcer (*Reinforcing*) : Les étudiants peuvent aussi utiliser l'outil informatique pour renforcer leurs connaissances sur des sujets précis. Le

format le plus souvent utilisé est l'exerciseur, dans lesquels des séries de questions sont présentées à l'étudiant.

- Intégrer (*Integrating*): L'apprentissage assisté par ordinateur offre à l'utilisateur l'opportunité d'appliquer dans une nouvelle situation des notions qu'il connaît. Ceci lui permet de connecter des connaissances déjà acquises avec d'autres sujets.
- Utiliser (*Utilizing*) : Une fois que l'étudiant a appris une procédure, il peut souhaiter appliquer l'utilisation de celle-ci. Ainsi, dans les domaines des statistiques, des mathématiques, du génie, ou des affaires, l'étudiant a appris des méthodes, et celles-ci peuvent être mises à l'essai grâce à l'outil informatique.

Nous voyons donc que la simulation peut participer dans plusieurs de ces cinq types d'aides informatisées à l'apprentissage.

Tout d'abord, les simulations offrent aux apprenants une grande liberté et excitent leur motivation devant une situation nouvelle. Elles permettent aussi de replacer des éléments d'apprentissage dans un contexte concret et quotidien, et améliorent la perception que l'étudiant peut en avoir. En cela, elles enrichissent grandement l'expérimentation (*experiencing*) que peuvent effectuer les étudiants.

Les simulations sont en revanche peu recommandées pour aider au deuxième point (*informing*), car elles n'ont pas pour objectif premier de présenter à l'apprenant des informations exhaustives sur un sujet. On leur préférera ici l'emploi de tutoriels, beaucoup plus adaptés. Les simulateurs pourront être intégrés de manière secondaire pour rompre le rythme, et présenter brièvement quelques données.

Les exercices constituent le meilleur moyen de tester ses connaissances pour les renforcer (*reinforcing*). Certaines simulations peuvent cependant être présentées sous forme d'exercices. Elles peuvent en effet proposer une situation déjà un peu

familière, et des objectifs clairs. L'étudiant devra alors mettre en œuvre une méthodologie de résolution de problème pour vérifier qu'elle mène bien au but souhaité.

Comme le soulignent les auteurs, l'aspect d'intégration (*integrating*) peut bénéficier de l'apport des simulations. Ces manipulations sont autant d'occasion de placer l'étudiant devant des situations où les différents concepts s'entremêlent.

Enfin, comme les simulations jouissent des avantages des expérimentations, elles se révèlent idéales pour permettre aux apprenants d'utiliser les concepts qu'ils viennent d'apprendre (*utilizing*). Dans le domaine de l'apprentissage de l'économie par exemple, on peut simuler un système économique complexe dans lequel les étudiants pourront mettre en œuvre les règles qu'ils ont apprises.

1.2. Apports et limitations des simulations dans l'enseignement

Dans cette partie, nous allons commencer par étudier les différents apports théoriques de l'utilisation des simulations dans l'enseignement. Nous allons déterminer quels sont les bénéfices pour l'apprenant, le contenu puis le contexte, en reprenant et adaptant la classification de Roy (2004). Nous nous intéresserons ensuite aux apports pratiques des simulations et à leur limites.

1.2.1 Avantages

1.2.1.1. Avantages pour l'apprenant

▲ *L'apprenant agit directement sur les phénomènes*

Crampton et Smith considèrent que les moyens d'interaction numériques constituent un avantage dans l'utilisation des simulations (Crampton et Smith, 1996). En effet, les apprenants ont à leur disposition des moyens directs de manipuler, et les réponses sont parlantes. Ils soulignent la grande suggestibilité que permettent les simulations sur ordinateur. D'après Paul R Halmos, "I hear, I forget; I see, I remember; I do, I

understand" (Halmos, in Kamthan, 1999), soit "j'entends, j'oublie; je vois, je me souviens; je fais, je comprends".

▲ *L'enseignement peut être personnalisé*

Lorsque l'apprenant utilise une simulation, il est absorbé par sa tâche pour un certain temps. Contrairement à des exposés magistraux qui sont communs à toute la classe, il choisira lui-même le temps qu'il y passera, et les manipulations qu'il fera. De même, si l'enseignant est présent, il pourra l'aider selon l'utilisation qu'il en fait et donner des conseils adaptés (Roschelle, Pea, Hoadley, Gordin et Means, 2000).

▲ *Les réponses sont immédiates*

Des études soutiennent que l'apprentissage est amélioré lorsque la rétroaction, qu'elle soit positive ou négative, vient juste après l'action de l'élève (Roschelle et al., 2000). Or, cela est traditionnellement rarement le cas, et les élèves obtiennent leurs corrections bien après la réalisation de leurs exercices, devoirs ou examens. Il est beaucoup plus effectif de savoir immédiatement comment notre travail a été apprécié. On peut alors se souvenir des détails qui ont conduit à l'obtention de faux résultats, et rectifier le raisonnement. Lorsque le retour a lieu tardivement, ces fausses conceptions ont déjà sédimenté dans la mémoire. Le désapprentissage est alors plus coûteux en termes de charge cognitive de travail.

▲ *La visualisation se fait en temps réel*

Des recherches indiquent que la visualisation instantanée des modèles permet aux apprenants de mieux corriger les leurs (Bowers et Doerr sous presse). Par exemple, des simulations permettent de représenter à la fois le phénomène graphiquement et ses manifestations, comme des courbes ou des données annexes. L'EXaO (EXpérimentation assistée par Ordinateur) permet également de telles visualisations en temps réel. L'avantage est de pouvoir comprendre parallèlement à l'expérimentation les données recueillies, plutôt que d'obtenir des graphiques déconnectés de l'expérience.

▲ ***Des représentations sont associées aux connaissances***

Clements et McMillen ont établi que les représentations autres que verbales sont efficaces et stimulent et augmentent l'activité cérébrale (Clements et McMillen, 1996). Les simulations offrent donc des possibilités intéressantes puisqu'elles se présentent sous des formes visuelles et diverses. Les représentations peuvent être de type graphique (statique ou dynamique), symbolique (des formules), numérique (des données chiffrées), ou naturel (du texte). Chaque représentation est porteuse de sens, et propose des manières différentes d'associer le concept. Ces associations structurent la mémoire, rendent plus efficace la mémorisation et la restitution. Ces diverses représentations d'un même phénomène peuvent de plus être modifiées simultanément, ce qui facilite l'apprentissage des liens entre ces représentations.

▲ ***L'apprenant peut tester ses hypothèses***

Lors de l'utilisation de simulations éducatives, il se peut que l'apprenant ait à construire lui-même ses expériences, à poser ses hypothèses et à les tester. Cela rend l'apprentissage beaucoup plus pertinent, significatif et authentique. Le but est "d'amener les étudiants à formuler des hypothèses (verbalisation et prise de conscience) et à les confronter avec des observations (conflit cognitif) pour les amener à se construire de nouvelles connaissances et donner du sens à ce qu'ils apprennent" (Roy, 2004).

1.2.1.2. Avantages pour le contenu d'apprentissage

▲ ***On peut explorer des concepts plus abstraits***

De nombreuses recherches s'accordent sur l'idée que la simulation permet de saisir des concepts plus abstraits ou encore considérés de plus haut niveau. Cholmsky donne l'exemple des simulations de la banque de simulations payante *Gizmos*¹⁹, qui facilite l'apprentissage de concepts plus abstraits grâce à la visualisation, la manipulation et l'utilisation de symboles (Cholmsky, 2003). Notons aussi l'exemple de Wilensky et

¹⁹ <http://www.explorellearning.com/>

Stroup, qui ont pu aborder le concept de calcul différentiel grâce à leur outil, alors qu'il n'apparaissait que bien plus tard dans le curriculum (Wilensky et Stroup, 2000). Enfin, à l'aide de *SimCalc*²⁰, Bowers et Doerr ont pu introduire les concepts d'aire et de valeur moyenne auprès d'étudiants qui n'étaient pas encore rendus à ces notions (Bowers et Doerr, sous presse).

▲ ***On peut explorer des concepts plus ambitieux***

Avec les simulations, il est possible de proposer à des élèves des concepts totalement novateurs, et ils seront capables d'en développer une bonne compréhension intuitive. En cachant toute la partie théorique, un phénomène normalement complexe peut ainsi apparaître simple. Le proposer sous forme d'une simulation permet donc à l'apprenant d'en développer une compréhension intuitive.

On notera l'exemple assez étonnant de l'utilisation de *Thinker Tools*²¹ en physique qui aurait permis à des élèves du secondaire de démontrer une meilleure compréhension et interprétation des forces agissant sur un objet en mouvement que des élèves de niveau supérieur ayant reçu un enseignement traditionnel (White and Frederiksen, 2000).

▲ ***Des nouveaux types de manipulations sont possibles***

Les simulations, de par leur virtualité, s'affranchissent largement des contraintes de temps, d'espace, de matériel ou de budget. On repousse les limites, en mettant à la portée de l'apprenant le plus grand nombre possible de notions. Par exemple, la recherche atomique et la recherche astronomique peuvent apparaître superfétatoires par rapport aux défis à l'échelle de l'humain. En montrant de manière tangible et manipulable les phénomènes qui se déroulent à d'autres échelles, on élargit les horizons scientifiques de l'apprenant.

²⁰ <http://www.simcalc.umassd.edu/simcalcframe.html>

²¹ Le site <http://thinkertools.soe.berkeley.edu> n'est plus accessible

Notons l'exemple de la simulation *Gravilab*²³ présenté dans la figure suivante, de même que celui relevé par Clements et Sarama qui mentionnent la possibilité de simuler des expériences sur des cellules humaines. Par exemple, une simulation que l'on retrouve sur le site d'Agent *Sheets*²² permet de simuler la prolifération de la bactérie *E. Coli* dans un contexte qui se rapproche du *in vivo*, dans des conditions impossibles à recréer en laboratoire (Clements et Sarama, 2003).

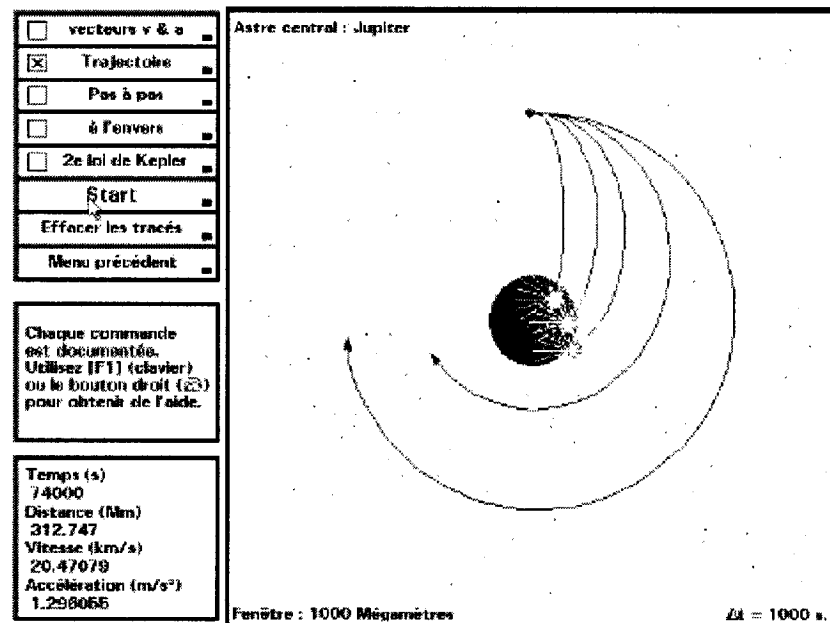


Figure 1.5 : Gravilab, simulation en physique astronomique²³

▲ *Le nombre de manipulations peut être accru*

Les simulations étant caractérisées par des réponses très rapides, l'apprenant peut multiplier les essais sans le découragement qui caractérise la longueur des expérimentations habituelles. En cas d'échec ou de départ dans une direction non

²² <http://www.agentsheets.com/>

²³

http://www.generation5.fr/logiciel_educatif/enseignement_produit.php?id=305&cat=

voulue, l'élève arrête la saisie de données, et peut reprendre l'expérience avec des entrées différentes. Les mêmes expériences réalisées à la main, devraient s'étaler sur plusieurs jours, alors qu'ainsi, elles peuvent être faites dans la même journée (Roschelle et al., 2000).

1.2.1.3. Avantages pour le contexte d'apprentissage

▲ *Le contexte s'apparente à un contexte de recherche*

La tendance observée est à rapprocher l'apprentissage en classe de celui de la recherche en science. Ces changements se concrétisent par des méthodes d'apprentissage qui considèrent comme point de départ la démarche des élèves devant des nouvelles connaissances. Nous aboutissons alors à une situation où l'enseignant accompagne la progression des élèves, et où l'utilisation des simulations aide à opérer le changement.

Ainsi, nous avons les exemples de *BioQUEST*²⁴, qui permet aux étudiants de se familiariser avec les questions inhérentes aux activités de recherche scientifique. Les étudiants réalisent aussi qu'il n'y a pas toujours de bonne ou de mauvaise réponse à un problème et que, parfois, une solution amène un nouveau problème (Roy, 2004). Cette manière d'opérer met l'accent sur l'apprentissage de la découverte scientifique, plutôt que la restitution systématique de résultats appris par cœur.

▲ *L'apprenant devient plus actif*

Dans certaines simulations, l'élève peut aussi être amené à jouer un rôle dans un système complexe. En adossant une autre identité, on le conduit à oublier sa traditionnelle position passive et à devenir acteur dans un monde. De plus, les connaissances qu'il acquiert sont encore plus intégrées dans un contexte, rendant l'apprentissage plus efficace, et la mémorisation plus effective. L'élève est au centre d'un système et apprend de ses interactions, ce qui rajoute une dimension réaliste à la compréhension d'un phénomène scientifique (Wilensky et Stroup, 2000).

²⁴ <http://www.bioquest.org/>

▲ *Le rythme peut être varié*

L'ajout de simulations dans un cours a l'avantage de proposer un moyen de varier le rythme de celui-ci par tous les changements qu'il opère : le type d'activité, les modalités d'interaction avec les objets d'apprentissage, le rôle du professeur changent. Les simulations sont aussi souvent faites de manière à rendre l'apprentissage moins apparent, qui se retrouve masqué par les animations et par la liberté relative des apprenants. Elles peuvent ainsi être utilisées pour accroître le niveau de motivation des apprenants.

▲ *On peut observer les mécanismes d'apprentissage des élèves*

*Fraction Track*²⁵ est une simulation traitant de l'apprentissage des fractions, et fait partie du projet *Illuminations*²⁶ du National Council of Teachers of Mathematics (NCTM). Elle a été utilisée pour observer le développement professionnel des enseignants à travers l'utilisation de cette simulation. Il a été remarqué qu'en regardant les élèves étudier à l'aide des simulations, l'enseignant a été en mesure de se faire une idée plus précise de leur mode de fonctionnement et de leurs stratégies de résolution. Cela a permis à l'enseignant de reconnaître les difficultés de raisonnement des élèves et d'ajuster ses interventions en conséquence (Wetherill, Midgett et McCall, 2002).

Le *Participatory Simulations Project*²⁷ est arrivé à des conclusions semblables. Wilensky et Stroup ont établi que les enseignants qui utilisent des simulations avec leurs élèves prennent conscience des stratégies des élèves, ce qui leur permet d'accompagner leurs élèves vers une meilleure articulation et un raffinement de ses stratégies (Wilensky et Stroup, 2000). *BioLogica*²⁸, entre autres, permet même de savoir dans quel ordre les «écrans» ont été vus et, de là, l'enseignant peut évaluer si

²⁵ <http://standards.nctm.org/document/eexamples/chap5/5.1/index.htm>

²⁶ <http://illuminations.nctm.org/>

²⁷ <http://ccl.northwestern.edu/ps/>

²⁸ <http://biologica.concord.org/>

l'élève a deviné les réponses ou s'il a vraiment compris l'idée évaluée (Horwitz et Tinker, 2001).

▲ *Les élèves réfléchissent sur leur apprentissage*

Clements et McMillen soutiennent que l'utilisation des manipulations prend tout son sens lorsqu'elle amène l'élève à réfléchir sur son processus d'acquisition de connaissances (Clements et McMillen, 1996). Dans certains cas, des outils associés aux simulations permettent de développer explicitement la métacognition de l'élève. Par exemple, *Thinker Tools* déjà mentionné demande régulièrement à l'élève d'indiquer un niveau de satisfaction de son travail. De plus, les apprenants peuvent consulter des outils métacognitifs (le "*Reflector*" et l'"*Advisor*") pour réfléchir sur leur travail. Les élèves sont amenés à réfléchir sur leur propre mode d'acquisition de connaissances ce qui constitue une avancée significative dans leur constitution de méthodes d'apprentissage (White, Frederiksen, Frederiksen, Eslinger, Loper et Collins, 2002). De plus, ces données, communiquées aux professeurs, sont de précieuses indications sur les expériences des élèves. En prenant connaissance de leurs envies et de leur appréciation des méthodes d'apprentissage employées, l'enseignant peut rectifier son enseignement en temps réel.

1.2.2 Efficacité pratique des simulations

Gardner, Simmons et Simmons ont réalisé une étude dans le domaine de l'enseignement de la météorologie. Trois groupes expérimentaux furent constitués : Le premier groupe a reçu un enseignement sans simulation par ordinateur ni manipulation physique, le deuxième un enseignement sans simulation mais avec manipulations physiques, et le troisième enseignement avec simulations et manipulations physiques. Le troisième groupe fut le plus performant, alors que le deuxième groupe fut aussi meilleur que le premier (Gardner, Simmons et Simmons, 1992).

La simulation *Fraction Track* déjà mentionnée a été l'objet d'une expérimentation qui a visé à comparer l'enseignement avec et sans la simulation. Les résultats suggèrent que la compréhension des fractions est grandement améliorée et que l'apprentissage est plus rapide pour les élèves qui utilisent la simulation (Wetherill, Midgett et McCall, 2002).

Une recherche portant sur les simulations de *Connected Mathematics*²⁹ tire la conclusion que l'utilisation de celles-ci a significativement ajouté de la valeur à l'apprentissage (Keller, Wasburn-Moses et Hart, 2002). En effet, les auteurs soulignent que les capacités de visualisation de dessins isométriques par les élèves s'améliorent et que les professeurs sont plus conscients des problématiques d'enseignement.

Une thèse intitulée "A computer tutorial and simulation system for teaching digital function minimization" (Chen F., 1995) propose un tutoriel et une simulation pour enseigner les minimisations de fonctions dans le domaine électronique de la logique booléenne. Cet outil a été testé sur 33 étudiants en deuxième année de baccalauréat d'Iowa State University. Étendue sur quatre semaines, l'étude a commencé par un pré-test, puis huit heures de cours ont suivi pour le groupe de contrôle, tandis que le groupe expérimental avait huit heures de séances d'expérimentation avec la simulation. Finalement, un post test est venu clore l'expérimentation. L'étude des résultats montre qu'il n'y pas de différences significatives entre les résultats des élèves qui ont utilisé l'enseignement avec les simulations, et le groupe de contrôle. En revanche, les étudiants du groupe expérimental n'avaient jamais besoin de la totalité des huit heures d'expérimentation. Le temps passé pour le groupe utilisant les simulations est très significativement inférieur à celui passé pour les cours du groupe de contrôle.

²⁹ <http://connectedmath.msu.edu/>

Une étude menée à l'université Paris VII (Riebman, Joubert et Desmond, 2000) a voulu mesurer l'impact sur les connaissances des élèves, de l'implémentation de simulations dans un cours de physique au niveau universitaire français. Un post test a été effectué sur une classe ayant suivi ces manipulations et sur une autre ayant eu des travaux dirigés traditionnels. En guise de comparaison avec l'état des connaissances des étudiants avant ces enseignements, le même test a été soumis à des étudiants au lycée. Les auteurs ont jugé les résultats pas aussi "impressionnant[s] que prévu", mais ont tout de même relevé une progression dans les connaissances déclaratives.

1.2.3 Limites dans l'utilisation des simulations

Mark note que les simulations, malgré leur volonté d'imiter le réel, omettent nécessairement certains facteurs (Mark, 1982). On court le risque que les étudiants oublient l'existence de ces facteurs annexes. C'est un biais que le concepteur introduit, par ses choix de ce qu'il considère pertinent. Les inconvénients liés à ce biais peuvent être partiellement levés par une documentation précise qui identifie les limites de l'expérience, c'est-à-dire les approximations faites, les modèles utilisés, ou les facteurs ignorés par exemple.

Thomas et Hooper ajoutent que dans certaines situations, l'apport des simulations est incertain, voire nul (Thomas et Hooper, 1991). En effet, lorsque le but est atteint, l'étudiant sait que sa compréhension du système est bonne. Cependant, lorsqu'il ne parvient pas à trouver la solution, il ne peut savoir quels aspects de son modèle du système sont inappropriés.

De plus, dans presque toutes les simulations existantes, il n'existe pas de méthode de retour d'informations qui permettrait à l'élève de comprendre la portée des actions qu'il a entreprises pendant la simulation. Il n'y a pas de véritable fin dans une simulation. L'élève peut la quitter, frustré qu'elle n'ait servi à rien, et qu'aucun retour sur son utilisation globale ne soit proposé.

De plus, l'enseignant peut aussi regretter le manque de retour d'informations sur l'utilisation que font les élèves des simulations. Il ne peut par exemple savoir si les apprenants ont réellement passé un temps suffisant sur les manipulations, s'ils ont effectué toutes les manipulations menant à des résultats intéressants. C'est le défaut apporté par la grande liberté apportée par les simulations. L'enseignant est dans l'incapacité de contrôler avec précision l'impact des simulations sur l'apprentissage. Si l'expérimentation se fait en classe, l'enseignant aura une idée globale des problèmes rencontrés par ses élèves, mais ne pourra pas s'assurer qu'un apport a été effectivement réalisé grâce à l'emploi de ces simulations.

1.3. L'évaluation des simulations

Cette partie nous permettra d'examiner les travaux existants qui aideraient les professeurs à concevoir des simulations. Nous avons résumé et adapté les principaux travaux trouvés en une liste de critères.

1.3.1 Critères de qualité existants pour les simulations

On peut trouver dans la littérature spécialisée différents critères de qualité et recommandations. De nombreux travaux sont très généraux et concernent les outils pédagogiques informatiques en général; d'autres concernent les simulations en général, y compris celles à vocation non pédagogique. Parmi ces travaux existants, ceux qui se focalisent sur les simulations éducatives informatiques sont beaucoup plus rares, nous en avons relevé quatre. Pourtant, nous allons voir qu'ils ne sont pas suffisamment précis, et globalement insuffisants pour accompagner un professeur dans la conception ou dans le choix et la correction d'une simulation. Ces critères, mêlés aux critères d'inspection ergonomique, seront résumés à la fin de cette section.

- Pankaj Kamthan propose dans un article de 1999 intitulé "Java Applets in Education" de déterminer comment les simulations peuvent être intégrées dans l'enseignement, comment et où les applets Java peuvent être utilisés et quelles sont les éléments à considérer avant et pendant un tel usage.

- La bibliothèque MERLOT³⁰ propose des critères d'évaluation pour des logiciels éducatifs et en particulier les simulations éducatives. Ces critères ont pour objectifs de sélectionner du matériel pour la bibliothèque, évaluer du matériel existant et indiquer les requis pour le développement de nouveau matériel.
- JOMA³¹ (*Journal of Online Mathematics and its Application*) propose des critères établis pour l'évaluation de simulations éducatives en mathématiques. Ces critères ont ensuite été appliqués sur les différentes simulations disponibles sur le site de la revue.
- Dans un article technique intitulé "*A Practical Process for Reviewing and Selecting Educational Software*" (Foshay et Ahmed, 2000) (une méthode pratique pour l'évaluation et la sélection de logiciels éducatifs), l'entreprise PLATO Learning³² distingue différents types d'outils pédagogiques informatiques, et prend notamment en compte les simulations spécifiquement.

Tous ces travaux sont organisés en une liste, soit de questions, soit de critères de qualité. Ces différents points sont divisés en catégories. Les points de vue pédagogiques et techniques sont séparés, et seuls les critères de JOMA et MERLOT incluent une catégorie sur l'utilisabilité de l'outil. L'article de Pankaj Kamthan propose une catégorisation des simulations en quatre types, mais ne propose pas des recommandations spécifiques à chaque type. Il distingue les simulations informationnelles, celles qui illustrent un concept, les simulations calculatoires, et celles pour tester les connaissances.

Pour tous les travaux, les recommandations ou critères doivent être plus considérés comme des axes de réflexion, voire des heuristiques, et donnent peu de moyens précis d'améliorer la qualité des simulations. Par exemple, les critères de JOMA propose des

³⁰ <http://www.merlot.org/>

³¹ <http://www.joma.org/>

³² <http://www.plato.com/>

questions comme : "Est-ce que l'activité est clairement présentée?", "Est-ce que l'applet contribue à l'apprentissage des mathématiques", ou "Est-ce que les contrôles sont faciles à utiliser?". L'article de Pankaj Kamthan, au sujet du guidage, suggère que les "leçons expliquant le concept étudié, ses pré-requis, ainsi que des instructions d'utilisations doivent être écrites et incluses", sans indiquer plus de détails. Les critères de PLATO Learning énoncent quant à eux "[qu'] une simulation éducative bien conçue doit fournir [...] un scénario clair avec des objectifs clairs, [...] rendre visibles les phénomènes nécessaires à la compréhension, même s'ils ne sont pas visibles en réalité, [...] fournir des conséquences plausibles et réalistes aux actions des apprenants, [...]". Ainsi, le niveau de détail laisse à chaque fois beaucoup de liberté au concepteur pour appliquer les critères.

Enfin, aucun des travaux cités ne propose de validation des critères développés, ou n'indique les travaux sur lesquels il s'appuie.

1.3.2 L'inspection ergonomique

La littérature en ergonomie donne de nombreux moyens d'améliorer les interfaces, qu'elles soient logicielles ou matérielles. Il existe de nombreux ouvrages qui traitent d'analyse de tâche (Jonassen, Hannum et Tessmer, 1989; Hackos et Redish, 1998), des cycles de conception centrés utilisateurs (Robert et Fiset, 1992; ISO 13407, 1999) des tests d'utilisabilité (Dumas et Redish, 1999; Virzi, 1992). Cependant, ces approches ne sont pas adaptées au problème que nous nous sommes fixé. En effet, nous nous adressons à des enseignants non spécialistes en utilisabilité, qui ont de fortes contraintes de temps et ne peuvent se permettre de suivre des normes de conception complexes, ou de mener des tests d'utilisabilité. Nous avons donc choisi d'examiner plus particulièrement les lignes directrices, critères, recommandations, et évaluations heuristiques, plus simples à manipuler. Parmi les travaux existants, nous nous sommes particulièrement intéressés aux critères de Bastien et Scapin (Bastien et Scapin, 1993), aux heuristiques de Nielsen (Nielsen, 1994), et à la méthode d'évaluation de Ravden (Ravden et Johnson, 1989). Ces trois ouvrages jouissent d'une certaine autorité dans le

milieu de l'ergonomie et ont la particularité de proposer chacun une approche différente.

Les critères de Bastien et Scapin fournissent des points précis d'évaluation qui ont fait l'objet d'analyses complètes et qui sont reconnus comme un outil des plus performants et à bas coût. Organisés en différentes rubriques, ils permettent d'orienter des choix de conception. Leur caractère neutre permet d'éviter l'écueil de la subjectivité et des préférences personnelles lors de l'évaluation.

Jakob Nielsen propose par ses heuristiques une méthode d'inspection pour laquelle un petit groupe d'évaluateurs examinent une interface en fonction d'une liste de principes reconnus de facilité d'utilisation. Ces principes sont dispensés de manière informelle et ne fournissent pas de critères précis ou de moyens d'améliorer les interfaces.

L'ouvrage de Ravden et Johnson constitue quand à lui une "méthode pratique" d'évaluation d'interfaces. Cette méthode met en œuvre une liste de points que les interfaces bien conçues devraient réaliser. Pour chaque critère, l'utilisateur mentionne si le critère est rempli tout le temps, la plupart du temps, parfois, ou jamais. La méthode est organisée en un grand nombre de critères répartis dans différentes sections et laisse la place pour de nombreux commentaires.

1.3.3 Résumé et adaptation des critères

A partir des trois ouvrages du domaine de l'ergonomie mentionnés, et des critères existants, nous avons établi la liste de critères suivante. Ces critères ont été adaptés aux simulations, certains ont été enlevés par rapport à la littérature habituelle, d'autres reformulés voire certains rajoutés. Le tableau 1.1 montre la liste des critères, tandis que le tableau 1.2 qui suit indique comment a été construite cette liste en indiquant la provenance de chaque critère.

Tableau 1.1 : Résumé et adaptation des critères de qualité existants

1. Contenu
1.1 Pertinence : le contenu scientifique abordé est pertinent, répond à une nécessité
1.2 Exactitude : le contenu scientifique abordé est valide
2. Interface
▲ 2.1. Lisibilité
2.1.1 Interface aérée : il y a suffisamment d'espace entre les éléments de l'interface
2.1.2 Texte lisible : la typographie est claire, de taille suffisante, les majuscules et les minuscules sont utilisées
2.1.3 Objets visibles : les objets et les textes contrastent suffisamment avec l'arrière-plan
2.1.4 Sobriété : un nombre limité et réfléchi de couleurs significatives (4-6 typiquement au maximum) et de fontes (2-3 typiquement au maximum) est utilisé
▲ 2.2. Structure
2.2.1 Séparation en zones : les objets apparentés sont regroupés et les objets ayant des fonctions différentes sont séparés
2.2.2 Structure logique : le découpage de l'interface suit la logique du cheminement de l'apprenant
2.2.3 Lien symboles-contrôleurs-objets : les symboles, les paramètres et les objets associés ont un comportement/couleur/taille/typographie similaires ou un lien
▲ 2.3. Contrôle
2.3.1 Clarté des entrées : les unités et valeurs acceptables des entrées sont indiquées
2.3.2 Contrôle sur les entrées explicite : les entrées de l'utilisateur sont explicitement validées et restent visibles après validation
2.3.3 Contrôle sur le déroulement : l'état de la simulation est toujours indiqué, et l'utilisateur peut arrêter la simulation à tout moment
2.3.4 Réponse rapide : la plupart des actions de l'utilisateur ont une réponse "instantanée", de l'ordre du dixième de secondes
▲ 2.4. Charge de travail
2.4.1 Zone d'attention évidente : l'attention n'est pas perturbée par des animations, clignotements, éléments très colorés ou agressifs non pertinents
2.4.2 Charge perceptive faible : il n'y a que les informations essentielles à l'écran, celles non nécessaires pouvant être masquées

Tableau 1.1 : Résumé et adaptation des critères de qualité existants (suite)

2.4.3 Temps de navigation faible : le nombre de clics pour exécuter une action typique est faible (2-3 maximum)
2.4.4 Transformations d'informations : les données affichées ne demandent pas de calculs ou de conversion de la part de l'utilisateur
2.4.5 Compatibilité des symboles : le langage des messages est celui de l'utilisateur, selon son point de vue
2.4.6 Compatibilité des actions : les interactions utilisées sont compatibles avec les habitudes et attentes des utilisateurs
▲ 2.5. Aide et gestion des erreurs
2.5.1 Présence d'une aide : des instructions sont offertes de manière claire et concise
2.5.2 Protection contre les erreurs : les erreurs communes sont détectées et n'altèrent pas le fonctionnement
2.5.3 Correction des erreurs : les erreurs détectées peuvent être corrigées aisément
3. Pertinence de l'utilisation de la technologie
3.1 Utilisation de la technologie : la simulation tire profit du multimédia (animations, sons), de possibilités d'interactions avancées, et/ou de la capacité de calcul de l'ordinateur
3.2 Utilité de la technologie : le même contenu n'aurait pas pu être traité aussi bien avec une méthode traditionnelle
4. Critères techniques
4.1 Catalogage : la simulation est accompagnée d'une description complète
4.2 Portabilité : la simulation fonctionne sur toutes les plateformes, tous les navigateurs
4.3 Facilité d'installation : la simulation ne nécessite pas de connaissances sur les technologies employées ni d'installation
4.4 Chargement court : le chargement n'excède pas 10 secondes
4.5 Interactions accessibles : les modes d'interaction ne nécessitent pas d'habiletés particulières
4.6 Performances : les performances de la simulation sont bonnes et constantes

Tableau 1.2 : Provenance des critères

CRITÈRE		PROVENANCE
1. Contenu		
1.1 Pertinence	Merlot	Quality of content, 2.
	Plato	5. Content, 2.
1.2 Exactitude	Merlot	Quality of content, 1.
	Joma	Essential, 2.
2. Interface		
▲ 2.1. Lisibilité		
2.1.1 Interface aérée	Bastien/Scapin	1.4 Lisibilité
	Nielsen	8. Aesthetic
	Joma	2. Interface, 1. Usability
2.1.2 Texte lisible	Bastien/Scapin	1.4 Lisibilité
	Nielsen	6. Recognition
2.1.3 Objets visibles	Bastien/Scapin	1.4 Lisibilité
	Nielsen	6. Recognition
2.1.4 Sobriété	Bastien/Scapin	1.4 Lisibilité
	Nielsen	8. Minimalism
▲ 2.2. Structure		
2.2.1 Séparation en zones	Merlot	Ease of use, 1.
	Bastien/Scapin	1.2. Groupement
2.2.2 Structure logique	Merlot	Ease of use, 2.
	Bastien/Scapin	1.2. Groupement
2.2.3 Lien symboles-contrôleurs-objets	Bastien/Scapin	1.2. Groupement
▲ 2.3. Contrôle		
2.3.1 Clarté des entrées	Bastien/Scapin	1.1 Incitation
2.3.2 Contrôle sur les entrées explicite	Kamthan	Technological, 3. GUI
	Bastien/Scapin	1.1. Incitation
	Bastien/Scapin	3.1. Actions explicites
	Nielsen	1. Visibility
	Nielsen	3. User control
2.3.3 Contrôle sur le déroulement	Kamthan	Technological, 3. GUI
	Bastien/Scapin	1.1. Incitation
	Nielsen	1. Visibility

Tableau 1.2 : Provenance des critères (suite)

2.3.4 Réponse rapide	Kamthan	Technological, 5. Efficiency
	Bastien/Scapin	1.3. Feedback
	Nielsen	1. Visibility
▲ 2.4. Charge de travail		
2.4.1 Zone d'attention évidente	Merlot	Ease of use, 3.
2.4.2 Charge perceptive faible	Merlot	Ease of use, 3.
	Nielsen	8. Minimalism
2.4.3 Temps de navigation faible	Bastien/Scapin	2.1. Brièveté
	Nielsen	7. Efficiency
2.4.4 Transformations d'informations	Merlot	Ease of use, 7.
	Bastien/Scapin	2.1. Brièveté
	Nielsen	7. Efficiency
2.4.5 Compatibilité des symboles	Merlot	Ease of use, 7.
	Bastien/Scapin	8. Compatibilité
	Nielsen	2. Match
	Joma	2. Interface, 1. Usability
2.4.6 Compatibilité des actions	Merlot	Ease of use, 7.
	Bastien/Scapin	8. Compatibilité
	Nielsen	2. Match
▲ 2.5. Aide et gestion des erreurs		
2.5.1 Présence d'une aide	Kamthan	Technological, 7. Help
	Bastien/Scapin	5.2. Messages d'erreur
	Nielsen	10. Help
	Joma	4. Technical, 1. Context
2.5.2 Protection contre les erreurs	Kamthan	Technological, 4. Robustness
	Bastien/Scapin	5.1. Protection
	Plato	3. Software, 9.
	Nielsen	5. Error prevention

Tableau 1.2 : Provenance des critères (suite)

2.5.3 Correction des erreurs	Kamthan Bastien/Scapin	Technological, 4. Robustness 5.3. Correction
	Nielsen	9. Errors
3. Utilisation de la technologie		
3.1 Utilisation de la technologie	Merlot	Effectiveness 2, 1.
	Merlot	Ease of use, 8.
	Kamthan	Pedagogical, 1. Appropriateness
	Joma	2. Interface, 2. Technology
3.2 Utilité de la technologie	Merlot	Effectiveness 2, 1.
	Kamthan	Pedagogical, 1. Appropriateness
	Joma	2. Interface, 2. Technology
4. Critères techniques		
4.1 Catalogage	Joma	4. Technical, 6. Cataloging
4.2 Portabilité	Kamthan	Technological, 2. Compliancy
	Plato	3. Software, 1.
	Joma	4. Technical, 3. Plug-ins
4.3 Facilité d'installation	Merlot	Ease of use, 6.
	Plato	3. Software, 6.
	Joma	4. Technical, 3. Plug-ins
4.4 Chargement court	Kamthan	Technological, 5. Efficiency
4.5 Interactions accessibles	Joma	4. Technical, 5.
	Joma	Troubleshooting
4.6 Performances	Plato	3. Software, 2.
	Plato	3. Software, 9.
	Joma	3. Content, 3. Robustness

Cependant, de tels critères ont de nombreux défauts. Comme le fait notamment remarquer Vanderdonckt qui a compilé de nombreux critères ergonomiques, il arrive souvent qu'ils se contredisent (Vanderdonckt, 1994). Ils sont soit trop généraux, difficiles à interpréter, ou bien trop spécifiques et nombreux (Boutin, 2000). C'est

pourquoi nous allons nous attacher à fournir dans ce travail un guide d'amélioration des simulations pratique et adapté aux professeurs, plus précis et adapté que des uniques lignes directrices ergonomiques.

CHAPITRE 2 : ÉTUDE EMPIRIQUE DES SIMULATIONS EXISTANTES

Ce tour d’horizon est une étude empirique destinée à examiner de manière objective un certain nombre de simulations éducatives destinées à l’enseignement des sciences. Le but est de décrire quelles sont les composantes des simulations, et de déterminer les usages courants.

Ce chapitre commence par la définition des limites de l’étude empirique, ce qui permet de préciser le périmètre des simulations étudiées. La méthodologie est alors exposée, puis viennent les résultats de l’étude empirique, regroupés selon les différentes caractéristiques identifiées.

2.1. Limites de l'étude

2.1.1 Partage sur l'Internet

Notre champ d'étude inclut uniquement les simulations gratuitement disponibles sur l'Internet. En effet, il existe d'autres types de simulations éducatives :

- Des logiciels commerciaux ont été développés, tels Agent Sheets³³, Gizmos³⁴, Plato learning³⁵ ou Gravidlab³⁶ et les licences relatives à l'utilisation de ces simulations sont payantes. Ce mémoire de maîtrise étant destinée aux professeurs désirant concevoir des simulations, nous excluons de telles simulations de notre étude.
- Il existe aussi des simulations non commerciales développées par des professeurs. Il s'agit par exemple de petits programmes ou de scripts Matlab©³⁷ développés uniquement pour un usage interne comme une séance de laboratoire ou une présentation en classe, et qui ne sont pas rendus disponibles. Or, une simulation conçue pour un usage interne diffère grandement d'une simulation destinée à être accessible à tous. La première fera partie intégrante d'un cours, le professeur sera présent pour introduire, expliquer le fonctionnement de la simulation, et demander des observations. Au contraire, la seconde sera conçue dans l'esprit que n'importe qui pourra les utiliser, et sans participation de l'auteur. Ainsi convaincus qu'il s'agit de deux entités différentes, nous avons choisi de nous intéresser uniquement aux simulations éducatives disponibles sur l'Internet, et ce pour les raisons suivantes :

³³ <http://www.agentsheets.com/>

³⁴ <http://www.explorelearning.com/>

³⁵ <http://www.plato.com/>

³⁶ <http://www.cifn.ulg.ac.be/inforef/swi/gravidlab.htm>

³⁷ Copyright Waterloo Maple Inc.

- Premièrement, évidemment, l'accès à ces simulations à usage interne étant volontairement restreint, il est difficile d'obtenir de tels programmes.
- Ensuite, le professeur étant sur place lors de l'utilisation de la simulation par ses élèves, il pourra expliquer le fonctionnement de son programme. Ainsi, lors de la conception, il accordera moins d'importance à l'explicitation des objectifs pédagogiques, à l'utilisabilité de son programme, au guidage accompagnant la simulation, etc.
- Enfin, il est difficile de généraliser face à de telles simulations. Lorsqu'une simulation est prévue pour un usage aussi spécifique que l'utilisation dans un laboratoire, il apparaît de manière évidente que de nombreux impératifs très particuliers régissent le processus. Le matériel et le temps disponibles, l'imbrication de la séance dans le curriculum, le type de livrable que le professeur désire obtenir, etc., auront un rôle prépondérant dans la conception de l'applet. Il faudrait alors connaître tous ces éléments pour pouvoir analyser de manière pertinente les simulations produites. De même il faudrait prendre en compte ces contraintes dans l'élaboration de recommandations. On voit donc que ces considérations techniques, matérielles, temporelles, politiques, seraient trop nombreuses et nous éloigneraient du sujet de la qualité des simulations.

2.1.2 Matières

Nous nous sommes volontairement limités principalement aux matières scientifiques, et plus particulièrement aux mathématiques et aux sciences physiques. Quelques simulations traitant d'autres matières, comme la biologie et l'informatique, ont aussi été analysées. En effet, les domaines scientifiques sont les plus actifs pour les simulations. Les problématiques abordées par l'apprentissage des langues ou des sciences humaines par exemple sont très différentes.

2.1.3 Niveaux

Nous avons aussi choisi de nous intéresser aux niveaux secondaire, collégial et universitaire, ou équivalents. D'une part parce qu'il s'agit des niveaux pour lesquels la production est la plus prolifique. D'autre part, les problématiques sont différentes lorsque l'on s'adresse à de jeunes apprenants, ou à des professionnels en formation continue. Afin de pouvoir être précis tout en répondant à la majorité des cas, nous avons donc choisi de nous intéresser aux niveaux mentionnés.

2.1.4 Étendue de la simulation et temps d'utilisation

Nous nous limitons aux simulations qui sont suffisamment restreintes dans leur contenu. C'est-à-dire que nous nous intéressons à celles qui permettent une utilisation assez complète dans des temps de l'ordre de 5 à 30 minutes. Certains outils sont de véritables laboratoires très complets, sans objectif précis, et qui demanderaient plus d'une heure pour pouvoir utiliser toutes les fonctionnalités. Par exemple, certains programmes développés par le professeur M. Falstad³⁸, Particle World³⁹, ou Molecular Workbench⁴⁰ entrent dans cette catégorie.

Ainsi, ces simulations sont exclues de l'étude empirique, mais pourront être intéressantes pour d'autres points de ce travail exploratoire.

2.2. Méthodologie

2.2.1 La recherche de simulations

Dans une première étape, nous avons utilisé les moteurs de recherche publics sur Internet, à l'aide de mots clés comme "applet" "simulation" complétés par des noms de matières, par des notions explicites, ou des problèmes. Pour ajuster certaines recherches, des mots comme "éducation" "enseignement" "learning" "teaching" ont été

³⁸ <http://www.falstad.com/mathphysics.html>

³⁹ <http://people.ifm.liu.se/freka/particleworld/>

⁴⁰ <http://mw.concord.org/modeler/>

ajoutés. Lorsque les recherches portaient sur les applets en général, il n'est pas rare que des bibliothèques vétustes mal mises à jour nous soient proposées. Le meilleur moyen a été de chercher des simulations portant sur des sujets précis des programmes de mathématiques et de sciences physiques dans les niveaux visés. Ainsi, nous avons opéré comme un étudiant cherchant une simulation sur un sujet précis, comme par exemple, la méthode de Newton, ou l'effet photovoltaïque. Pour trouver ces sujets, les titres des simulations dont les liens ne fonctionnaient pas étaient utiles pour rechercher des applets valides.

Après cette première étape, nous avons alors eu accès à des sites créés par des professeurs et à diverses bibliothèques. Cependant, nous avons pu constater que de nombreux sites n'étaient pas référencés sur les moteurs de recherche. Une deuxième étape a été de consulter les liens disponibles sur les sites trouvés. Ceux-ci disposent en effet souvent d'une page qui regroupe les liens que l'auteur du site a jugé pertinents. Une grande partie des liens se sont révélés être invalides, mais grâce à ces pages, nous avons trouvé encore de nombreux sites qui n'étaient pas référencés sur l'Internet. Cette deuxième étape a permis de doubler le nombre de sites. De cette manière, nous estimons avoir eu accès à des liens vers plus de 5 000 simulations.

2.2.2 Sélection de simulations

Parmi les liens trouvés, nous avons consulté environ un millier de simulations, pouvant être regroupées par matière comme suit : environ 500 en mathématiques, environ 500 en sciences physiques, ainsi que plusieurs dizaines de simulations dans d'autres matières. Parmi ce millier de simulation, une base de données de 150 simulations a été construite. Elle a été construite de manière aléatoire au fur et à mesure, à partir du millier de simulations visitées. Dans l'annexe 1 (page 133) sont recensés les liens vers les 150 simulations.

2.2.3 Critères

On a appliqué à cet échantillon de 150 simulations différents critères. Des critères descriptifs, techniques, pédagogiques et ergonomiques.

Afin de décrire notre échantillon de manière générale, nous avons d'abord relevé la matière traitée par la simulation, l'adresse de la simulation et pris une capture d'écran. Un deuxième groupe de critères techniques porte sur les caractéristiques de conception de la simulation. Les techniques de programmation utilisées ont été distinguées. Nous avons donc compté le nombre d'écrans utilisés par la simulation, et le nombre de zones dans l'écran principal ; puis noté si la zone de visualisation était interactive, s'il existait une zone de visualisation annexe et si les paramètres étaient tous regroupés.

Pour identifier de quelle manière la simulation pouvait guider l'utilisateur, nous avons distingué dix éléments de guidage : l'introduction, des instructions pour débiter la simulation, une aide à l'utilisation, des procédures, des exemples, des exercices, des informations pédagogiques, des compléments théoriques, une analyse de la simulation et une conclusion. On a relevé si chacun de ces éléments de guidage étaient présents, et le cas échéant, à quel endroit dans la simulation.

Pour terminer, trois critères plus subjectifs ont été introduits dans l'étude empirique. Les simulations présentant des problèmes de lisibilité, celles dont les mécanismes de validation des paramètres sont incorrects et celles dont les moyens d'interaction sont inadaptés ont été comptées.

Tableau 2.1 : Critères de l'étude empirique

Description générale
Nom de la simulation
Adresse Internet
Capture d'écran
Description technique
Technique de programmation utilisée
Structure de l'écran
Découpage en zones
Critères d'accompagnement pédagogique
Introduction
Instructions de base
Aide
Procédures
Exemples
Exercices
Informations pédagogiques
Compléments théoriques
Analyse
Conclusion
Critères ergonomiques
Compatibilité des paramètres d'entrée
Mécanisme de validation des paramètres
Lisibilité

2.3. Résultats de l'étude empirique

2.3.1 *Description générale*

Dans la sélection des 150 simulations, nous avons voulu conserver les proportions observées en ce qui concerne les matières traitées dans notre échantillon initial de 1000 simulations. Ainsi, 48% des simulations analysées sont en mathématiques, 47% en sciences physiques, les 5% restants regroupant des simulations traitant d'autres sujets comme l'algorithmique ou la chimie. La recherche a couvert des simulations développées en langue française par des professeurs québécois, français, belges et suisses; en langue anglaise par des professeurs canadiens, américains et japonais, ainsi que quelques simulations en langue allemande développées par des professeurs allemands. La majorité (80%) des simulations étudiées ont été réalisées par des professeurs et rendues disponibles sur leur site personnel ou sur le site du cours concerné. Les simulations restantes font partie de banques de simulations.

2.3.2 *Description technique*

2.3.2.1. **Langages de programmation**

Nous avons recensé les différents langages de programmation utilisés dans les simulations. Le choix du langage a un grand impact sur non seulement l'apparence du produit, mais aussi ses fonctionnalités, sa pérennité, sa facilité de conception et d'utilisation. Pour chacun des langages, nous avons précisé ses caractéristiques pour le programmeur (aspect **conception**), puis pour l'utilisateur (aspect **utilisation**).

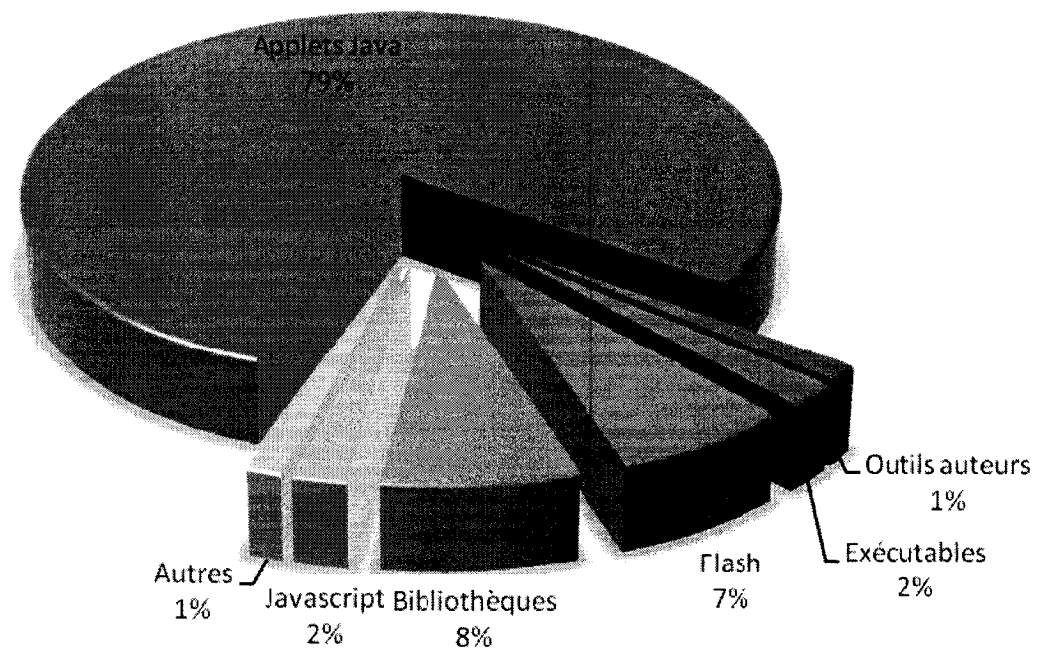


Figure 2.1 : Langages de programmation utilisés

▲ *Les applets Java*

Le plus utilisé est le langage Java ©⁴¹ de Sun (utilisé à 79%), par l'intermédiaire des applets qui permettent de bénéficier de toute la puissance du langage Java, en assurant une très grande compatibilité avec les ordinateurs des utilisateurs ainsi qu'une grande pérennité.

Conception : La programmation d'un applet Java se fait entièrement grâce au langage Java. Cependant, la classe principale qui sera lancée à l'exécution de l'applet doit respecter certaines règles. De plus, d'autres fonctions relatives à la gestion de

⁴¹ Copyright 2006 Sun Microsystems, Inc.

l'affichage doivent être présentes. La page html contenant l'applet fait alors appel aux fichiers issus de la programmation, avec éventuellement des paramètres spécifiques directement spécifiés dans le code de la page html.

Utilisation : Du côté de l'utilisateur, il faut que l'ordinateur client possède une machine virtuelle Java. Elle est déjà présente sur la grande majorité des ordinateurs. Sous forme de plugin, elle est aisée à installer, le navigateur l'installant automatiquement en cas de besoin. Celle-ci est disponible sur toutes les plateformes. La sécurité du système informatique de l'utilisateur est assurée, car la machine virtuelle Java protège l'ordinateur et interdit les appels à des fonctions pouvant nuire à la sécurité de l'ordinateur.

▲ *Bibliothèques pour applets Java*

Des variantes des applets Java ont été développées et proposent donc aux auteurs des bibliothèques d'objets paramétrables, assemblables et interfaçables. Ces technologies s'appuient sur les applets Java et proposent des objets standards déjà programmés en applets Java, tels des ressorts, des molécules, des curseurs, des chronomètres, des figures géométriques, des interpréteurs de fonctions mathématiques ou des graphes par exemple. Celles-ci sont utilisées dans 8% de l'échantillon étudié. Parmi ces intermédiaires, les plus utilisés sont EJS - Easy Java Simulations⁴², the Geometer Sketchpad⁴³, les Physlets⁴⁴, Cabri Java et Cabri Geometry⁴⁵, ou encore JCM - Java Components for Mathematics⁴⁶.

Conception : Le programmeur qui veut utiliser ces objets doit les appeler avec les bons paramètres, directement dans la page html. Cela lui épargne la programmation directe

⁴² <http://www.um.es/fem/Ejs/>

⁴³ <http://www.dynamicgeometry.com/>

⁴⁴ <http://webphysics.davidson.edu/Applets/Applets.html>

⁴⁵ <http://www.cabri.com>

⁴⁶ <http://math.hws.edu/javamath/index.html>

en Java, et lui permet d'implémenter la simulation avec une approche de plus haut niveau. Les interfaces qu'il proposera seront également plus similaires d'une simulation à l'autre. En revanche, il a beaucoup moins de liberté; sa production dépendra aussi fortement de la qualité de la bibliothèque utilisée.

Utilisation : L'utilisateur de son côté jouit des mêmes avantages que ceux cités lors de l'utilisation des applets Java, ces bibliothèques étant à la base des applets Java.

▲ *Flash*

Le langage Flash de Macromédia⁴⁷ est également utilisé dans 7% des simulations et génère souvent des simulations plus visuelles et dynamiques que leurs équivalents Java.

Conception : La programmation en Flash se fait principalement au moyen du logiciel auteur Macromedia Flash MX⁴⁸, et des parties plus algorithmiques peuvent être implémentées à l'aide des "action script". L'utilisation du logiciel Flash MX nécessite une phase d'apprentissage non négligeable, bien qu'inférieure à celle nécessitée par la programmation directe.

Utilisation : Les plugins flash, très utilisés, sont encore plus répandus que la machine virtuelle Java, assurant là encore une compatibilité maximale. De même que pour les applets Java, l'utilisation de plugins flash ne compromet pas la sécurité de l'ordinateur.

▲ *JavaScript*

Le langage JavaScript⁴⁹, variante du langage Java de Sun, est utilisé parfois, dans 2% des cas.

Conception : Les commandes en JavaScript s'intègrent directement dans la page html et ne nécessitent pas de fichiers supplémentaires, contrairement aux applets Java, et

⁴⁷ Copyright 2007 Adobe Systems, Inc.

⁴⁸ Copyright 2007 Adobe Systems, Inc.

⁴⁹ Copyright 2006 Sun Microsystems, Inc.

aux objets programmés en flash. Ce langage est très proche du langage Java, avec des fonctions supplémentaires relatives aux fonctionnalités web, et quelques limitations.

Utilisation : L'utilisation de ce langage ne nécessite pas d'installation chez l'utilisateur, car elle est nativement supportée par les navigateurs. Par contre, on relève des différences d'interprétation entre les navigateurs, qui peuvent engendrer des comportements indésirables. De plus, les simulations créées par ce moyen sont beaucoup plus lentes que si elles avaient été programmées en Java sous forme d'applets. Enfin, ce langage est critiqué pour son manque de sécurité pour l'utilisateur.

▲ *Exécutables*

Certaines rares simulations sont des exécutables qui demandent à être téléchargés. Cette approche concerne 2% des simulations de notre échantillon.

Conception : Ceci permet au programmeur d'utiliser le langage qu'il juge plus approprié pour sa simulation (Java, C++, Visual basic, ...). Cette approche assure aussi des performances optimales. Cependant, le concepteur doit alors s'assurer lui-même que sa simulation peut fonctionner sous différents systèmes d'exploitation et éventuellement concevoir plusieurs versions.

Utilisation : Pour l'utilisateur, bien que ces simulations ne nécessitent pas de logiciel particulier, elles demandent plus d'attention. Il doit en effet télécharger l'outil, le stocker à un emplacement de son ordinateur, le lancer, et après utilisation éventuellement le supprimer. Étant directement utilisé sur l'ordinateur sans intermédiaire, de tels programmes ont un accès direct aux ressources de l'ordinateur et pourraient compromettre l'intégrité de celles-ci.

▲ *Outils auteurs*

Quelques simulations (1% des cas étudiés) peuvent être créées à l'aide d'outils auteurs, tels GeoGebra⁵⁰, et divers outils développés par Cabri⁵¹.

⁵⁰ <http://www.geogebra.at>

Conception : De tels outils permettent au professeur de concevoir des simulations sans programmer, mais à l'aide d'une interface. La facilité d'utilisation de ces outils et la qualité des produits sont alors spécifiques à l'outil utilisé. Nous n'avons pas testé ces outils.

Utilisation : Le résultat est alors un applet Java directement intégrable dans une page web, ou selon un format spécifique qui nécessite le téléchargement de plugins.

2.3.2.2. Structure de l'écran

La grande majorité (93%) des simulations tient sur une seule page. La simulation elle-même occupe un seul écran, et il faut parfois utiliser les ascenseurs de la page pour voir d'autres informations textuelles. Les paramètres, ainsi que tous les éléments visuels sont sur ce même écran ; en revanche, certaines informations contextuelles peuvent être accessibles grâce à des liens.

Certaines simulations font appel à des fenêtres supplémentaires. Il arrive dans 2% des simulations rencontrées que les instructions et autres informations contextuelles soient sur une page qui présente l'applet. Il faut ensuite cliquer sur un bouton pour afficher la simulation dans une autre fenêtre.

Les 5% de simulations restantes sont quant à elles réparties sur plusieurs écrans. Ainsi, par exemple, une fenêtre permet de régler les paramètres, une autre affiche la simulation, tandis qu'une troisième propose des graphes relatifs au déroulement de l'expérience. Cette dernière approche a l'avantage de rendre l'interface plus flexible, mais fait perdre de la simplicité d'utilisation.

⁵¹ <http://www.cabri.com>

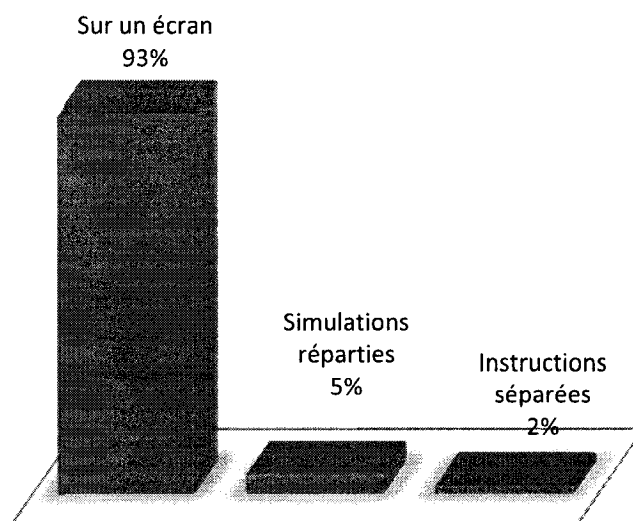


Figure 2.2 : Structure des écrans des simulations

2.3.2.3. Découpage en zones

Nous avons distingué quatre types de zones qui peuvent apparaître dans une simulation. Nous avons remarqué que 7% des simulations ne comportait que deux zones, que 42% se découpaient selon trois zones, 36% en quatre zones, 13% en cinq zones et 3% en six zones distinctes.

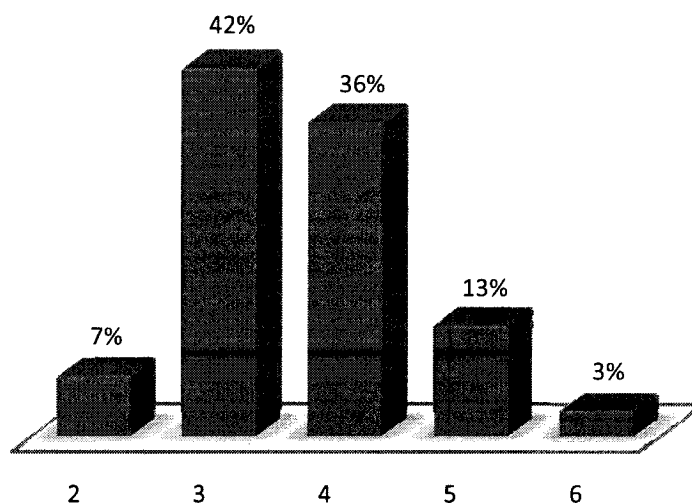


Figure 2.3 : Nombre de zones présentes dans les simulations

▲ *Visualisation du phénomène*

Cette zone d'attention, toujours centrale, est la zone où le phénomène est représenté. Il s'agit de la zone la plus étendue et comportant les éléments les plus visuels. On y trouve la représentation réelle ou graphique du phénomène étudié. Cela peut donc être entre autres un circuit électrique, un dispositif expérimental ou la représentation d'une fonction. Dans 42% des cas, cette zone est interactive.

▲ *Visualisation d'éléments annexes au phénomène*

Proche de la première zone centrale, on peut trouver des représentations relatives au phénomène, dans 45% des simulations. C'est souvent le même phénomène représenté selon une autre modalité. Par exemple, un tableau de valeurs qui supporte le graphique étudié, ou une fonction qui représente l'évolution temporelle du phénomène. Cet élément est généralement moins étendu et placé à proximité de l'élément précédent.

▲ *Les paramètres*

Dans 89% des cas, les paramètres occupent une zone fixe et assez restreinte, située en bas, en haut, à gauche et/ou à droite des éléments centraux. On remarque que lorsqu'il s'agit de contrôles de base, comme des menus déroulants, des zones de texte, ou des boutons simples, les paramètres sont tous regroupés en une barre qui est souvent soit en bas, soit à droite.

Certains (11%) s'appliquent à disperser les paramètres dans l'interface. Généralement, cette approche consiste donc à rapprocher spatialement le paramètre avec l'objet qu'il contrôle.

▲ *Informations contextuelles*

Enfin, presque toutes les simulations (96%) incluent divers textes d'accompagnement. La majorité des auteurs disposent ces informations en dehors des simulations proprement dites. Le schéma retrouvé dans 87% des cas est le suivant; la simulation est contenue dans une page html et un texte contenu dans la page html introduit le concept, donne quelques indications sur l'utilisation de la simulation et explique le

modèle théorique qui sous tend la simulation. Le paragraphe suivant explicite les différentes informations qui peuvent être proposées.

2.3.3 Critères d'accompagnement pédagogique

En plus des fonctionnalités de la simulation proprement dite, d'autres informations sont également nécessaires et viennent accompagner l'expérimentation. Nous allons exposer ici les différents types d'informations qui peuvent être présentés à l'utilisateur, et de quelle manière elles sont affichées. La Figure 2.4 montre ces différents types de guidage et dans quelles proportions elles sont intégrées dans les simulations. Suivent des explications supplémentaires sur chaque type de guidage.

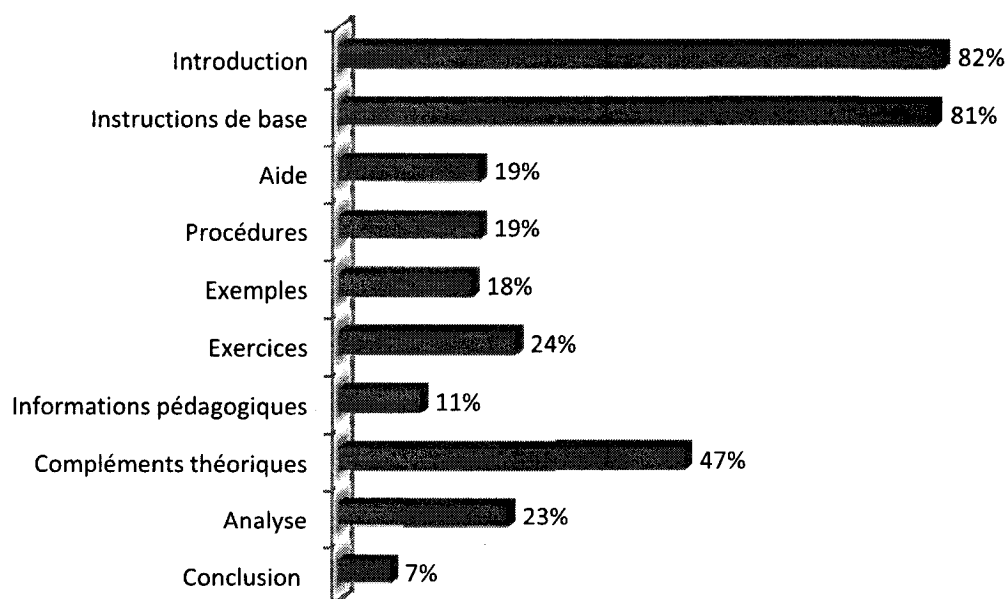


Figure 2.4 : Présence de guidage dans les simulations

2.3.3.1. Introduction

La plupart des simulations (82%) sont accompagnées d'une introduction qui replace la simulation dans un contexte plus général, et présente le phénomène qui va être étudié.

Les introductions peuvent consister en une simple phrase qui annonce juste le phénomène qui va être traité par la simulation. Certaines sont plus prolixes et présentent d'autres informations, comme par exemple un contexte historique ou des liens avec d'autres notions du programme. 78% des simulations présentent cette introduction dans le texte autour de la simulation tandis que 4% la proposent directement dans la simulation. Ainsi, il peut paraître étonnant qu'un cinquième des simulations étudiées ne sont précédées d'aucune information introductive.

2.3.3.2. Instructions pour débiter la simulation

Ensuite peuvent venir des instructions générales présentes dans 81% des simulations étudiées, qui indiquent comment débiter dans l'utilisation de la simulation. Il s'agit d'indications qui expliquent ce que la simulation permet de faire, et comment parvenir à des premières constatations. Elles peuvent prendre la forme d'une suite d'actions à réaliser, ou une question qui suggère comment démarrer l'utilisation de la simulation. Ces indications peuvent suivre directement l'introduction, et condensent en une ou deux phrases l'utilisation qui peut être faite. C'est l'approche prise par 72% des simulations. Une autre approche est d'intégrer directement ces indications dans la simulation elle-même (9%). Par exemple, des simulations fonctionnent par étapes et indiquent à chaque étape ce que l'étudiant peut faire.

2.3.3.3. Aide à l'utilisation

Les instructions précédentes peuvent être complétées par des instructions plus précises qui explicitent le rôle des différents éléments de l'interface. Dans cette catégorie, nous avons relevé les simulations qui détaillent pour chaque fonction ou chaque bouton l'utilisation qui peut en être faite. Parmi les 19% de simulations comptées, 17 % présentent ces informations dans le texte accompagnant la simulation. Seules 2% optent pour des informations sur les fonctions directement dans l'interface. Ceci a pour effet de moins rompre l'expérience de l'utilisateur et de lui éviter des allers-retours entre l'interface et le texte expliquant les fonctions. Par contre, cela peut surcharger l'interface.

2.3.3.4. Procédures

Un peu moins d'un cinquième des simulations (19%) suggère explicitement à l'utilisateur une marche à suivre. Ces procédures viennent accompagner la simulation sous forme de texte dans 15% des cas. Sous la forme parfois d'un protocole expérimental, ce texte explicite les étapes qui permettront à l'utilisateur d'arriver au résultat désiré. 3% des simulations choisissent de proposer ces procédures après un clic de l'utilisateur sur un lien. Cette manière d'opérer allège la quantité d'information qui peut accompagner la simulation, et permet de mieux structurer l'information, mais augmente le nombre d'actions nécessaires à l'obtention de cette information. On a remarqué deux simulations (1% de l'échantillon) qui se présentaient sous forme d'une succession d'écrans et à chaque étape, l'utilisateur doit faire ou voir quelque chose, puis passe à l'étape suivante. Ces étapes ont un niveau de difficulté croissant. On remarque surtout que la majorité des simulations, soit 81%, ne propose pas une telle étape et préfère donner la liberté à l'utilisateur dans son expérimentation.

2.3.3.5. Exemples

Moins d'un cinquième des simulations étudiées (18%) offre à l'utilisateur des exemples, c'est-à-dire des jeux de paramètres mémorisés qui permettent à l'utilisateur d'observer des cas intéressants et variés. Dans 10% des cas, les exemples sont directement intégrés à l'intérieur de la simulation. 7% des simulations incluent les exemples dans le texte accompagnant la simulation. Ceci est notamment possible avec la technologie des applets Java, puisque les paramètres peuvent être indiqués dans le code html de la page. Enfin, deux simulations de notre échantillon (1%) délivrent ces exemples à la suite d'un clic sur un lien. La présence d'exemples est fortement corrélée à la matière, et par exemple, dans le cas de l'analyse fonctionnelle en mathématiques, elle est salvatrice car elle épargne la saisie de fonctions.

2.3.3.6. Exercices

Près d'un quart des simulations analysées (24%) sont pourvues de petits exercices. Il s'agit de questions posées à l'utilisateur, mais qui n'imposent elles mêmes pas une

manière de procéder, ce qui distingue les exercices des procédures. On peut même ajouter que certaines simulations sont en elles même une sorte de petit jeu qu'il faut résoudre. Dans ces deux approches, ces exercices sont la plupart du temps externes à la simulation, c'est-à-dire que dans 17% des cas, ils se situent dans le texte accompagnant. 4% des simulations rendent ces exercices accessibles par un lien, et enfin les 3% restants présentent ce contenu directement dans le cœur de la simulation.

2.3.3.7. Informations pédagogiques

Un peu plus d'un dixième des simulations de l'échantillon (11%) explicitent le contexte pédagogique dans lequel se place l'expérimentation. L'auteur y décrit le contexte pédagogique relatif à la simulation, son(ses) objectif(s) pédagogique(s). Parfois des liens sont également présents vers des programmes officiels. Dans 9% des cas, ces informations ne sont pas directement sur la page de la simulation, et il faut cliquer sur un lien pour y avoir accès. Les autres (2%) présentent ce contenu dans le texte accompagnant la simulation.

2.3.3.8. Compléments théoriques

47% des simulations analysées sont accompagnées d'informations théoriques relatives à l'expérience simulée. Il peut s'agir d'équations régissant le mouvement étudié, d'hypothèses sous-jacentes à l'expérimentation, d'une démonstration, etc. Ces informations parfois volumineuses sont pour 34% de l'échantillon total situées autour de la simulation, dans la page html la contenant. Les 13% restantes prennent le parti de proposer des liens vers ces compléments.

2.3.3.9. Analyse de la simulation

Moins d'un quart des simulations (23%) reviennent sur l'expérimentation qui a été réalisée par l'étudiant. Dans cette catégorie, nous avons recensé les simulations qui expliquent les observations qu'ont pu faire les utilisateurs, et les relient explicitement aux objectifs pédagogiques de l'auteur. 20 % des simulations proposent cette analyse dans le texte accompagnant la simulation, tandis que 3 % le font sous forme d'un lien.

Ainsi, nous remarquons que dans plus de $\frac{3}{4}$ des cas, l'utilisateur n'a aucun moyen de vérifier si la manipulation qui l'a faite était bonne.

2.3.3.10. Conclusion

Enfin, des rares simulations (7%) disposent d'un texte qui permet de conclure. Souvent sous forme de texte extérieur à la simulation (5% des cas), il résume ce qu'elle permettait d'observer et peut ouvrir sur un autre thème, une autre expérimentation proche. C'est aussi l'occasion de rappeler les limites de la simulation et ce qu'il aurait été possible de faire. Dans les 2 % des simulations restantes, l'utilisateur doit cliquer sur un lien pour afficher la conclusion de la simulation.

2.3.4 Critères ergonomiques

2.3.4.1. Contrôles

Le défaut qui revient le plus souvent est le manque de cohérence entre les moyens d'interaction choisis et l'utilisation qui en est faite. Certains contrôles qui nécessitent peu de précision sont régis par des zones de texte qui nécessitent la saisie d'une valeur exacte, tandis que certains contrôles qui gagneraient à être précis doivent être faits par des moyens approximatifs. Nous avons ainsi noté que 52% des simulations présentaient des moyens d'interaction peu compatibles avec l'utilisation voulue. De plus, les intervalles de valeurs admissibles ainsi que les unités sont trop souvent absentes. De manière générale, les conventions en vigueur dans chaque domaine ne sont pas suffisamment observées. C'est-à-dire que le formalisme habituel n'est pas respecté ; par exemple, on a trouvé des graphiques dont les axes ne sont pas gradués ni libellés. Deux risques sont encourus : le premier est que l'utilisateur ne trouve pas ses repères et soit perdu lors de la manipulation. Le deuxième, plus grave, est un désapprentissage de ces règles et conventions.

2.3.4.2. Validation des paramètres

Nous avons également noté pour 19% des simulations, la perfectibilité de leur mécanisme de validation des paramètres. En effet, certaines simulations fonctionnent

de telle sorte qu'il est parfois impossible de savoir si les nouveaux paramètres sont pris en compte car il n'y a aucun outil spécifique de validation, tel un simple bouton. D'autres sont inconstants et proposent, à l'intérieur de la même simulation, plusieurs processus de validation différents. Par exemple, la sélection d'une option par un menu déroulant valide la sélection, tandis que d'autres nécessitent l'appui sur un bouton. Pour certains même, il faut cliquer "dans le vide" pour pouvoir valider les paramètres et lancer ainsi le rafraichissement de la visualisation !

2.3.4.3. Lisibilité

Enfin, nous avons appliqué les critères de lisibilité identifiés dans la revue de littérature, et issus des critères de Bastien et Scapin, et des ouvrages de Ravden et Johnson, et Nielsen. Certaines simulations présentent en effet des textes illisibles; c'est-à-dire trop petits, certains passages entièrement en majuscules, dans des polices de caractères fantaisistes ou encore dans des couleurs qui ne contrastent pas suffisamment avec l'arrière-plan. Ceci a été relevé dans 26% des cas. De même, on relève quelques cas où les couleurs utilisées sont trop nombreuses et sans intérêt pédagogique. Cela nuit à la lisibilité de l'interface et accroît la charge mentale de l'utilisateur.

2.4. Conclusion

Cette étude empirique révèle de nombreuses pratiques différentes et une grande hétérogénéité dans le paysage des simulations éducatives. Il est clair après ce recensement que l'absence de critères communs nuit à la qualité globale des simulations. Elles semblent être conçues sans analyse approfondie des processus d'apprentissage des élèves, et en contradiction avec de nombreux principes ergonomiques basiques.

Pour combler ces défauts, cette recherche propose donc une grille d'analyse des simulations qui replace l'utilisateur au centre de l'attention, puis des recommandations afin de corriger ou de concevoir des simulations dotées d'une interface cohérente aux buts pédagogiques poursuivis.

CHAPITRE 3 : GUIDE D'AMÉLIORATION ET DE CONCEPTION DES SIMULATIONS

Les deux premiers chapitres ont permis de mettre en évidence certaines lacunes que présentent les simulations existantes. Dans ce chapitre, nous allons exposer une démarche originale qui permettra d'améliorer des simulations.

Nous commencerons par exposer les objectifs et les caractéristiques de ce guide qui comprend une analyse puis des recommandations. La grille d'analyse, composée de trois volets, sera ensuite exposée. Outre les recommandations exposées dans le premier chapitre (page 32), nous proposons ici des recommandations prenant en compte les trois volets précédents. On compte tout d'abord les recommandations communes à toutes les simulations. Nous avons ensuite élaboré une typologie des simulations et émis pour chaque type des recommandations spécifiques.

3.1. Objectifs et caractéristiques du guide

3.1.1 Place de la méthode dans le cycle de conception

Le but de ces travaux est d'apporter un éclairage d'ingénierie et ergonomique sur la conception de simulations, tout en gardant les préoccupations pédagogiques propres à la conception de tout outil éducatif. Pour ce faire, il faut être en mesure d'analyser et de décrire une simulation ou une maquette afin, ultimement, de juger de sa qualité.

L'analyse s'adresse donc aux concepteurs qui souhaiteraient avoir les axes de réflexion pour mettre leur idée de simulation à l'épreuve. Ensuite, les recommandations leur permettront de réaliser une maquette concrète de la simulation, avant de concevoir la simulation elle-même (voir Figure 3.1).

Le guide s'adresse aussi à des professeurs qui désirent utiliser des simulations existantes. Couplée avec les recommandations, l'analyse leur permet de mettre en évidence les forces et les faiblesses d'une simulation donnée. Ces informations pourront alors leur permettre de sélectionner une simulation donnée, de la rejeter, ou de la corriger (voir Figure 3.2).

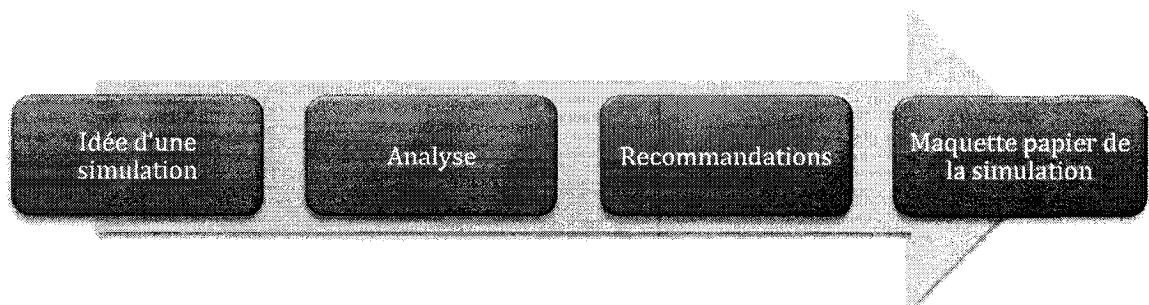


Figure 3.1 : Conception d'une simulation

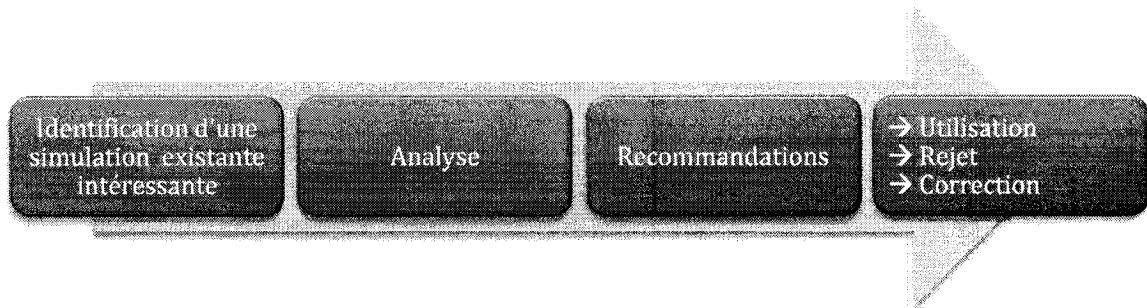


Figure 3.2 : Utilisation d'une simulation existante

3.1.2 Caractéristiques du guide

3.1.2.1. Objectifs du guide

Ce guide d'amélioration des simulations vise à améliorer les simulations selon les objectifs majeurs suivants :

- Replacer l'utilisateur au centre de la conception de la simulation,
- Prévoir un guidage suffisant pour que la simulation soit réellement utilisable par les étudiants ciblés,
- Proposer une structure générale pour la simulation,
- Éviter les lacunes ergonomiques.

Pour sa forme, notre stratégie de conception et d'amélioration des simulations se fixe les objectifs suivants :

- Être compréhensible par des non spécialistes, ne pas requérir des connaissances supplémentaires,
- Rester simple dans son utilisation,
- Laisser suffisamment de liberté à l'utilisateur du guide,
- Proposer des améliorations concrètes et précises.

3.1.2.2. Une analyse et des recommandations

Nous avons choisi une forme bien spécifique pour notre méthode d'amélioration des simulations. Nous avons vu à la fin du premier chapitre (page 33) les défauts des recommandations, des grilles d'évaluation formelles, ou des heuristiques. Les deux premières sont critiquées pour leur rigidité, leur manque d'adaptabilité, leur lourdeur, les dernières pour leur manque de précision et leur caractère non reproductible. Nous avons opté pour une approche axée sur deux éléments : une analyse située et des recommandations adaptées à différents cas. Ceci permet de répondre aux objectifs contradictoires que nous nous sommes fixés, c'est-à-dire laisser de la liberté au concepteur tout en lui proposant des recommandations précises et concrètes. L'analyse permet de proposer une approche flexible non directive, qui propose des axes de réflexion pertinents. Elle est ensuite complétée par des recommandations concises, précises et adaptées à différents cas isolés grâce à une typologie.

3.1.2.3. Analyse "située"

L'analyse possède trois volets qui sont complétés en parallèle, et permet ainsi de prendre un compte d'une manière naturelle différents éléments de la simulation. Le premier volet, dit fonctionnel, analyse la simulation comme un algorithme et décrit ses fonctionnalités brutes. Le deuxième volet, pédagogique, permet de mieux connaître l'utilisateur cible de la simulation et met en exergue où se situe l'apprentissage qu'elle permet. Le troisième volet, intitulé volet cognitif, analyse la manière dont l'information est représentée et comment l'utilisateur peut la percevoir. L'analyse est qualifiée de située car elle prend en compte l'environnement des simulations et les différents volets sont interdépendants. Ainsi, les réflexions ergonomiques ne seront pas isolées et menées au mépris des autres considérations. Au contraire, elles dépendront des choix fonctionnels et pédagogiques, qui sont essentiels pour l'étude d'un tel outil pédagogique. Notons que l'analyse pourrait encore être élargie par un quatrième volet de faisabilité qui prendrait en compte des dimensions techniques, financières et temporelles. Ce quatrième volet peut être important si certains ajouts ou modifications s'avèrent coûteux.

3.1.2.4. Recommandations spécifiques

Nous avons choisi d'émettre des recommandations qui sont peu nombreuses et spécifiques à différentes simulations. Pour cela, nous avons distingué quatre types de simulations. L'explication de chacun des types donne lieu implicitement à des recommandations de type heuristique. Ensuite, des recommandations précises et brèves sont données, et sont liées à l'analyse précédemment faite. En particulier, il ne s'agit pas de recommandations purement ergonomiques ; elles lient les trois volets : fonctionnel, pédagogique et ergonomique.

3.2. Analyse d'une simulation

3.2.1 Analyse fonctionnelle

Dans ce volet de l'analyse, on considère la simulation comme un simple algorithme, qui effectue des calculs sur des éléments à l'entrée et affiche des résultats. Ce volet vise la description des entrées, des sorties, et des processus qui établissent des dépendances entre entrée et sortie.

3.2.1.1. Paramètres d'entrée

Les *paramètres d'entrée* sont les degrés de liberté fonctionnels, les contrôles que l'utilisateur aura sur la simulation. Pour les déterminer, il faut lister toutes les "entrées" du programme, donc tous les éléments de l'interface que l'utilisateur peut modifier et qui ont une valeur pédagogique. Pour chaque paramètre on spécifie le *langage* de représentation utilisé et sa *représentation* dans l'interface.

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface

Langage : Le langage de représentation désigne le type de modalité de communication utilisé. Il peut s'agir d'un langage *numérique* si l'interaction avec ce paramètre d'entrée permet de fixer une valeur numérique. Si le paramètre d'entrée identifié consiste en

une interaction graphique à la souris telle le déplacement d'un élément ou un dessin, le langage utilisé est *graphique*. On peut aussi avoir un contrôle sur la simulation en lui donnant en entrée des éléments symboliques comme des formules; dans ce cas, le type de représentation est *symbolique*. Enfin, certaines simulations peuvent être à même d'interpréter des commandes naturelles de l'utilisateur, ce qui constituerait l'utilisation d'un langage *naturel*.

Représentation à l'écran : La dernière colonne nous amène à décrire comment le paramètre d'entrée se matérialise dans l'interface de la simulation. Il peut s'agir d'une interaction qui fixe une valeur numérique d'une manière grossière, pour laquelle la précision est limitée, comme le permettraient par exemple, des boutons glissières non continus. On peut aussi avoir des entrées numériques plus précises, voire même exactes dans le cas où une entrée explicite est demandée. Les interactions de type naturel seront sous forme de zone de saisie alphanumérique, tandis que les interactions de type graphique seront souvent sous forme de manipulation à la souris. On peut également avoir des listes déroulantes, des boutons, des cases à cocher, ...

3.2.1.2. Paramètres de sortie

Ensuite, on liste les *paramètres de sortie*, qui sont les résultats produits par la simulation, et qui se modifient suite à l'exécution des processus mis en jeu. Ce sont des entités calculées par la simulation. Notons que certains paramètres peuvent être à la fois d'entrée et de sortie. On les décrit comme précédemment par le langage qu'ils utilisent.

Paramètre de sortie	Langage

3.2.1.3. Paramètres de représentation

Les *paramètres de représentation* sont des paramètres que l'utilisateur peut manipuler pour modifier la représentation des paramètres de sortie et qui n'ont pas de valeur pédagogique. Il peut s'agir de la modification d'un pas de temps, une fonction de zoom ou de translation de l'origine d'un repère. On spécifie s'ils affectent la représentation spatiale ou temporelle de processus, puis, comme les paramètres d'entrée, de quelle manière ils sont représentés à l'écran.

Type : On distingue ici si ce paramètre influe sur la représentation *spatiale* (zoom, échelle,...) ou *temporelle* (pas de temps, vitesse,...) du processus.

Paramètre de représentation	Type	Représentation dans l'interface

3.2.1.4. Dépendances

On va établir ici les *dépendances* entre paramètres d'entrée et de sortie et définir quels *processus* sont à l'œuvre dans la simulation. Par processus, on entend tout calcul effectué par la simulation et qui fait intervenir des paramètres identifiés précédemment. Il est intéressant de décomposer le processus principal en sous-processus, afin d'avoir un niveau de granularité pertinent. On identifie aussi pour chaque processus selon quelle modalité la réponse est donnée. Il faut que tous les paramètres d'entrée et de sortie identifiés précédemment interviennent dans la description des dépendances. Certains paramètres supplémentaires intermédiaires qui n'ont pas été identifiés comme paramètre d'entrée ou de sortie peuvent aussi intervenir.

Paramètre(s) d'entrée	Processus	Paramètre(s) de sortie	Réponse

Réponse : La réponse peut être en *temps réel* ou *différée*. Dans le premier cas, la visualisation se modifie au fur et à mesure des modifications apportées aux paramètres ; tandis que dans les simulations du second cas, l'utilisateur doit appuyer sur un bouton qui actualisent les paramètres de sortie en fonction des nouveaux paramètres d'entrée.

3.2.2 Analyse pédagogique

Ce deuxième point de vue consiste à analyser les paramètres et les processus décrits précédemment d'un point de vue pédagogique et à déterminer les pré-requis à l'utilisation de la simulation. Il faut connaître le public visé par ces simulations afin de situer à quel niveau devrait s'effectuer l'apprentissage grâce à la simulation.

3.2.2.1. Objectifs généraux

Dans un premier temps, il est nécessaire de dégager les principaux objectifs pédagogiques visés par la simulation, ainsi que la difficulté des étudiants que la simulation souhaite adresser.

Difficulté des étudiants	Objectif pédagogique

Difficulté des étudiants : On veut ici décrire quel problème pédagogique est à la base de la création de la simulation. Une simulation peut par exemple avoir été créée par un enseignant qui a remarqué que les étudiants ne comprenaient jamais le lien entre deux parties du cours, ou que ses étudiants ne parvenaient pas à utiliser une méthode.

3.2.2.2. Apprentissage des processus

Considérons les processus identifiés au volet fonctionnel. On notera donc pour chaque processus et étape le *niveau de connaissance pré-requis*, le niveau de *détail* auquel le processus est montré, le *guidage* qui y est lié, ainsi que *l'intérêt* de l'utilisation de l'informatique.

Processus	Niveau de connaissance pré-requis	Niveau de détail	Guidage

Niveau de connaissance pré-requis : On essaye de savoir quel est le niveau de connaissance requis pour que l'utilisateur puisse utiliser la simulation. Ainsi, l'utilisateur peut n'avoir besoin d'aucune connaissance pour pouvoir utiliser la simulation (niveau *néophyte*), ou bien avoir besoin d'avoir été déjà introduit au processus (niveau *familier*). Il peut être aussi nécessaire que l'étudiant maîtrise le processus considéré, dans lequel cas on notera *maîtrisé* dans la colonne.

Niveau de détail : Les simulations peuvent présenter les divers processus de différentes manières. Une première possibilité est de masquer complètement le fonctionnement du processus et de la présenter comme une boîte noire, le processus est alors dit *caché*. Il peut être *montré de manière élémentaire*, ou *montré complètement* si tous les détails régissant son fonctionnement sont exhibés.

Guidage : De l'aide peut être présentée aux utilisateurs afin de les guider dans la compréhension du processus et la manipulation de l'interface. Ce guidage peut être *implicite*, si l'interface, d'elle-même, indique comment se fait le fonctionnement du processus. Ceci est possible si le processus est suffisamment simple, ou si les moyens d'interactions avec ce processus sont d'utilisation évidente. Le guidage peut aussi être *explicite* à l'aide de texte qui décrit des procédures d'expérimentation. Enfin, il ne peut n'y avoir aucune information, le guidage est alors *absent*.

3.2.2.3. Apprentissage des paramètres

On va reprendre ici chaque paramètre identifié au volet fonctionnel, puis on doit préciser le niveau de connaissance pré-requis par l'utilisation de la simulation. De même on précise si la simulation présente un guidage au sujet de chaque paramètre.

Paramètre	Niveau de connaissance pré-requis	Guidage

Niveau de connaissance pré-requis : Un paramètre peut avoir plusieurs représentations sous différents langages. Cette colonne détermine si le paramètre dans le langage qui est utilisé, est connu par l'étudiant. Ainsi, pour chaque langage identifié, on précisera si l'étudiant méconnaît le paramètre dans cette représentation (*néophyte*), ou bien s'il y est *familier* voire s'il le *maîtrise*.

Guidage : De même que pour la section processus, on précise si le paramètre en question est accompagné d'informations, donc si le guidage est *absent*, *implicite* ou *explicite*.

3.2.3 Analyse ergonomique

3.2.3.1. Représentations des paramètres fonctionnels

Cette section permet de réfléchir à la manière dont tous les paramètres seront représentés. Les paramètres peuvent être liés à un élément qui est représenté graphiquement et dans ce cas, on peut créer un lien entre le paramètre et l'objet qu'il contrôle, en termes de localisation, de comportement, ou de couleur par exemple.

Paramètre	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité

Autre élément de l'interface lié : On recense ici les autres éléments de l'interface, dynamiques ou non, qui sont liés au paramètre considéré.

Nature du lien : Ces liens peuvent être de différente nature. Les deux éléments peuvent être liés par la couleur, un aspect semblable, un comportement apparenté, une

ligne, une proximité dans la disposition etc. Cette colonne sert donc à préciser ce qui met un lien en évidence entre les éléments.

Compatibilité : Pour chaque paramètre, on examine si la manière de le représenter est compatible avec les conventions scientifiques, comme les notations usuelles ou la graduation des axes, les conventions et habitudes des internautes, comme les soulignements des liens par exemple, et les habitudes des utilisateurs, comme le fait qu'il est usuel de représenter un nombre complexe dans le plan, ou de choisir la fréquence d'un courant à l'aide d'une molette.

3.2.3.2. Éléments incitateurs

Cette portion de l'analyse ergonomique vise à identifier par quelles étapes le concepteur de la simulation désire que l'élève passe. Il s'agit donc d'établir une liste de points de passage obligés. Pour chaque point, on spécifie quels sont les objets de l'interface qui sont à observer, puis qu'est ce qui inciterait les étudiants à effectivement réaliser cette étape.

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur

Points de passage : On note ici les différentes étapes par lesquelles l'utilisateur devrait passer. Chaque étape est généralement une observation qu'on souhaite que l'étudiant fasse.

Paramètres à observer : Pour chaque étape, plusieurs paramètres de l'interface sont concernés et l'étudiant doit observer la relation qui existe entre les deux pour bien passer par l'étape concernée. Le concepteur peut donc mentionner ici les paramètres d'entrée et de sortie de l'interface concernés.

Élément incitateur : On inscrit ici les éléments de la simulation qui poussent l'utilisateur à effectuer l'opération voulue. Ces éléments peuvent être intérieurs à la simulation (l'affichage d'une fonction, un bouton placé en évidence, le mouvement d'un élément par exemple) ou extérieurs (du texte qui précise quelles actions mener, un lien qui change les paramètres de la simulation par exemple). Souvent il s'agit d'un lien qui mettra en évidence la relation qui existe entre les paramètres identifiés.

3.3. Recommandations

3.3.1 *Recommandations communes à toutes les simulations*

3.3.1.1. Définitions

Symboles : Les symboles désignent les éléments statiques de la simulation qui jouent un rôle informatif ou illustratif. Il peut s'agir de valeurs fixes, de formules, de photos ou de dessins qui ne sont jamais modifiés durant l'expérience.

Guidage avant l'expérience : Sont regroupées sous cette dénomination les informations contextuelles que l'utilisateur est amené à lire avant l'expérimentation, c'est-à-dire les suivantes en reprenant le découpage vu dans l'étude empirique. *L'introduction*, qui replace la simulation dans un contexte général et présente globalement le sujet traité ; Les *instructions de base*, en quelques phrases, donnent des indications sommaires sur les différentes fonctionnalités de la simulation et expliquent comment démarrer son utilisation ; *L'aide* qui est beaucoup plus précise que les instructions précédentes et précisent le rôle de chaque fonction. Enfin, les *informations pédagogiques* précisent le contexte des notions traitées.

Guidage pendant l'expérience : Cette rubrique concerne les informations qui peuvent aider l'utilisateur durant l'expérimentation. Ainsi, il s'agit des *exemples*, qui sont des jeux de paramètres d'entrée préenregistrés, des *exercices*, et des *procédures*, qui agissent comme des protocoles expérimentaux.

Guidage après l'expérience : Certaines informations peuvent être dispensées à l'étudiant après l'expérimentation. C'est le cas des *compléments théoriques*, qui relient la simulation au cours et fournissent un contenu théorique. On compte également l'*analyse de la simulation* qui explique les différentes observations qui ont pu être faites grâce à la simulation. Enfin, une *conclusion* clôt l'expérience, résume ce que la simulation a permis de faire et de ne pas faire, peut ouvrir sur un autre sujet, etc.

3.3.1.2. Recommandations communes

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles et paramètres :

Les symboles et les paramètres de sortie présents ne doivent pas "court-circuiter" le cheminement d'apprentissage de l'apprenant. C'est-à-dire qu'ils ne doivent pas présenter directement la solution du problème, résumer toutes les observations possibles, ou donner des indications qui permettent d'avoir les bons résultats sans réflexion. Par exemple, la figure suivante présente une simulation qui illustre les différences entre la moyenne et la médiane. L'étudiant doit, pour une même distribution, trouver la moyenne et la médiane. Cependant, pour chaque essai, la simulation indique si le choix est trop grand ou trop faible. L'élève a donc la possibilité de trouver le bon résultat à partir de cette indication, sans se focaliser sur les autres aspects plus pédagogiques mis en œuvre de la simulation.

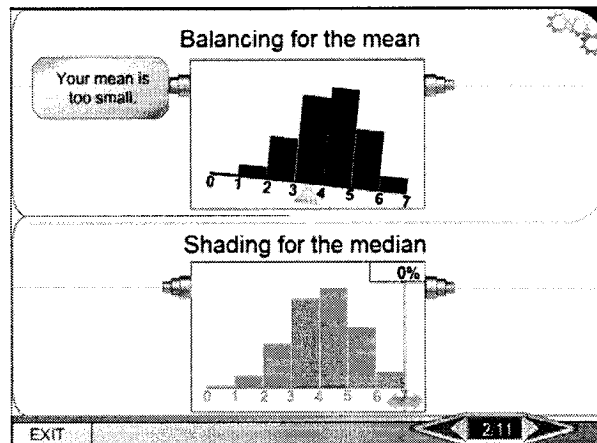


Figure 3.3 : Simulation traitant des différences entre médiane et moyenne⁵²

Paramètres :

- Nous avons remarqué lors de l'étude empirique que les paramètres d'entrée étaient souvent peu compatibles avec l'utilisation à laquelle ils étaient destinés et peu compatibles avec les habitudes des utilisateurs (voir paragraphe 2.3.4.1 Contrôles, page 59). Nous recommandons donc ici de choisir des moyens d'interaction adaptés à l'utilisation qui va en être faite. C'est-à-dire notamment des paramètres dont la précision est adaptée. De plus, il faut graduer les axes, mettre les unités, utiliser les notations standard, utiliser autant que possible les conventions à l'œuvre dans les domaines respectifs.
- Les mécanismes de validation des paramètres doivent être clairs, simples et évidents. L'utilisateur doit savoir si ses nouveaux paramètres ont été pris en compte. Pour cela, il peut suffire de rajouter un bouton de validation des paramètres pour ceux qui n'ont pas des effets immédiats.

52

<http://www.brocku.ca/mathematics/resources/learningtools/learningobjects/departement.php>

Processus :

Comme les critères du constructivisme exposés au paragraphe 1.1.2.3 (Les simulations et le constructivisme, page 14) le suggèrent, une force des simulations est de proposer des sources de données brutes, proches de la réalité. Nous recommandons donc de choisir des processus qui calculent réellement les phénomènes à partir des données de la simulation, plutôt que simuler des calculs et donner un résultat qui est préenregistré dans la simulation.

▲ Organisation de l'interface

Organisation globale :

Le format que nous conseillons est celui d'une page unique contenant la simulation et toutes les informations nécessaires à son fonctionnement. Le temps d'utilisation des simulations étant relativement court (de l'ordre de 5 minutes à 30 minutes), on doit éviter à l'utilisateur des allers retours entre la simulation et les informations qui permettent de l'utiliser. De même, il est plus compatible avec les conventions d'Internet d'avoir la simulation sur une seule page, et non pas divisée en plusieurs écrans.

Organisation du guidage :

- Le guidage avant expérience (introduction, instructions de base, aide à l'utilisation) doit figurer sur la page même de la simulation. En particulier, l'introduction ne doit logiquement pas se situer après la simulation proprement dite. Les mécanismes d'aide à l'utilisation doivent être accessibles simplement par l'utilisateur, en évitant de l'obliger à cliquer, à déplacer une fenêtre, voire à utiliser l'ascenseur. Les informations pédagogiques en revanche sont moins critiques pour l'utilisation de la simulation. Elles peuvent être dissociées des autres informations pré expérimentales, et se situer après la simulation, ou bien accessible grâce à un lien.
- Le guidage pendant l'expérience (exemples, exercices et procédures) gagne à être intégré à la simulation. Puisqu'il doit être utilisé pendant les manipulations, il doit être

visible en même temps que le cœur de la simulation. Il peut être montré sur commande de l'utilisateur afin de ne pas surcharger l'interface.

- Le guidage post expérimental (compléments théoriques, analyse, conclusion) suit logiquement la simulation. Il peut donc se situer au dessous de l'applet, voire sous forme de liens.

Organisation à l'intérieur de la simulation :

Lors de la disposition des éléments intérieurs à la simulation, il est important de considérer l'ordre dans lequel l'utilisateur va percevoir ces éléments. Généralement, son attention va s'attacher à l'élément le plus "visuel" de la simulation, c'est-à-dire le plus attirant par son aspect visuel, comme ses couleurs, son animation, sa taille. Parmi les informations qui seront à égalité par leur aspect visuel, les éléments considérés sont ceux qui sont proches de l'élément central précédent. Ensuite, le sens de lecture prendra le dessus, et les informations seront examinées en détail dans l'ordre de lecture habituel, qui dans la culture occidentale, est de gauche à droite et de haut en bas (Galitz, 1997).

▲ Guidage

Guidage avant l'expérience :

- Cette partie doit souvent être construite en fonction des connaissances de l'utilisateur sur le sujet : Si l'apprenant est néophyte en la matière, cette partie sera plus développée afin de lui présenter les notions abordées et éveiller son intérêt. À l'opposé, si la simulation est destinée à un public averti, l'introduction pourra être très brève afin de laisser l'utilisateur aller directement au sujet. Dans ce cas, il faudra veiller à ce que le titre décrive précisément le contenu.

- L'introduction joue un rôle majeur dans la simulation. Une introduction est nécessaire dans tous les cas. Elle doit faire preuve de concision et de précision, car ce seront les premiers éléments lus par les étudiants. Nous considérons que sa longueur ne devrait pas dépasser une dizaine de lignes, et recommandons d'utiliser des effets de mise en

relief (tailles de police différentes, gras, italique) pour faire ressortir les éléments importants.

Guidage pendant l'expérience :

Dans tous les cas, les exercices, exemples ou protocoles doivent être énoncés de façon concise. Les instructions longues ne sont pas suivies par les étudiants qui souhaitent aller droit au but. Pour les simulations possédant de nombreux paramètres, ou des paramètres longs à écrire, des jeux de paramètres préenregistrés (appelés exemples) sont à implanter.

Guidage après l'expérience :

- En tant que modélisations, les simulations font des approximations, ou ignorent volontairement certains paramètres de la réalité. Il est nécessaire de rappeler quelles ont été les approximations faites et les conventions utilisées.
- Les compléments théoriques doivent éviter d'être le motif à digressions sur des sujets connexes à la simulation. Ils doivent revenir sur les observations qui ont été faites et apporter une plus value théorique à la simulation. Leur rôle implicite est aussi de permettre à l'utilisateur de vérifier s'il a bien vu les cas intéressants. De même la partie consacrée à l'analyse de l'expérimentation doit traiter de ce qui a pu être observé, afin de donner de l'unité à la simulation. Des ouvertures vers des sujets connexes peuvent être faites dans la conclusion, sous forme de liens vers d'autres pages par exemple.

3.3.2 Buts pédagogiques génériques

Nous avons distingué quatre buts pédagogiques génériques. Il s'agit de types de simulations indépendants de la matière ou du niveau scolaire. Ils représentent la volonté pédagogique de l'auteur, et caractérisent quelle est la difficulté qu'il souhaite adresser au moyen de la simulation et de quelle manière il veut le faire. Après avoir appliqué l'analyse, le professeur doit identifier le but pédagogique qui correspond à la simulation, en se basant sur le but qu'il voulait atteindre.

Pour distinguer les quatre types, nous pouvons faire une analogie entre les simulations et les fonctions. Considérée d'un point de vue purement fonctionnel, une simulation est un algorithme informatique qui a des entrées et des sorties, soit une fonction f qui transforme des données E en données S . Considérons que les paramètres d'entrée sont les entrées des processus, qui en sortie, affichent les paramètres de sortie identifiés au volet fonctionnel de l'analyse. Chaque type correspond à mettre l'emphase sur différentes parties de cette fonction

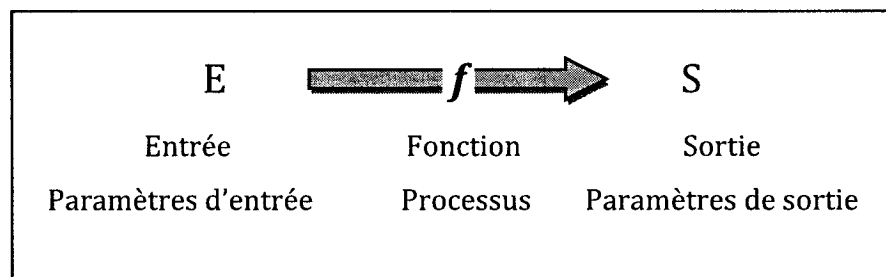


Figure 3.4 : Description d'une simulation en une fonction simple

3.3.2.1. Visualisation

Cette catégorie regroupe les simulations dont le but est de représenter le phénomène afin que l'utilisateur en intègre un modèle intuitif. L'auteur souhaite contextualiser une notion, la rendre plus concrète et plus accessible à l'aide de l'animation et de l'interaction.

Si on voit la simulation en tant qu'une fonction, le type visualisation correspond à des situations dans laquelle on veut enseigner entrées, sorties et fonction dans leur globalité et de manière plus ou moins superficielle.

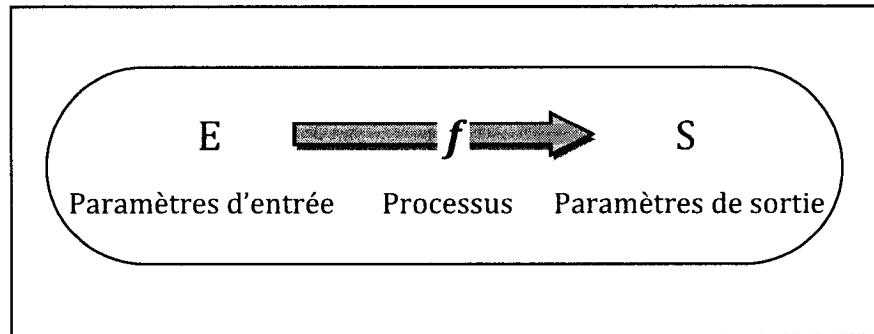


Figure 3.5 : Illustration du type Visualisation

3.3.2.2. Équivalence

Ce type de simulation a pour objectif de montrer une bijection entre deux éléments. Souvent il s'agit d'établir une équivalence entre deux représentations d'un même objet. Le but est donc que l'utilisateur perçoive que les éléments liés sont équivalents et de comprendre les mécanismes de la bijection qui s'opère.

Dans l'analogie fonctionnelle, il s'agit de situations dans laquelle la fonction met en bijection les paramètres d'entrée et de sortie. Le but de la simulation est de mettre l'accent sur les influences réciproques des paramètres.

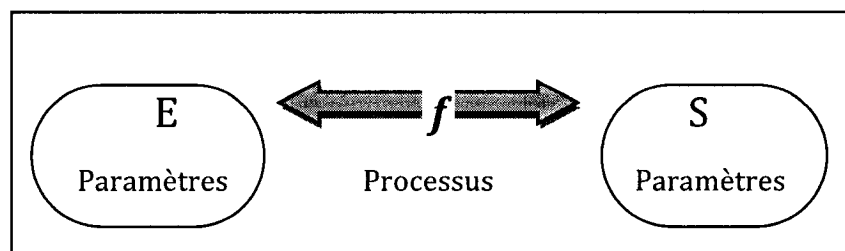


Figure 3.6 : Illustration du type Équivalence

3.3.2.3. Dépendance

Un professeur peut souhaiter créer une simulation dans le but que les utilisateurs approfondissent les relations de dépendance existant entre certaines variables régissant le phénomène. L'accent est alors mis sur les mécanismes de transformation entre ces variables.

Dans ce type, si on reprend l'analogie, le point important de la simulation est le mécanisme de dépendance, plus que les détails du processus lui-même.

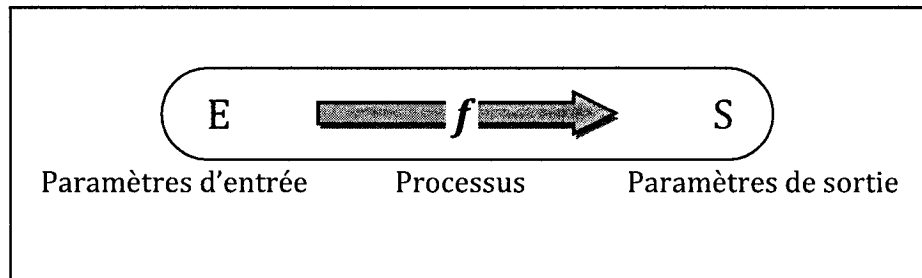


Figure 3.7 : Illustration du type Dépendance

3.3.2.4. Processus

Ces simulations ont pour objectif de montrer les mécanismes du processus traité, de mettre en évidence ses modes de fonctionnement, ses limites, etc. L'auteur souhaite alors que les utilisateurs gagnent une compréhension plus poussée et complète du phénomène.

Dans l'analogie fonctionnelle, cela revient à s'intéresser principalement à la fonction, à éventuellement la décomposer et la détailler.

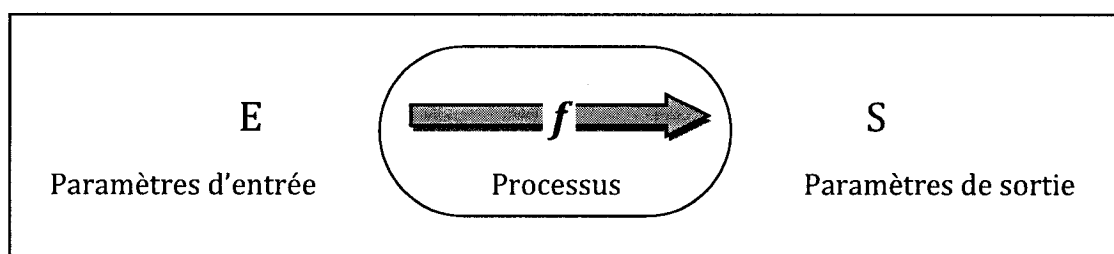


Figure 3.8 : Illustration du type Processus

3.3.3 Recommandations pour chaque type

3.3.3.1. Visualisation

Plus que les autres types, les simulations de type visualisation doivent être munies de moyens d'interaction simples et intuitifs et la phase d'apprentissage de l'interface doit être nulle pour favoriser le développement de l'intuition de l'utilisateur.

Conditions : les paramètres et les processus sont peu connus

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : ils doivent être présents en quantité très limitée : il est préférable de laisser le caractère informatif aux compléments théoriques.

Paramètres : les paramètres doivent être intuitifs, peu nombreux, peu précis, conventionnels et avoir une compatibilité maximale avec les usages. Les paramètres de représentation doivent être autant automatisés que possible.

Processus : il est souhaitable de limiter le nombre de variables utilisées. Le processus doit être interactif, en temps réel, simple et explicite.

▲ *Organisation*

Nous recommandons de disperser les paramètres dans l'interface, de les lier aux éléments contrôlés par la couleur et le placement notamment, et de placer l'introduction en évidence.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : l'introduction et les instructions de base doivent être les premiers éléments vus et doivent être mis en évidence. On doit y replacer la simulation dans un contexte plus général, présenter les questions principales soulevées par la simulation, et des instructions sur les principales fonctions. L'introduction doit être concise, les éléments importants mis en évidence (gras, police plus grande, couleur, ...)

Guidage pendant l'expérience : nous recommandons que le guidage pendant l'expérience éventuel soit limité à des questions ouvertes et courtes ou à des exemples de paramètres préenregistrés.

Guidage après l'expérience : le guidage post-expérimental doit aussi être limité. On peut proposer des compléments théoriques brefs, ouvrir sur d'autres simulations plus poussées, résumer rapidement le processus et proposer des liens vers d'autres éléments.

3.3.3.2. Équivalence

La construction de l'interface d'une simulation de ce type nécessitera surtout un grand soin pour la mise en bijection des éléments équivalents. Une telle simulation se caractérisera aussi par le fait qu'elle se destine à des étudiants qui connaissent déjà les processus et paramètres mis en jeu.

Conditions : les processus et les paramètres sont connus par l'étudiant et les paramètres sont à la fois entrée et sortie.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : il faut fournir les éléments qui expliquent la bijection : formule, illustration du phénomène...

Paramètres : une simulation de type équivalence doit proposer le même type d'interaction pour les deux éléments mis en bijection, et les contrôles choisis doivent permettre le balayage d'un grand nombre de valeurs.

Processus : nous recommandons qu'il soit effectué en temps réel et qu'il soit montré de manière explicite.

▲ *Organisation*

Il faut ajouter de nombreux liens entre les paramètres. Nous recommandons de veiller à respecter une certaine équité visuelle pour les deux paramètres. C'est-à-dire leur réserver le même espace visuel, positionner les éléments annexes sans privilégier un paramètre plutôt que l'autre, etc.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : le guidage pré-expérimental doit être court et direct.

Guidage pendant l'expérience : une telle simulation doit proposer des exemples ou exercices ouverts, permettant de faire visiter un grand nombre de valeurs, et de faire effectuer des va-et-vient entre les deux paramètres.

Guidage après l'expérience : il faut résumer et enrichir les observations faites.

3.3.3.3. Dépendance

Ce troisième type de simulation ayant pour objectif de présenter à l'étudiant les mécanismes de dépendances entre plusieurs variables, elle est destinée à un public plus averti. L'interface sera donc plus complète et offrira plus de possibilités aux utilisateurs.

Conditions : le processus doit être connu, les paramètres connus mais pas maîtrisés.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : nous conseillons de fournir les informations qui expliquent la dépendance de manière théorique et définissent clairement les variables importantes et les calculs du processus. Les variables moins importantes peuvent être expliquées dans le guidage.

Paramètres : ils doivent être autant précis que nécessaires et peuvent être nombreux. Il faut multiplier les types de représentation des paramètres d'entrée.

Processus : sa représentation doit être simple.

▲ *Organisation*

Nous suggérons que les paramètres d'entrée et de sortie doivent être mis en évidence et que de nombreux liens doivent être établis entre les éléments (couleurs, disposition, comportement, etc.). De plus, il faut prendre en compte les zones d'attention et surtout le sens de lecture pour disposer les éléments.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : ces informations devront être courtes et directes.

Guidage pendant l'expérience : les exemples, exercices et/ou procédures proposés doivent assurer que tous les jeux de paramètres intéressants soient pris, et que les observations correspondantes soient faites.

Guidage après l'expérience : on doit y revenir sur toutes les observations faites, les expliquer, les compléter, les catégoriser et donner des compléments théoriques.

3.3.3.4. Processus

Conditions : les paramètres doivent être connus des apprenants, alors que le processus, plus complexe, n'est pas maîtrisé.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : il faut fournir les éléments qui expliquent le processus traité et définissent comment les calculs sont faits.

Paramètres : les paramètres doivent être autant précis que nécessaire et suffisamment nombreux. Il faut veiller à inclure des cas "normaux" d'utilisation, des cas triviaux, typiques, des cas qui mettent en évidence les limites du modèle,...

Processus : nous recommandons que le processus soit détaillé, décomposé et que les sous processus soient explicités et illustrés.

▲ *Organisation*

Il est souhaitable de mettre l'illustration du processus au centre de la simulation, et de regrouper les paramètres pour plus d'efficacité et de clarté.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : le guidage pré-expérimental doit être court et direct.

Guidage pendant l'expérience : les exemples, exercices et/ou protocoles peuvent être détaillés dans les cas complexes, pour s'assurer que tous les cas prévus sont effectivement vus par l'utilisateur, notamment grâce à des jeux de paramètres préenregistrés.

Guidage après l'expérience : pour ce type de simulations, ces informations sont importantes; elles doivent revenir sur ce qui a été observé et mettre en évidence le fonctionnement et les limites du processus.

3.3.4 Conclusion

Ainsi, ce guide à deux phases permet d'améliorer de manière pratique et vraiment ciblée des simulations éducatives. Tout d'abord, l'analyse permettra de disséquer la simulation, mettre en évidence son fonctionnement et préciser les buts de l'auteur. Ensuite, les recommandations communes puis spécifiques permettront de manière précise de déterminer les éléments importants de la simulation.

CHAPITRE 4 : VALIDATION DU GUIDE

Afin de vérifier la méthode et les recommandations proposées, nous avons mené une expérimentation avec des étudiants. Pour cela, nous avons corrigé quatre simulations et entrepris une étude expérimentale comparative visant à déterminer la supériorité des simulations corrigées par rapport aux objectifs suivants :

- Une expérience utilisateur plus satisfaisante,
- Une efficacité accrue,
- Des objectifs pédagogiques mieux atteints.

Nous allons d'abord préciser comment s'est effectué le choix des simulations cibles et le processus de correction qu'elles ont subi. Après la description des sujets de l'expérience et des critères d'évaluation retenus, la procédure expérimentale sera exposée. Nous pourrons alors présenter les différents résultats obtenus et procéder à leur analyse et à une discussion sur les hypothèses expérimentales.

4.1. Correction des simulations

4.1.1 *Choix des simulations*

Le choix des 4 simulations fut assez complexe car nous voulions que les simulations satisfassent aux multiples conditions simultanées suivantes:

- Deux simulations en mathématiques, deux simulations en sciences physiques,
- Une simulation de chaque type identifié,
- Diversité des méthodes de programmation,
- Possibilité de modifier chaque simulation,
- Complexité homogène des notions traitées par les simulations,
- Bonne qualité initiale des simulations.

L'avant-dernier critère nous permet de faire tester toutes les simulations par un même groupe d'étudiants. Pour vérifier si la complexité des simulations était homogène, nous avons examiné à quels niveaux les notions correspondantes ont été enseignées. Le dernier critère nous permet de faire des modifications localisées, très spécifiques et non triviales, sans avoir à refondre toute la simulation.

Le choix des simulations a été effectué à l'aide de Marc Laforest, professeur adjoint à l'école Polytechnique de Montréal. La première simulation retenue, notée A, traite du concept de pression cinétique dans le domaine de la thermodynamique, la deuxième notée B des séries de Fourier dans le champ de l'analyse des fonctions périodiques. La simulation C, choisie en mécanique, illustre les phénomènes de résonance des simulations amortis en oscillations sinusoïdales forcées, tandis que la dernière notée D appartient dans le domaine de l'analyse numérique et montre l'approximation d'aires et d'intégrales par la méthode des rectangles.

Tableau 4.1 : Identification des simulations choisies

	Simulation	Type	Matière	Domaine
A	Pression	Visualisation	Physique	Thermodynamique
B	Séries de Fourier	Équivalence	Mathématiques	Analyse fonctionnelle
C	Résonance	Dépendance	Physique	Mécanique
D	Méthode des rectangles	Processus	Mathématiques	Analyse numérique

Tableau 4.2 : Caractéristiques des simulations choisies

	Technique de programmation	Adresse
A	Bibliothèque Java (Physlet)	http://hypo.ge-dip.etat-ge.ch/physic/simulations/gaz/pression.html
B	Applet Java	http://falstad.com/fourier/
C	Flash	http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Oscillateurs/ressort_rsf.html
D	Bibliothèque Java (GéoGebra)	http://abcmaths.free.fr/terminales/sommesderiemanngeo.html

Pour chacune de ces simulations, les auteurs ont été contactés et nous ont autorisés à effectuer des modifications, en nous envoyant si nécessaire le code source de la simulation. Pour corriger ces 4 simulations, nous avons appliqué la démarche d'analyse décrite au chapitre précédent, puis utilisé les recommandations. Les recommandations ont été suivies dans le but d'appliquer des corrections limitées afin de ne pas transformer complètement les simulations, ce qui aurait rendu les résultats caduques. Les tableaux décrivant les résultats de l'analyse sont fournis dans l'annexe 2 (page 139). Dans la partie suivante, les modifications sont précisées et des captures d'écran

"avant"-"après" reproduites. Chacune des simulations corrigées sera distinguée de sa version originale par le rajout d'un symbole "prime". Elles seront donc désignées par A', B', C' et D'.

4.1.2 A : Pression cinétique

4.1.2.1. Analyse

A1. Le volet pédagogique de l'analyse montre que pour deux processus (Calcul des vitesses en fonction de la température et calcul de la pression instantanée P), l'étudiant visé par la simulation est néophyte en la matière, qu'aucun détail ni guidage n'est proposé à l'étudiant.

→ Nous avons choisi d'agir au niveau du guidage, et d'explicitier les processus textuellement.

A2. De même, les paramètres de sortie " $P=dp/dt$ " et " $N \cdot T/V$ " souffraient de cette incohérence, c'est-à-dire, peu de connaissances, peu de guidage et peu détaillés. De plus, les objectifs de la simulation tels que formulés par le concepteur et reproduits dans l'analyse pédagogique ne visaient pas la compréhension de la loi des gaz parfaits.

→ Conformément au point précédent (**A1**), le calcul de la pression instantanée sera exposé dans la version corrigée. Nous avons supprimé le paramètre " $N \cdot T/V$ ", décision confortée au point **A6**.

A3. Le volet ergonomique met en évidence l'absence de liens effectués entre les différentes composantes de la simulation. Les critères ergonomiques 2.2.1 et 2.2.3 du premier chapitre (page 33) relatifs à la structure de la simulation stipulent de même qu'il est souhaitable que la simulation soit séparée en zones distinctes et que des liens soient établis entre les éléments.

→ Nous avons réorganisé l'interface pour que les paramètres soient proches des éléments qu'ils contrôlent.

4.1.2.2. Type

A4. Cette simulation est de type Visualisation. L'auteur, sur la page contenant la simulation, montre que son objectif est principalement de montrer le phénomène, sans aller dans les détails, pour le rendre plus intuitif.

4.1.2.3. Recommandations

A5. Les recommandations communes suggèrent d'avoir une introduction autant détaillée que l'utilisateur connaît peu le phénomène. Les objectifs de la simulation montrent que cette simulation est destinée à des étudiants qui ne maîtrisent pas le sujet, nous avons donc rajouté une introduction. Les recommandations spécifiques au type visualisation indiquent de plus qu'un grand soin doit y être apporté, en termes de concision et de mise en forme.

A6. Les paramètres du type Visualisation ont également été modifiés. Afin qu'ils gagnent en simplicité, nous avons changé le champ qui permet d'entrer la température, en une série de différentes températures à choisir. Pour que le graphique soit plus compatible avec les habitudes des utilisateurs, nous avons aussi rajouté une légende. De même, afin que les paramètres soient peu nombreux, nous avons supprimé la possibilité de modifier la taille des particules, le paramètre "Step >>" ainsi que le paramètre " $N \cdot T/V$ ".

A7. Les recommandations spécifiques au type Visualisation demandent que les paramètres soient dispersés dans l'interface et liés spatialement aux éléments contrôlés. C'est pourquoi le bouton "clear" a été mis sous le graphe concerné, et les paramètres au dessus de la simulation, pour suivre le sens de lecture du haut vers le bas. Ces changements sont confirmés par le point **A3**.

A8. Il est recommandé que le guidage après l'expérience soit très court et léger. Nous l'avons donc limité à une phrase revenant sur les objectifs pédagogiques généraux de la

simulation. De plus, les compléments théoriques présents au début de la simulation ont été mis derrière des liens.

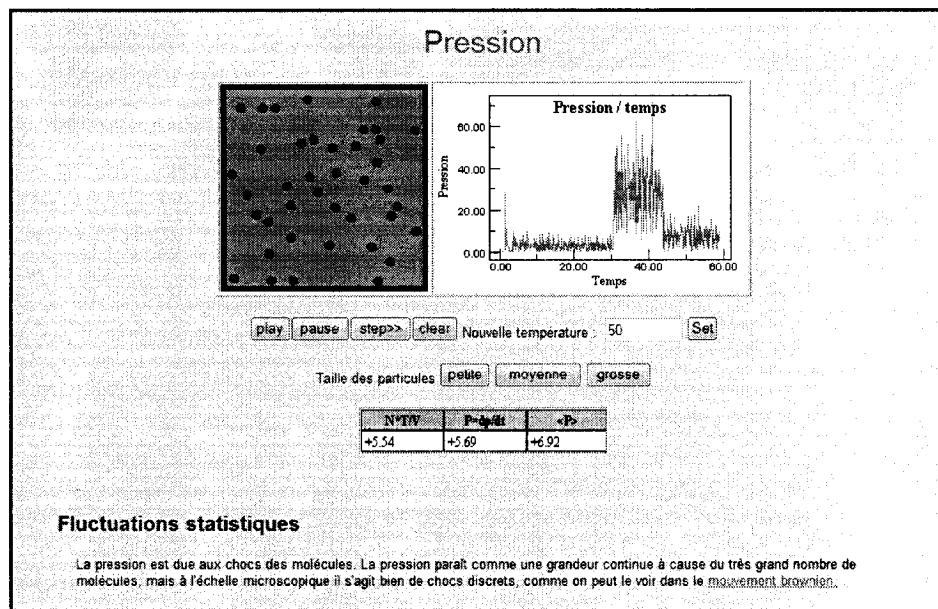


Figure 4.1 : Simulation A – Pression originale

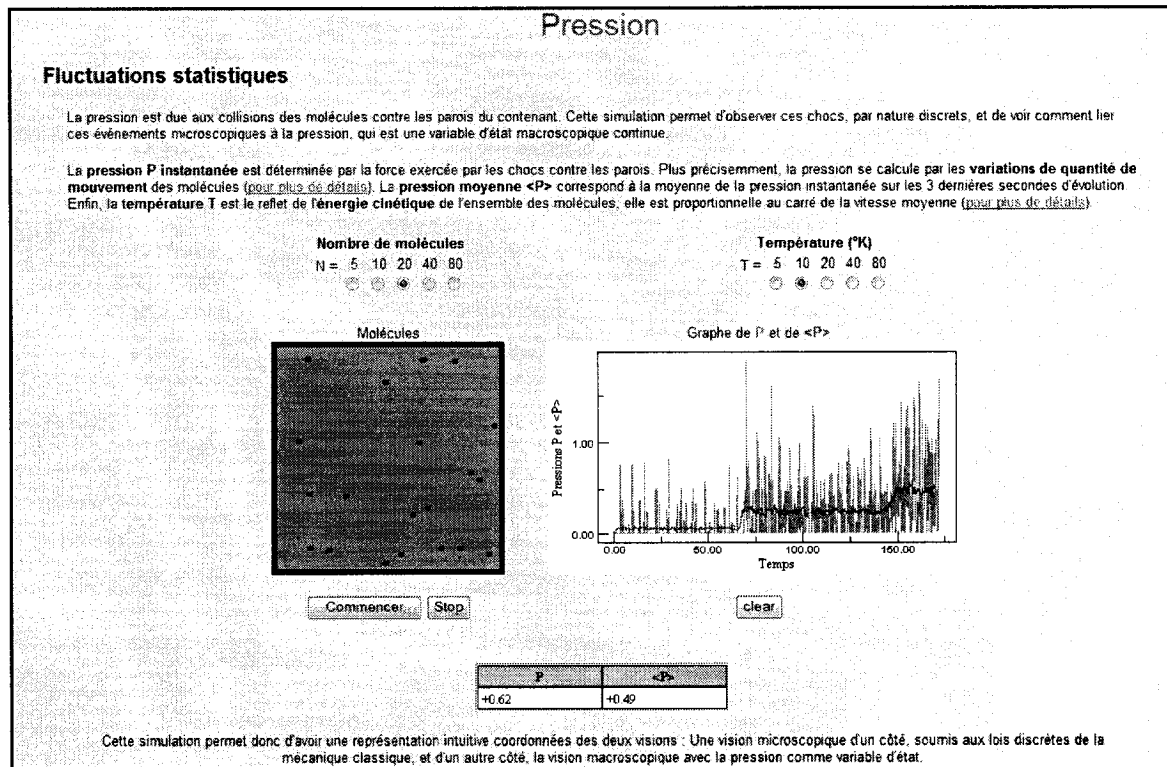


Figure 4.2 : Simulation A' – Pression corrigée

Tableau 4.3 : Simulation A – Résumé des modifications

A1. Explication textuelle des processus textuellement.
A2. Calcul de la pression instantanée exposé.
A3. Proximité des paramètres et des éléments contrôlés.
A5. Rajout d'une introduction concise et mise en forme.
A6. Choix d'un nombre fini de températures, suppression de la possibilité de modification de la taille des particules, suppression de "Step >>" et de " $N \cdot T/V$ ".
A7. Rajout d'une légende au graphe.
A9. Conclusion courte, calculs accessibles par un lien.

4.1.3 B : Séries de Fourier

4.1.3.1. Analyse

B1. Le volet pédagogique montre un manque au niveau de deux processus : Le calcul de la décomposition d'une fonction et le calcul de la fonction à partir des coefficients. En effet, ces deux processus sont au centre des objectifs de la simulation, l'étudiant y arrive sans maîtriser totalement le sujet il n'y a pourtant aucun guidage et rien n'est montré de ce processus.

→ Nous avons rajouté l'équation qui explique les deux calculs effectués.

B2. Les questions du volet ergonomique nous ont aussi amené à constater que plusieurs paramètres d'entrée et de sortie manquent de compatibilité avec les conventions.

→ Le choix des fonctions, auparavant effectué avec des boutons, a été changé en une liste. Des axes et des graduations ont été ajoutés aux graphiques des fonctions et des coefficients. De nombreux autres changements importants ayant été effectués sur cette simulation, nous avons limité les changements de cette catégorie. Mais notons que pour être complet, le curseur qui permet de choisir le nombre de termes de l'expansion devrait être surmonté d'un indicateur " $N=$ ", et que le son aurait pu être activé à l'aide d'une icône plutôt qu'une case à cocher.

4.1.3.2. Type

B3. L'examen du type de cette simulation met en évidence un défaut. En effet, on ne peut la placer dans un seul type de simulation car elle souhaite couvrir de nombreux domaines à la fois. Notre typologie défend l'idée selon laquelle les simulations devraient se focaliser sur un seul type d'objectif d'apprentissage générique. Cette simulation pourrait être divisée en deux simulations : La première montrerait l'équivalence entre les fonctions périodiques et leurs décomposées de Fourier, la deuxième montrerait comment différentes opérations de traitement de signal influent

sur la décomposition d'une fonction. Nous avons choisi de limiter la simulation au premier choix et d'en faire donc une simulation de type équivalence.

→ En conséquence, toutes les commandes relatives au traitement de signal ont été supprimées.

4.1.3.3. Recommandations

B4. Conformément aux recommandations générales sur la compatibilité des paramètres, on a rajouté aux graphes les noms des quantités tracées et des quadrillages. Puis nous avons changé la succession des boutons par une liste déroulante.

B5. Le guidage a été intégré directement à la simulation, en accord avec les recommandations générales qui préfèrent les simulations qui évitent les aller retour entre texte et manipulation. Le contenu du texte a cependant été gardé afin de ne pas cumuler trop de changements au même sujet.

B6. Les recommandations spécifiques au type Équivalence suggèrent de fournir les éléments nécessaires à la compréhension de la bijection qui existe entre les paramètres. Nous avons rajouté la formule générale de l'équivalence entre une fonction périodique et sa série de Fourier.

B7. Afin d'assurer l'équité de traitement spatial réservé respectivement au graphe de la fonction périodique et aux graphes des coefficients de Fourier, les grandeurs de ces graphes ont été réajustées.

Tableau 4.4 : Simulation B – Résumé des modifications

B1. Rajout de l'égalité de Fourier.
B2. Changement des boutons en une liste, rajout des axes et de graduation.
B3. Suppression des commandes relatives au traitement de signal.
B5. Intégration du guidage dans la simulation.
B7. Ajustement des tailles des graphes.

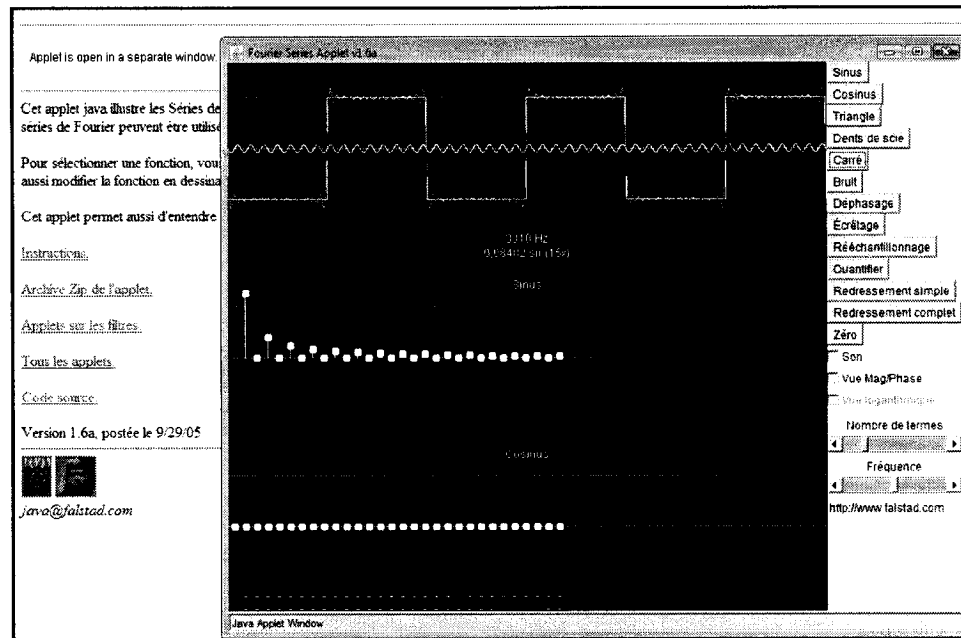


Figure 4.3 : Simulation B – Fourier originale

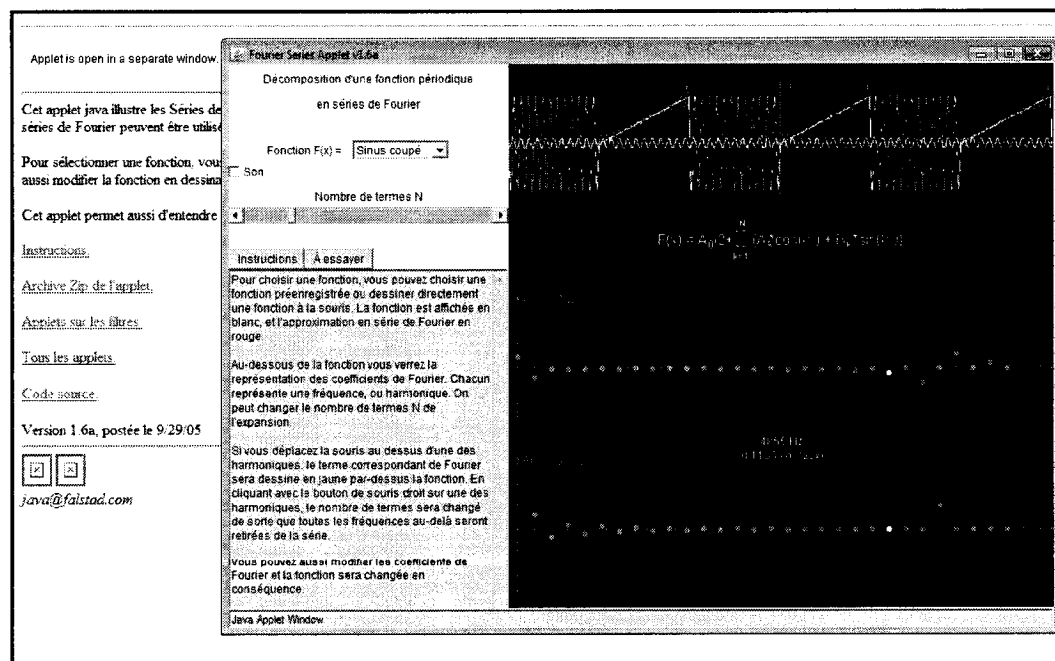


Figure 4.4 : Simulation B' – Fourier corrigée

4.1.4 C : Résonance

4.1.4.1. Analyse

C1. Le volet pédagogique mit en évidence que le processus de calcul de l'amortissement en fonction du facteur de qualité "Q" était à priori peu connu, alors que ce processus était caché et accompagné d'un guidage trop sommaire.

→ Nous avons donné à l'utilisateur la possibilité de faire varier directement la variable d'amortissement "h", plus connue.

C2. On constata aussi que les processus de résolution de l'équation des forces et du calcul du gain en fonction du facteur de qualité et de la fréquence étaient bien pourvus d'un guidage, mais que celui-ci était trop dilué dans le reste du texte, très long. Pourtant, ces processus sont des processus clé dans la simulation, comme le rappelle le point **C6**.

→ Nous avons rajouté un court guidage supplémentaire à l'intérieur de la simulation exposant des éléments clé de la simulation.

C3. Dans le volet ergonomique, le graphe gain/fréquence fut considéré comme peu compatible avec les usages scientifiques courants à cause de l'absence d'axes, d'unités et de légende.

→ Le point **C7** élimine ce graphique.

C4. Le même tableau de la partie ergonomique nous permet de constater que le lien établi entre les graphes et les mouvements de la masse et du ressort n'étaient pas suffisamment évidents.

→ Nous avons complété ce lien par l'ajout d'un trait semi-transparent entre les graphes et les objets.

C5. Après le rajout du paramètre "h" suite à la modification **C1**, l'analyse ergonomique aurait fait ressortir que ce paramètre n'était lié à aucune autre partie de la simulation.

→ Nous avons ajouté une modification de la couleur du liquide en fonction de l'amortissement. Une augmentation de l'amortissement se répercutant par une couleur plus foncée représentant une viscosité plus élevée.

4.1.4.2. Type

C6. Le texte présent sous la simulation permet de déterminer que cette simulation a pour objectif principal de montrer la dépendance existant entre le gain du système et la fréquence de l'excitation. C'est pourquoi la simulation a été classée dans le type dépendance.

4.1.4.3. Recommandations

C7. Les recommandations générales sur les paramètres et symboles suggèrent de porter attention aux éléments qui peuvent court-circuiter le raisonnement des utilisateurs. Le graphe du gain en fonction de la fréquence fait partie de ces éléments. En effet, il résume la connaissance principale que veut enseigner la simulation et on court alors le risque que l'expérimentation perde de sa pertinence. Le graphe a donc été supprimé.

C8. Conformément aux recommandations générales sur l'introduction, nous avons rajouté une introduction concise à l'intérieur de la simulation. Nous avons utilisé les effets recommandés de mise en valeur des informations importantes à l'aide des effets de gras et de variation de taille de police.

C9. En remplacement du graphe, nous avons choisi d'ajouter la valeur du gain de manière instantanée. Mais plutôt que donner le résultat de la formule pour une fréquence et un amortissement donnés, nous avons opté pour une approche qui donne des résultats plus bruts, en accord avec les recommandations générales sur les processus. Pour cela, nous avons rajouté une boîte qui indique le gain calculé à chaque instant, directement après chaque extremum du graphe oscillant. Ainsi, nous avons une

valeur qui oscille plus et peut parfois se faire attendre, mais qui reproduit une mesure plus réelle.

C10. On recommande pour le type Dépendance de définir précisément toutes les variables. Ces informations ont été rajoutées dans l'introduction et mises en évidence.

C11. Il est également recommandé pour l'organisation des simulations de type Dépendance de multiplier les liens. C'est ainsi que les noms des variables de la formule générale mise dans l'introduction ont été reproduits sous les paramètres d'entrée (fréquence et amortissement) et de sortie (graphes). De même, le changement de la valeur de l'amortissement s'accompagne d'un changement de la couleur du liquide (voir point C5). Et le lien entre les graphes et l'illustration du processus a été renforcé par un trait semi-transparent (point C4).

Tableau 4.5 : Simulation C – Résumé des modifications

C1. Remplacement de "Q" par "h".
C2. Ajout d'une introduction.
C4. Ajout d'un trait semi-transparent entre les graphes et l'animation.
C5. Modification de la couleur du fluide en fonction de l'amortissement.
C7. Suppression du graphe gain/fréquence.
C8. Introduction mise en forme pour mettre en relief les éléments importants.
C9. Ajout de la valeur instantanée du gain.
C10. Ajout de définition claire des variables.

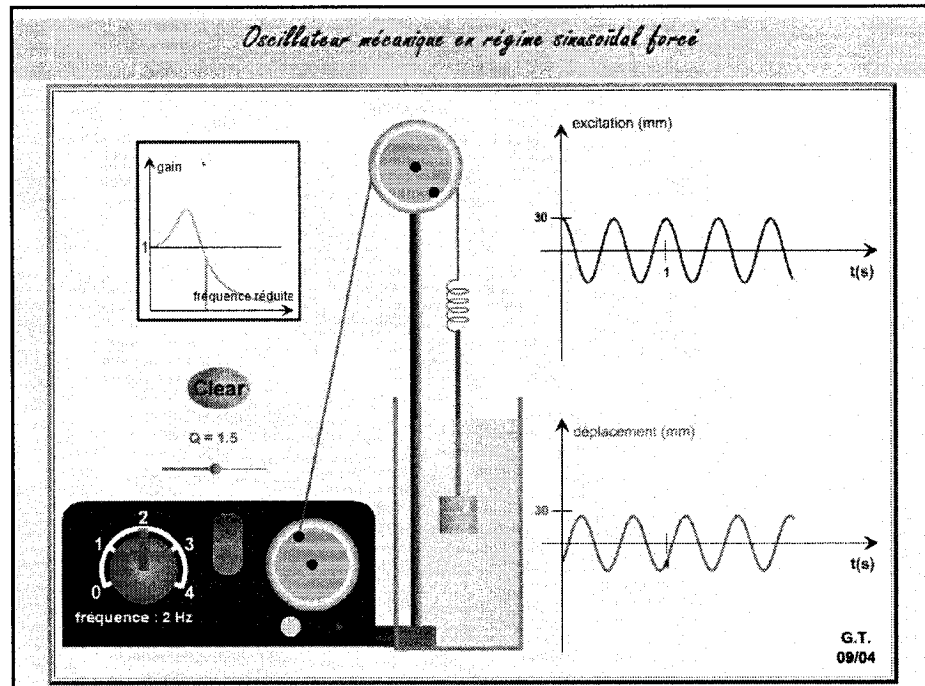


Figure 4.5 : Simulation C - Résonance originale

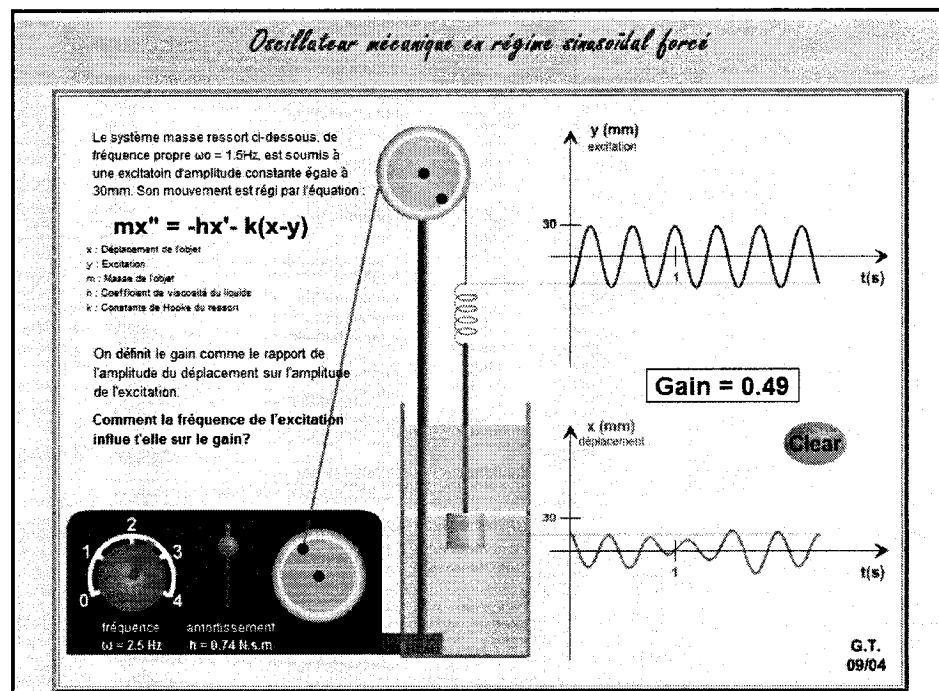


Figure 4.6 : Simulation C' - Résonance corrigée

4.1.5 D : Méthode des rectangles

4.1.5.1. Analyse

D1. L'analyse fonctionnelle nous a permis de constater que la simulation offrait des paramètres de représentation accessibles à l'aide d'un clic droit sur la simulation. Cependant il n'en est fait mention nulle part dans la simulation. Deux possibilités s'offraient, on pouvait soit spécifier l'existence de cette possibilité ou la retirer. Parmi les critères ergonomiques purs du premier chapitre, les critères 2.4.1, 2.4.2, et 2.4.3 relatifs à la charge de travail indiquent de plus qu'il est préférable d'avoir une zone d'attention évidente, une charge perceptive faible et un temps de navigation faible.

→ Nous avons donc retiré l'accès à cette possibilité.

D2. Le volet pédagogique de l'analyse nous amena à constater que les quantités mentionnées après "Inf =" et "Sup =" n'étaient pas vraiment explicitées dans la simulation, et que les quantités Inf et Sup n'étaient pas clairement définies.

→ Les intitulés "Inf" et "Sup" ont été rejetés au profit d'une dénomination textuelle plus parlante.

D3. L'analyse ergonomique nous fit remarquer que la manière de choisir les paramètres "a" et "b" n'étaient pas compatibles avec les attentes qu'aurait eues un utilisateur. En effet, les lignes verticales ne permettent pas de changer les valeurs de ces paramètres, il faut changer ces valeurs dans le volet de gauche.

→ Des points glissants ont été rajoutés pour permettre la modification interactive des paramètres "a" et "b".

D4. Lors de l'analyse ergonomique, nous avons noté qu'un des buts de la simulation était de voir la convergence des aires des rectangles vers l'aire théorique, valeur de la différence des intégrales. Pour montrer cela, les trois quantités ont été mises l'une en dessous de l'autre.

4.1.5.2. Type

D5. Le but annoncé par l'auteur est de regarder de quelle manière s'effectue la convergence de la méthode des rectangles, et d'examiner le processus pour différentes fonctions. Il s'agit donc du type processus, où l'emphase est plus portée sur la mise en place de la méthode des rectangles que sur l'obtention d'un résultat.

4.1.5.3. Recommandations

D6. Conformément aux recommandations générales sur les mécanismes de validation des paramètres, nous avons mis un bouton "ok" pour que l'utilisateur puisse saisir ses fonctions et valider son choix de manière simple et évidente.

D7. Cette simulation demande à l'utilisateur de saisir des fonctions. Nous avons suivi les recommandations générales concernant le guidage pendant l'expérience et avons rajouté des fonctions préenregistrées. Pour cela, des boutons ont été rajoutés sous la simulation et permettent l'utilisation de fonctions spécifiques.

D8. Les recommandations générales au sujet du guidage post expérimental suggèrent que des ouvertures soient faites vers des sujets connexes, sous forme de liens pour ne pas alourdir le texte. Nous avons donc inséré des liens vers l'intégration au sens de Lebesgue.

D9. Les recommandations spécifiques au type Processus nous indiquent que les paramètres doivent permettre d'observer les cas typiques, les cas limite afin d'éprouver le comportement du processus. Nous avons ainsi choisi nos fonctions préenregistrées de manière à ce que chacune aie un intérêt pédagogique.

D10. Il a été recommandé que les simulations de type Processus aient leur processus principal détaillé et décomposé si possible. Nous avons élargi le domaine de variation du nombre de rectangles "n", pour que l'utilisateur ait la possibilité de voir la convergence se faire et l'écart se resserrer.

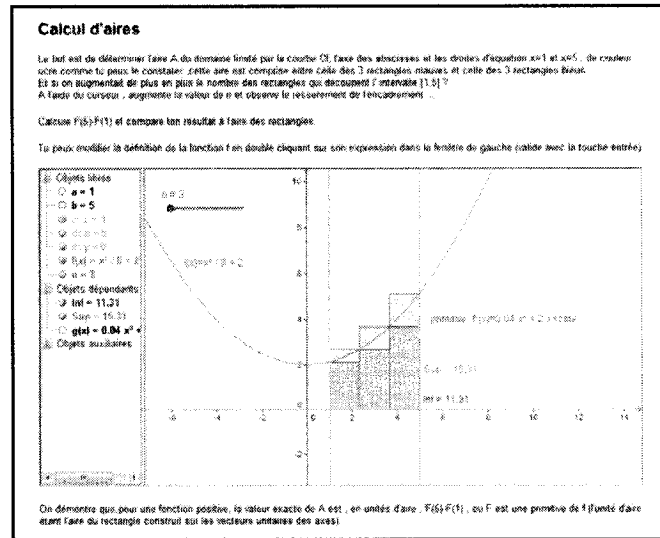


Figure 4.7 : Simulation D –Méthode des rectangles originale

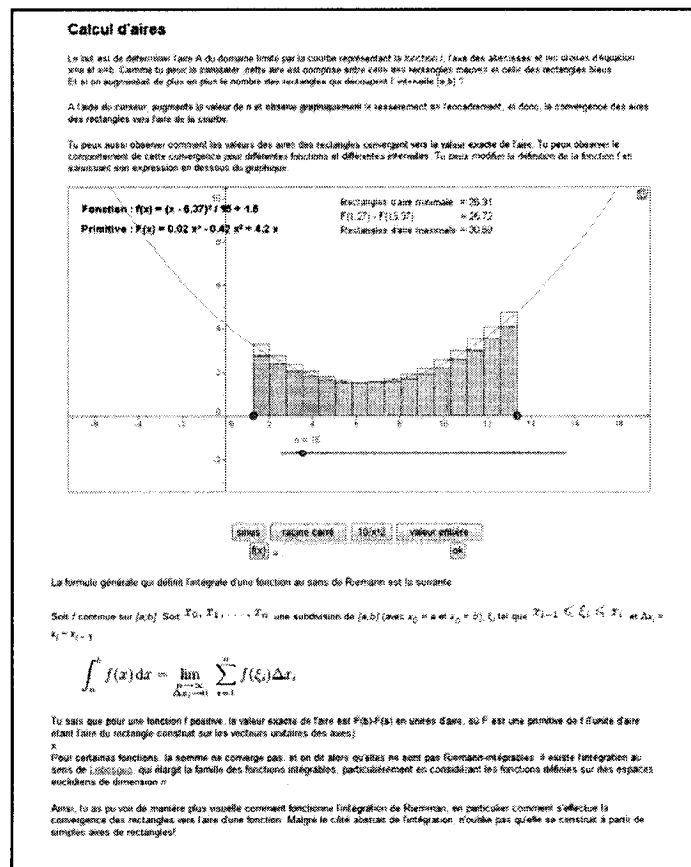


Figure 4.8 : Simulation D' –Méthode des rectangles corrigée

Tableau 4.6 : Simulation D – Résumé des modifications

D1. Suppression de l'accès aux modifications des paramètres de représentation.
D2. Remplacement de "Inf" et "Sup" par une dénomination textuelle.
D3. Rajout de points glissants pour modifier "a" et "b".
D4. Placement des trois quantités qui convergent l'une en dessous de l'autre.
D6. Rajout d'un bouton de validation de fonction "ok".
D7. Ajout de fonctions préenregistrées.
D8. Ajout de liens vers des informations sur l'intégration au sens de Lebesgue.
D10. Augmentation de la valeur maximale de "n".

4.2. Méthodologie

4.2.1 Sujets

Les sujets sont tous des étudiants de l'école Polytechnique de Montréal qui ont suivi le cours MTH2210 intitulé "Calcul scientifique pour ingénieurs" pendant le semestre d'été 2007 durant lequel les tests furent conduits. Ce cours est en majorité suivi par des étudiants de deuxième année de baccalauréat en génie, tous génies confondus. En choisissant nos sujets comme provenant d'un même cours, nous voulions assurer une certaine homogénéité du niveau scolaire, et être sûrs que les notions traitées par les simulations avaient toutes été déjà abordées dans des mesures comparables. Notons que ces deux objectifs n'ont été que partiellement remplis par ce choix. À l'intérieur de ce même cours existaient de nombreuses disparités, et des élèves de 2^{ème} année y côtoyaient des élèves finissants de 5^{ème} année. Leur niveau d'études ainsi que leur moyenne générale leur ont été demandés en vue de procéder à d'éventuels recoupements ultérieurs. Les sujets furent recrutés par courriel et lors d'une présentation faite en classe.

4.2.2 Critères d'évaluation

Les mesures ont porté sur la satisfaction, l'efficacité et la compréhension des utilisateurs.

4.2.2.1. Satisfaction

Pour apprécier le niveau de satisfaction des utilisateurs, un questionnaire leur fut soumis après chaque simulation, comportant cinq questions spécifiques à chaque simulation. Elles furent choisies pour apprécier les différences introduites entre les simulations, et la dernière question, commune à toutes les simulations demandaient de juger si la manipulation de l'outil avait augmenté leur compréhension. La réponse s'effectuait au moyen d'une échelle de Lickert libre, comportant uniquement les indicateurs extrémaux et un indicateur à la moitié.

Après la manipulation, les sujets étaient invités à formuler des commentaires oraux, ceux-ci furent alors discutés et notés. On leur a présenté l'autre version de chaque simulation, et il leur fut également demandé de formuler des commentaires oraux libres quant à leur appréciation des différences entre les deux versions.

Le tableau suivant expose les questions qui ont été choisies pour chaque simulation.

Tableau 4.7 : Critères de mesure de la satisfaction

A : Pression
1. Toutes les commandes présentes sont utiles.
2. Toutes les commandes nécessaires sont présentes; il n'en manque pas.
3. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).
4. Le texte autour de la simulation est indispensable.
5. Cette simulation a augmenté ma compréhension de la pression.
B : Fourier
1. Toutes les commandes présentes sont utiles.
2. Toutes les commandes nécessaires sont présentes; il n'en manque pas.

Tableau 4.7 : Critères de mesure de la satisfaction (suite)

3. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).
4. Les variables utilisées sont clairement définies.
5. Cette simulation a augmenté ma compréhension des séries de Fourier.
<i>C : Résonance</i>
1. Toutes les commandes présentes sont utiles.
2. Les variables utilisées sont clairement définies.
3. J'ai rapidement compris les objectifs de la simulation.
4. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).
5. Cette simulation a augmenté ma compréhension des phénomènes de gain et de résonance
<i>D : Méthode des rectangles</i>
1. Je me sens libre de faire ce que je souhaite.
2. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).
3. J'ai rapidement compris les objectifs de la simulation.
4. Toutes les commandes présentes sont utiles.
5. Cette simulation a augmenté ma compréhension du processus de calcul de l'aire.

4.2.2.2. Efficacité

Des indicateurs de performance furent enregistrés grâce au logiciel Morae⁵³. On mesura ainsi le temps d'utilisation de chaque simulation, le nombre de clics par minute, les temps maximaux d'attente entre deux interactions rapportés au temps

⁵³ Copyright 1995-2007 TechSmith, Inc.

d'utilisation – interprétables comme des pourcentages caractéristiques d'inactivité - et la distance parcourue par la souris. On nota aussi manuellement le nombre d'allers-retours entre le texte et la simulation.

Tableau 4.8 : Critères de mesure de l'efficacité

<i>Critères d'efficacité</i>
Temps d'utilisation
Pourcentage d'inactivité
Clics par minute
Distance parcourue par la souris
Nombre d'allers-retours entre le texte et la simulation

4.2.2.3. Compréhension

Pour mesurer l'atteinte des objectifs pédagogiques de chaque simulation, de courts examens de contenu furent soumis aux utilisateurs. Pour chaque simulation, trois questions discriminantes furent posées sur différentes notions de cours ciblées par la simulation. Les questions ont été établies avec le professeur Marc Laforest. Ces réponses étaient données par écrit sur le questionnaire. Pour chaque question, il leur fut également proposé d'indiquer si leurs réponses se basaient plus sur leurs connaissances antérieures ou ce qu'ils avaient observé dans la simulation. Ces réponses étaient données vis-à-vis des questions concernées, à l'aide d'une échelle de Lickert.

Tableau 4.9 : Critères de mesure de la compréhension

A : Pression
1. À l'aide d'un baromètre très précis placé dans l'air ambiant, on mesure la pression. Peut-on observer les mêmes fluctuations que celles observées dans la simulation? Pourquoi?
2. Quels sont les effets microscopiques et macroscopiques d'une augmentation de température?
3. Comment est calculée la pression instantanée P?
B : Fourier
1. Soit une fonction quelconque et sa décomposition en série de Fourier avec les coefficients en sinus et les coefficients en cosinus. Que se passe-t-il si on augmente légèrement le 100ième coefficient des cosinus?
2. Que donne la décomposition de la fonction $f(x) = 3 \sin(2x) + \cos(x)$ en séries de Fourier?
3. Que se passe-t-il lorsqu'on augmente le nombre de termes de la décomposition?
C : Résonance
1. L'excitation sinusoïdale crée un déplacement sinusoïdal de la masse. Est-ce que l'excitation et le déplacement ont mêmes amplitudes? Même fréquence? Même phase?
2. Comment l'amortissement du au fluide influe t'il sur le gain du dispositif?
3. Le phénomène de résonance (gain maximal autour d'une certaine fréquence) peut il s'observer pour tous les oscillateurs en régime sinusoïdal forcé?
D : Méthode des rectangles
1. À partir de la méthode des rectangles, comment peut-on approcher l'aire de fonctions tantôt négatives, tantôt positives?

Tableau 4.9 : Critères de mesure de la compréhension (suite)

2. La hauteur des rectangles dans la simulation était le maximum (et le minimum) pris par la fonction f sur l'intervalle. Si on prenait pour la hauteur du rectangle, la valeur prise par f au milieu de l'intervalle, la convergence se ferait t'elle? Obtient-on une meilleure ou une moins bonne approximation?
3. Avec quelles fonctions la convergence sera-t-elle plus lente?

4.2.3 Protocole

Le design expérimental choisi est une variante du design expérimental aléatoire à deux groupes avec un post-test. 20 étudiants ont manipulé les quatre simulations, parmi lesquelles pouvaient figurer des simulations corrigées comme des simulations originales. Le déroulement suivait le canevas suivant.

Introduction

- Présentation des objectifs généraux de la recherche
- Présentation et signature du formulaire de consentement de participation et de cession de droit d'image
- Installation du sujet au poste de travail
- Présentation d'un exemple de simulation (simulation 0)
- Explication du scénario de test
- Présentation de questions types correspondant à la simulation 0

Test de chaque simulation

- Manipulation de la simulation
- Questions de compréhension
- Commentaires libres sur la manipulation
- Questions relatives à l'expérience
- Présentation de l'autre version de la simulation
- Commentaires libres sur les différences

Conclusion

- Questionnaire général d'identification du sujet
- Remise de la compensation financière et signature du reçu

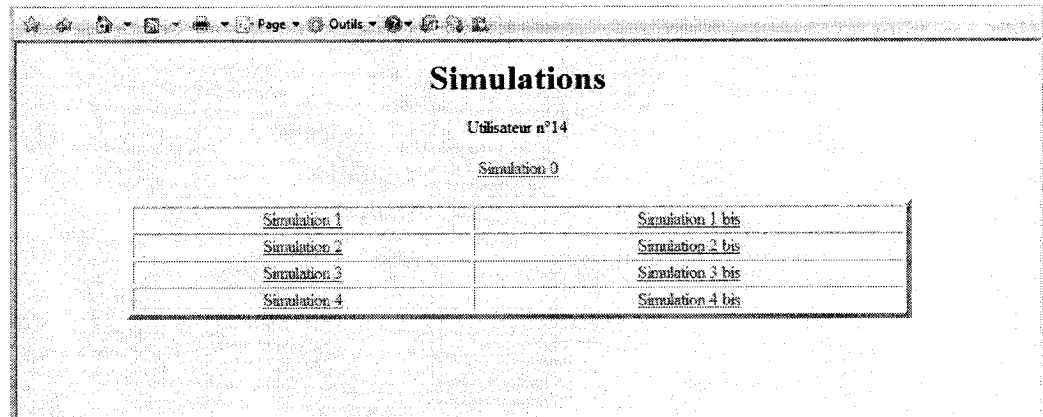


Figure 4.9 : Page Internet présentée au sujet

Les sections suivantes permettront de préciser chaque étape du protocole expérimental.

4.2.3.1. Présentation des objectifs généraux

Les sujets sont informés qu'ils devront tester des simulations en tant qu'utilisateurs à des fins de comparaison. On leur spécifie que pour chaque simulation, il y a deux versions. On leur signale que les deux diffèrent par des éléments qui ont été tantôt enlevés, tantôt ajoutés, tantôt modifiés, et qu'on teste les différences qui existent entre les différentes versions. À chaque fois, il a été assuré que l'étudiant ne sache pas que notre hypothèse expérimentale est qu'une version est supérieure à l'autre.

4.2.3.2. Formulaire

Une demande d'acceptation du projet de recherche a été soumise et approuvée au Comité d'éthique de la recherche avec des sujets humains de l'École Polytechnique de Montréal sous la référence CÉR-06/07-14. Conformément aux règles éthiques de la

recherche, les sujets ont signé un formulaire de consentement de participation fourni dans l'annexe 3 (page 139).

De plus, les sujets étaient filmés lors de l'expérimentation à des fins d'analyse de contenu. Dans l'éventualité où des extraits pourraient être utilisés dans le cadre de la promotion de ces travaux, un formulaire de cession de droit d'image leur a été proposé, dans lequel les sujets pouvaient nous autoriser à utiliser ces enregistrements audio et vidéo. Ce formulaire se trouve également en annexe (annexe 4, page 152).

4.2.3.3. Scénario

Le scénario expérimental est expliqué lors de la manipulation de la simulation 0. L'élève est chez lui et reçoit un courriel de son professeur, qui lui propose un lien vers une simulation qui l'aiderait à mieux comprendre le cours. L'objectif de l'étudiant est alors de comprendre le contenu traité par la simulation, d'en "faire le tour", de manière totalement libre. Aucune limite de temps ne leur est imposée, on les invite à ne pas commenter au fur et à mesure et ne pas faire appel à nous.

4.2.3.4. Simulation 0

Pour que les sujets soient suffisamment préparés et que la première simulation testée ne diffère pas trop des autres, nous leur avons montré une simulation préalablement à l'expérimentation. Cette simulation typique montre le fonctionnement d'un pendule double. L'expérimentateur manipule la simulation devant eux, en leur montrant ce qu'on peut faire, changer les paramètres, lire le texte, cliquer sur les liens.

Pour les préparer aux questionnaires qui viendront après les simulations à tester, l'expérimentateur énonce des exemples de questions qui auraient été posées après la manipulation de la simulation 0.

4.2.3.5. Séquences tests

Le tableau suivant montre les différentes séquences utilisées.

Tableau 4.10 : Séquences de tests

<i>Utilisateur</i>	<i>Séquence</i>			
Utilisateur 1	A	D'	B	C
Utilisateur 2	B	D	A	C'
Utilisateur 3	C'	A	D	B'
Utilisateur 4	D'	C'	B'	A'
Utilisateur 5	A	B	C'	D'
Utilisateur 6	B	A	D	C'
Utilisateur 7	B'	D'	C'	A'
Utilisateur 8	C	D	B'	A'
Utilisateur 9	D'	C'	A'	B
Utilisateur 10	A'	C	B'	D
Utilisateur 11	B'	A'	C	D'
Utilisateur 12	C	B	A'	D
Utilisateur 13	C	D	A	B
Utilisateur 14	D	A'	C'	B'
Utilisateur 15	A'	C	D'	B
Utilisateur 16	B	C'	A'	D
Utilisateur 17	A	D'	C	B'
Utilisateur 18	D'	B'	A	C
Utilisateur 19	C'	B'	D	A
Utilisateur 20	D'	C	B	A

Cette distribution a été construite dans la volonté qu'elle se conforme avec les divers éléments suivants :

- Fréquences d'apparition des 8 simulations égales (autant de A que de A' que de B, ...)

- Positions des simulations dans l'ordre des essais équiprobables (autant de A en $j^{\text{ème}}$ position que de B' en $j^{\text{ème}}$ position, ...)
- Fréquences des couples égales (autant de A suivis de B que de D suivis de C, ...)
- Nombre de simulations corrigées par essai correspondant à ceux qu'on trouverait dans une distribution aléatoire (peu d'essais avec uniquement des simulations corrigées, ou uniquement des simulations originales)

Toutes les conditions étaient impossibles à réunir simultanément, notamment à cause du nombre de sujets retenus. Le tableau suivant résume les caractéristiques des séquences utilisées et précise pour chacune d'entre elles la valeur théorique attendue dans la colonne ou ligne **T**.

Tableau 4.11 : Caractéristiques des séquences de test

Fréquences d'apparition										
Simulation	A	B	C	D	A'	B'	C'	D'		T
Nombre	10	10	10	10	10	10	10	10		10
Positions des simulations dans l'ordre										
Simulation	A	B	C	D						T
1ère position	5	5	5	5						5
2ème position	4	4	6	6						5
3ème position	6	5	5	4						5
4ème position	5	6	4	5						5
Positions des simulations dans l'ordre (détails)										
simulation	A	B	C	D	A'	B'	C'	D'		T
1ère position	3	3	3	1	2	2	2	4		2,5
2ème position	2	2	3	3	2	2	3	3		2,5
3ème position	3	2	2	3	3	3	3	1		2,5
4ème position	2	3	2	3	3	3	2	2		2,5

Tableau 4.11 : Caractéristiques des séquences de test (suite)

Fréquences des couples						
... suivie de ...		A	B	C	D	T
Simulation...	A	-	3	6	6	5
	B	7	-	3	4	5
	C	4	7	-	5	5
	D	4	5	6	-	5
Distribution des simulations corrigées						
simulations corrigées		0	1	2	3	4
Nombre de séquences		1	5	9	3	2
T		1,3	5	7,5	5	1,3

4.2.3.6. Questionnaires

Les différents questionnaires ont été établis selon les préoccupations décrites dans la partie précédente sur les critères d'évaluation de satisfaction et de compréhension. Ils sont fournis dans l'annexe 5 (page 153).

4.3. Résultats

Pour chaque critère numérique, nous avons calculé la moyenne ainsi que l'écart type pour la version originale et la version corrigée, puis l'évolution en pourcentage des valeurs. Afin de déterminer si les évolutions étaient significatives, nous avons appliqué un t-test aux distributions. Ce test prend en compte la moyenne et l'écart type et donne une valeur positive, qui est d'autant plus forte que les distributions sont différentes. En fonction de la grandeur de l'échantillon et de la confiance que l'on veut accorder au test, il existe une valeur seuil au-delà de laquelle le t-test signale une différence significative. Dans notre expérience, nous avons choisi de déclarer comme significatives les évolutions caractérisées par un t-test supérieur à 1,8 ($p < 0.05$). Notons cependant que la fiabilité de ce test statistique n'est pas optimale dans ce cas. En effet, les conditions d'application ne sont pas toutes réunies. En dépit de ces limites, nous l'avons choisi car il nous a permis d'obtenir un indice de significativité de différence.

Les tableaux des résultats vont présenter pour chaque critère la moyenne et l'écart type du critère pour la version originale, la moyenne et l'écart type pour la version corrigée, l'évolution entre les deux moyennes, puis la valeur du t-test, comme précisé dans le tableau 4.12 . De plus, les lignes remarquables ont été mises en gras.

Tableau 4.12 : Présentation des tableaux

<i>X : Simulation X (note sur N)</i>	<i>original</i>		<i>corrigé</i>		<i>évolution</i>	<i>t-test</i>
Qi : Nom du critère	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	évolution	t-test

4.3.1 A : Pression cinétique

Tableau 4.13 : Simulation A – Satisfaction

<i>A : Pression (note sur 10)</i>	<i>original</i>		<i>corrigé</i>		<i>évolution</i>	<i>t-test</i>
QS1 : Commandes utiles	8,00	1,79	8,50	1,43	6%	0,65
QS2 : Manque pas de commandes	5,80	2,44	8,00	1,84	38%	2,2
QS3 : Utilisateur pas perdu	8,80	0,98	8,70	1,19	-1%	0,19
QS4 : Texte indispensable	7,00	1,47	8,30	1,68	19%	1,8
QS5 : Compréhension augmentée	6,80	1,72	6,95	2,78	2%	0,14

Les résultats montrent que la satisfaction des utilisateurs augmente ou stagne selon les critères. En particulier, on note que la version corrigée est jugée plus complète au niveau des commandes. Pourtant, dans les commandes de la version corrigée, nous avons juste remplacé le contrôle de la taille des particules par leur nombre, et retiré d'autres commandes. Le texte a été perçu comme plus utile et pertinent dans la version corrigée. Remarquons cependant le grand écart type à la cinquième question de la version corrigée, qui tend à montrer que les sujets sont loin d'être unanimes pour reconnaître les apports de la simulation. Excepté cette dernière question, les utilisateurs ont attribué des notes élevées à cette simulation.

Tableau 4.14 : Simulation A - Efficacité

A : Pression	original		corrigé		évolution	t-test
QP1 : Temps d'utilisation (s)	474,41	248,24	365,04	158,19	-23%	1,1
QP2 : Nombre de lectures	1,86	0,99	2,60	1,43	40%	1,3
QP3 : Distance (pixels)	42419,57	21913,12	32727,62	13882,63	-23%	1,1
QP4 : clics/minute	12,65	3,36	6,29	2,48	-50%	4,5
QP5 : Pourcentage d'inactivité	12,13%	9,41%	21,57%	9,14%	78%	2,1

De grandes différences sont à remarquer quant à l'utilisation de la simulation. On remarque que parallèlement à une baisse du temps d'utilisation, les utilisateurs ont été moins actifs avec la version corrigée. Ils ont manifestement plus pris le temps d'observer le graphique et les molécules, au lieu de multiplier les changements de paramètres sans en observer les conséquences. Ceci a été observé de manière empirique par l'expérimentateur qui a remarqué que les sujets prenaient le temps de laisser s'établir les paliers de pression. D'un strict point de vue de l'utilisabilité, il est appréciable de constater que les mêmes fonctions ont été atteintes avec moins d'efforts de la part de l'utilisateur.

Tableau 4.15 : Simulation A – Compréhension

A : Pression (note sur 2)	original		corrigé		évolution	t-test
tps (minutes)	4,25	0,97	5,10	2,12	20%	1,09
QC1 : pression ambiante	0,60	0,49	0,60	0,62	0%	0
QC2 : Augmentation de T	1,45	0,65	1,80	0,40	24%	1,38
QC3 : Calcul de P	0,3	0,64	1,25	0,60	317%	3,2

Globalement, les sujets ont pris plus de temps pour répondre aux questions, alors que leurs résultats ont sensiblement augmenté. En particulier, les sujets n'avaient pas du tout compris ce que représentait la pression dans la première version (note moyenne de 0,3/2,0). C'est seulement dans la version corrigée qu'ils mentionnent que la pression P instantanée est calculée grâce aux chocs des molécules contre la paroi, ce qui était un objectif pédagogique principal de la simulation.

4.3.2 B : Séries de Fourier

Tableau 4.16 : Simulation B – Satisfaction

B : Fourier	original		corrigé		évolution	t-test
QS1 : Commandes utiles	7,50	1,96	7,90	2,59	5%	0,37
QS2 : Manque pas de commandes	7,70	2,37	7,00	2,65	-9%	0,59
QS3 : Utilisateur pas perdu	4,30	2,76	5,35	2,26	24%	0,88
QS4 : Variables définies	4,90	2,39	7,00	1,79	43%	2,1
QS5 : Compréhension augmentée	4,80	3,28	6,30	2,69	31%	1,06

La tendance observée pour la satisfaction est à l'augmentation globale. Nous avons enlevé de très nombreuses commandes dans la version corrigée. Pourtant, les utilisateurs n'ont pas sanctionné de manière significative ces retraits lorsqu'il leur a été demandé s'il manquait des commandes. Ils ont particulièrement remarqué le fait que les variables étaient mieux définies dans la version corrigée. Cette simulation a des notes qui sont en moyenne très faibles et caractérisées par de grands écarts types; de nombreux utilisateurs se sont montrés désarçonnés par cette simulation. Nous avons noté que les utilisateurs qui avaient apprécié cette simulation étaient ceux qui avaient le plus compris ce qu'étaient les séries de Fourier. Cette remarque se confirme par les données recueillies. Dans le questionnaire final, nous avons demandé aux utilisateurs de juger leur niveau dans chaque thème traité par les simulations. Nous avons noté une corrélation de 0,3 entre les notes de satisfaction et leur auto-évaluation de niveau au sujet des séries de Fourier ; pour les autres simulations, cet indice est à 0,0.

Tableau 4.17 : Simulation B – Efficacité

B : Fourier	Original		Corrigé		évolution	t-test
QP1 : Temps d'utilisation (s)	569,59	263,65	456,89	168,78	-20%	1,07
QP2 : Nombre de lectures	3,67	2,94	3,22	1,99	-12%	0,37
QP3 : Distance (pixels)	75593,01	41581,43	50187,59	21486,89	-34%	1,6
QP4 : clics/minute	17,85	8,76	16,08	7,40	-10%	0,46
QP5 : Pourcentage d'inactivité	9,28%	4,24%	9,70%	4,48%	5%	0,2

Pour cette simulation également, le temps moyen d'utilisation a été réduit et l'écart type correspondant aussi. De même, les mouvements de la souris ont été revus à la baisse dans la version corrigée. De manière générale, les sujets ont été plus efficaces dans le sens ou moins d'actions ont été nécessaires avant qu'ils déclarent avoir fait le tour de la simulation. Les différences ne sont cependant pas significatives statistiquement. Nous avons noté une attitude typique chez les utilisateurs de la version originale de cette simulation. Dès l'ouverture de la simulation, ils ont cliqué sur tous les boutons les uns à la suite de l'autre, sans prendre le temps d'observer les conséquences de leurs clics. Plusieurs fois au cours de la même expérimentation, ce comportement se répétait. Ces actions n'ont pas forcément du sens, en particulier l'enchaînement d'un redressement simple avec un redressement complet que les étudiants répètent pourtant.

Tableau 4.18 : Simulation B – Compréhension

B : Fourier	Original		Corrigé		évolution	t-test
tps (minutes)	4,44	1,17	3,00	1,15	-33%	2,6
QC1 : augmentation de A100	0,30	0,60	0,55	0,65	83%	0,85
QC2 : décomposition	0,45	0,72	0,50	0,67	11%	0,15
QC3 : augmentation de N	0,8	0,33	0,9	0,37	13%	0,6

Les questions ont été répondues dans un temps moindre, et pour des résultats meilleurs. Cependant, le test-t appliqué aux réponses montre que les différences ne sont pas significatives. Nous parlerons donc d'une tendance d'amélioration de la compréhension des objectifs pédagogiques de la simulation. Notons que les notes sont remarquablement faibles.

Rajoutons que cette simulation est la deuxième préférée des utilisateurs ce qui peut sembler paradoxal au vu de ces faibles scores. L'explication semble être à chercher dans le niveau des sujets pour les séries de Fourier. Sur une échelle de 1 (niveau très faible) à 5 (niveau élevé), les sujets ont jugé leur niveau à une moyenne de 2,9, soit la plus faible des simulations, couplée à un écart type de 1,2, soit le plus élevé.

L'expérimentateur a relevé de manière empirique que de nombreux étudiants n'avaient pas compris ce qu'était une série de Fourier, ce qui rendait l'expérimentation ardue. Cette remarque est corroborée par la corrélation remarquée entre l'auto évaluation du niveau des étudiants et la note obtenue à ces questions. Cet indice est en effet à 0,3, alors qu'il est à 0,4 pour la simulation A, 0,1 pour C et 0,0 pour D.

4.3.3 C : Résonance

Tableau 4.19 : Simulation C – Satisfaction

C : Résonance	original		Corrigé		évolution	t-test
QS1 : Commandes utiles	8,30	1,00	8,65	1,21	4%	0,67
QS2 : Variables définies	6,10	2,47	7,85	2,03	25%	1,64
QS3 : Objectifs vite compris	5,30	2,37	7,95	1,54	40%	2,8
QS4 : Utilisateur pas perdu	6,30	2,15	8,30	1,47	27%	2,3
QS5 : Compréhension augmentée	5,80	1,89	7,20	2,09	22%	1,49

La satisfaction des utilisateurs a cru de manière significative avec la version corrigée. De plus, les écarts type ont été réduits ce qui tend à prouver que les réponses ont été plus unanimes. Le simple ajout d'un court texte introductif a été fortement remarqué par les étudiants qui ont révélé avoir compris rapidement les objectifs de la simulation et ne pas avoir été perdus par rapport à la version initiale. Quand nous avons demandé de manière informelle s'ils préféraient le graphe ou l'introduction, tous ont hésité avant de dire préférer l'introduction. La satisfaction des utilisateurs est globalement élevée, surtout pour la version corrigée, et cette simulation fut la première simulation préférée des sujets.

Tableau 4.20 : Simulation C - Efficacité

C : Résonance	original		Corrigé		évolution	t-test
QP1 : Temps d'utilisation (s)	657,84	318,40	495,60	121,89	-25%	1,4
QP2 : Nombre de lectures	4,30	3,00	2,67	1,05	-38%	1,5
QP3 : Distance (pixels)	61816,19	31767,85	54589,87	28196,32	-12%	0,51
QP4 : clics/minute	7,42	3,86	8,00	3,65	8%	0,32
QP5 : Pourcentage d'inactivité	18,95%	13,10%	13,02%	9,57%	-31%	1,1

La correction de cette simulation a aussi modifié les comportements des sujets. Le temps d'utilisation, le nombre d'aller-retour entre le texte et la simulation, et les mouvements de la souris ont diminué. Ceci s'inscrit dans une tendance d'utilisation plus efficace de la simulation, si cependant les objectifs pédagogiques ont été atteints. Notons que nous avons ajouté du texte dans la version corrigée et que le nombre de lectures du texte situé en dessous de la simulation diminue. Ainsi, le texte d'introduction a bien une importance supérieure, et les commentaires des utilisateurs corroborent cette hypothèse. Ils ont en effet fortement apprécié la présence d'un texte concis au début de la simulation. Enfin, la quantité que nous avons définie comme caractéristique d'un pourcentage d'inactivité a diminué. Avec le fait que les objectifs ont été plus vite compris, et que les utilisateurs se sont sentis moins perdus, on peut interpréter cette diminution par une compréhension plus rapide de la simulation au démarrage de celle-ci. C'est-à-dire qu'à l'ouverture de la simulation, les sujets ont une période d'inactivité pendant laquelle ils observent l'animation pour la comprendre avant de la manipuler. Dans la version corrigée cette période a été de durée moindre.

Tableau 4.21 : Simulation C – Compréhension

C : Résonance	original		corrigé		évolution	t-test
tps (minutes)	5,00	1,41	4,00	2,16	-20%	1,15
QC1 : amplitude-fréquence-phase	1,05	0,57	1,20	0,78	14%	0,47
QC2 : Amortissement et gain	0,70	0,90	1,30	0,90	86%	1,4

Les objectifs pédagogiques ont été mieux atteints avec la version corrigée, comme le montrent l'accroissement des résultats et la diminution du temps de réponse. De nombreux contresens ont été relevés à la deuxième question, les étudiants n'avaient pas compris ce qu'était le facteur de qualité et sa relation avec l'amortissement. Il en a résulté qu'ils ont répondu que le gain du système augmentait lorsque l'amortissement augmentait, d'où une note nulle à la question, ce qui explique la note très basse et le grand écart type.

4.3.4 D : Méthode des rectangles

Tableau 4.22 : Simulation D - Satisfaction

D : Aire	original		corrigé		évolution	t-test
QS1 : Utilisateur se sent libre	7,20	1,93	8,00	2,11	11%	0,84
QS2 : Utilisateur pas perdu	7,70	1,21	8,60	1,56	12%	1,37
QS3 : Objectifs vite compris	7,75	1,95	9,10	0,97	17%	1,9
QS4 : Commandes utiles	7,50	2,17	8,95	1,59	19%	1,62
QS5 : Compréhension augmentée	7,50	1,48	5,15	2,37	-31%	2,5

La manipulation de cette simulation a été très appréciée par les sujets, qui lui ont attribué des notes élevées, et encore plus pour la version corrigée. Ainsi, la tendance est à l'augmentation, et de manière plus significative pour la compréhension des objectifs. Pourtant, un fait intéressant est à noter, à savoir que les sujets déclarent que la simulation corrigée n'a pas augmenté leur compréhension du sujet (note moyenne de 5,15/10), alors qu'ils jugeaient que la simulation initiale les aidait mieux. Pour cinq utilisateurs sur les 20, la simulation D' corrigée offrait moins de fonctionnalités que la simulation D. La barre de gauche semblait donner un aspect plus sérieux à la simulation, et ces utilisateurs déclaraient que la version originale était plus complète. Pourtant, bien que l'interface ait été simplifiée, aucune fonction n'a été enlevée. Les changements effectués ont donc donné la mauvaise impression que la version corrigée avait moins de poids scientifique, que la version initiale.

Tableau 4.23 : Simulation D - Efficacité

D : Aire	Original		corrigé		évolution	t-test
QP1 : Temps d'utilisation (s)	451,34	211,44	431,09	216,02	-4%	0,2
QP2 : Nombre de lectures	2,11	1,20	2,22	1,23	5%	0,19
QP3 : Distance (pixels)	50148,84	29100,07	44994,84	20935,99	-10%	0,43
QP4 : clics/minute	11,49	4,56	6,70	1,94	-42%	2,9
QP5 : Pourcentage d'inactivité	16,36%	15,07%	14,32%	9,36%	-12%	0,34

De même que pour les autres simulations, les sujets ont effectué moins d'actions pour la version corrigée. On remarque notamment que le nombre de clics par minute a fortement diminué, alors que la version corrigée offrait plus de possibilités de modifications à la souris. Les autres évolutions sont moins significatives.

Tableau 4.24 : Simulation D - Compréhension

D : Aire	original		corrigé		évolution	t-test
tps (minutes)	6,00	2,26	5,00	2,83	-17%	0,82
QC1 : Positif-négatif	0,70	0,78	1,10	0,83	57%	1,05
QC2 : Hauteur milieu	1,70	0,64	1,40	0,92	-18%	0,8
QC3 : Convergence lente	0,7	0,87	0,85	0,78	21%	0,39

Le temps de réponse aux questions a diminué, et comme pour les autres simulations, on constate que les résultats sont meilleurs. Cependant, la deuxième question a été moins bien répondue. Bien que cette diminution ne soit statistiquement pas significative, il convient de s'interroger sur cette moindre réussite. La question portait sur un des objectifs principal de la simulation, à savoir observer le processus de convergence, et la question proposait d'autres rectangles. Notre hypothèse expérimentale trouve donc ici une contradiction.

4.3.5 Discussion

4.3.5.1. Corrélation des résultats avec le niveau des étudiants

Dans le questionnaire final, il fut demandé à chaque étudiant de fournir s'il le désirait, sa moyenne générale. Nous avons noté qu'une faible corrélation (corrélation de 0,4) a été notée entre la moyenne générale des étudiants et leurs résultats moyens aux questions de compréhension.

Le questionnaire final demandait également à chaque étudiant d'auto évaluer ses connaissances antérieures dans chacun des domaines traités par la simulation. Ces données ont été examinées et des indices de corrélation en moyenne faibles ont été

trouvés entre les résultats aux questions de compréhension et le niveau initial (Simulation A : 0,4 ; Simulation B : 0,3 ; Simulation C : 0,1 ; Simulation D : 0,0) ; puis de même entre leurs réponses aux questions de satisfaction et le niveau initial (Simulation A : 0,0 ; Simulation B : 0,3 ; Simulation C : 0,0 ; Simulation D : 0,0).

4.3.5.2. Comportements

Typiquement, deux classes d'utilisateurs ont été mises en évidence lors de ces tests. La majorité de ces utilisateurs (13 sur les 20) ont un comportement que l'on pourrait qualifier d'hyperactif. Dès l'ouverture de la simulation, ils cliquent sur tout ce qui est portée. Ce n'est que dans une deuxième phase qu'ils lisent les textes d'accompagnement et commencent à rapporter leurs observations à leurs connaissances. Un deuxième comportement consiste à lire le plus de texte possible avant de commencer l'expérimentation, puis d'examiner chaque fonctionnalité de la simulation une à une. Nous n'avons pas de données pour le confirmer, mais il semble que le premier comportement est le plus efficace ; les "hyperactifs" essayent plus de fonctionnalités, sont plus rapides, sont plus satisfaits de leur expérience, et leur compréhension ne semble pas amoindrie.

4.3.5.3. Limites

Nous avons pu voir comment les résultats de l'expérimentation vont dans le sens des hypothèses émises. Globalement, les utilisateurs ont été plus satisfaits des simulations corrigées, ils ont été plus efficaces, et leurs résultats aux questions étaient meilleurs, à une exception près. Cependant, cette expérience montre plusieurs limites.

En particulier, les questions de compréhension posées aux étudiants étaient en faible nombre, et portaient sur les différences introduites dans la simulation. Il aurait fallu des tests plus complets pour mesurer si la compréhension des étudiants était effectivement meilleure que la simulation corrigée.

La relative faible significativité des évolutions est due en partie au faible échantillon, puisque chacune des huit simulations a été testée par uniquement dix utilisateurs.

Pour avoir des résultats plus pertinents, on pourrait compiler des questions théoriques portant sur toutes les simulations, et les poser toutes avant la manipulation. Après avoir manipulé toutes les simulations, les sujets auraient alors à répondre à un post test, comportant des variantes de chaque question posées dans le pré test. Ceci permettrait de mesurer plus précisément si une connaissance a été véritablement acquise lors de la simulation ou si elle était déjà connue.

4.3.5.4. Apports secondaires de la validation

Notre étude expérimentale nous a permis de voir quelles recommandations étaient particulièrement importantes.

- L'introduction nous a semblé revêtir un rôle capital. Sa concision et sa mise en forme doivent être l'objet de grands soins pour permettre aux utilisateurs de commencer la simulation dans de bonnes conditions. Notons que pour la simulation B sur les séries de Fourier et la simulation D sur la méthode des rectangles, les résultats ont été moins probants, et que les introductions de ces deux simulations n'ont pas subi de modifications. En particulier, l'absence de propos introductifs et de guidage directement dans la simulation B de Fourier originale a découragé beaucoup d'utilisateurs. Trois d'entre eux ont confié que s'ils avaient été chez eux et qu'ils avaient visité cette simulation sur conseil de leur professeur, ils ne l'auraient pas manipulée plus d'une minute.
- Le texte n'est que rarement lu en entier par les étudiants. Il faut donc veiller à limiter le flot d'informations que l'on souhaite mettre dans une simulation, et choisir les informations pertinentes. Il est également souhaitable de les structurer et de proposer d'autres informations par des liens.
- Les simulations doivent être robustes et être testées. En effet, la plupart des étudiants ont des comportements très actifs face à une simulation, et peuvent enchaîner toutes sortes de combinaisons de paramètres. Il faut veiller à ce que le moins d'erreurs possibles puissent survenir.

- Trois étudiants sur les 20 sujets ont manifesté de la réticence face au tutoiement dans la simulation D sur la méthode des rectangles. L'un d'entre eux, dès l'ouverture de cette simulation, a poussé un soupir face au tutoiement et a expliqué que les formules telles que "compare ton résultat" ou "tu peux modifier la définition de la fonction f" l'infantilisaient et diminuaient la crédibilité de la simulation.
- Cinq étudiants (donc un quart de l'échantillon) ont annoncé qu'ils préféraient des protocoles stricts qui leur disent quoi faire. Ceci rejoint un défaut mis en lumière dans le premier chapitre (paragraphe "Limites dans l'utilisation des simulations", page 29). Nous y avons reporté que les utilisateurs ne pouvaient que trop rarement savoir si ils avaient effectivement compris ce que la simulation voulait leur enseigner. L'expérience a mis en évidence cette crainte, et ces cinq étudiants ont annoncé leurs préférences pour des textes qui disent "quoi faire et quoi observer".

CONCLUSION

Nous avons pu remarquer au long de ce mémoire comment un professeur qui souhaiterait créer, sélectionner ou corriger des simulations aurait de la difficulté à être guidé avec les travaux qui existent. Inadaptés, peu précis, pas pratiques, trop spécialisés ou trop simples, aucun consensus ne se dégage et ils ne sont utilisés que localement. Pourtant, nous avons pu voir comme la littérature est souvent enthousiaste au sujet des simulations, alors que les études pratiques sont souvent plus nuancées. Ensuite, l'étude empirique a confirmé cet écart entre théorie et pratique. Nous y avons vu sur le terrain comment les simulations peuvent être perfectibles et à quel point la production était hétérogène.

Notre but a ainsi été de réaliser une recherche exploratoire et de proposer un guide d'amélioration et de conception des simulations. Nous avons exploré des connaissances techniques, didactiques, et ergonomiques, pour les adapter au cas précis de la conception de simulations en sciences aux niveaux secondaire, collégial et universitaire, accessibles sur Internet. Nous avons ainsi conçu un guide qui est composé d'une phase d'analyse, puis de recommandations. L'originalité du travail est que l'analyse est située, c'est-à-dire que l'analyse est effectuée dans un contexte explicite. De plus, une partie des recommandations est spécifique à différents cas isolés lors d'une classification des simulations.

Ce guide a été testé sur quatre simulations. Lors de cette validation, nous avons appliqué notre analyse et nos recommandations sur des simulations existantes et comparé les deux versions, la version originale et la version corrigée. Les résultats montrent que les étudiants sont plus satisfaits de leur expérience, qu'ils sont plus efficaces dans l'expérimentation, et qu'ils obtenaient de meilleures réponses aux questions théoriques qu'on leur posait, lorsqu'ils utilisaient la version corrigée.

Cette étude montre que peu de changements peuvent avoir des répercussions importantes sur l'expérience des utilisateurs, et rappelle les impacts des interfaces sur les utilisateurs. Cependant, il faudrait également mettre à l'épreuve le guide de manière systémique et étudier comment les professeurs peuvent utiliser le guide. Notons qu'une version logicielle interactive du guide est à l'étude ; celle-ci facilitera et automatisera l'analyse, puis proposera les recommandations adaptées.

Ce travail ouvre de nombreuses voies de recherche. Les recommandations que nous avons émises provenaient de la revue de littérature, de l'étude empirique et du bon sens. Il serait bienvenue de pouvoir examiner chaque point de manière rigoureuse afin d'obtenir au final un guide plus justifié et sûrement plus efficace. L'ergonomie trouve dans les simulations un domaine de recherche fertile et utile ; il serait intéressant d'examiner l'impact des interfaces de ces outils sur l'apprentissage qu'ils permettent. De même, nous avons suggéré par notre analyse située que les analyses d'évaluation ergonomique devraient s'inscrire explicitement dans le contexte de l'outil testé ; c'est là une voie intéressante qui apporterait de nombreux changements aux outils d'évaluation ergonomique actuels.

Finalement, les simulations sont une technologie complexe, à la croisée de plusieurs disciplines, dont la conception par des non spécialistes n'est pas évidente. Ce travail exploratoire a montré que leur potentiel était souvent manqué, et que quelques modifications peuvent les améliorer facilement.

BIBLIOGRAPHIE

ISO 13407:1999 Human-centred design processes for interactive systems.

ANDERSON, T. (1996). What in the world is constructivism? *Learning*, 24(5), 48-51.

JONASSEN, D.H., HANNUM, W.H., TESSMER, M. (1989). Handbook of task analysis procedures. Praeger, New York.

BANDURA, A., WALTERS, R. H. (1963). Social learning and personality development. Rinehart and Winston, New York.

BASTIEN, J.M.C. et SCAPIN, D. (1993). Ergonomic Criteria for the Evaluation of Human-Computer interfaces. Institut National de recherche en informatique et en automatique (INRIA), France.

BOUTIN, M. (2000). Revue de littérature pour les tests d'utilisabilité du site Web du CRIM. Montréal, CRIM, 2000.

BOWERS, J., et DOERR, H. (sous presse). Modeling and mathematizing in a computer-based microworld: Pre-service teachers' insights when studying the mathematics of change. <http://www.simcalc.umassd.edu/simcalcframe.html>

BROOKS, J. G. et BROOKS, M. G. (1993). The case for constructivist classrooms. Alexandria, VA: ASCD.

CHEN, F. S., et MILLER, W. G. (1997). A computer tutorial and simulation system for teaching digital function minimization, PhD, Iowa State University, Ames, Iowa, USA.

CHOLMSKY, P. (2003). Why GIZMOS Work : Empirical Evidence for the Instructional Effectiveness of ExploreLearning's Interactive Content.

<http://www.explorellearning.com>

CLEMENTS, D.H. et SARAMA, J. (2003). Strip Mining for Gold: Research and Policy in Educational Technology—A Response to "Fool's Gold". Educational Technology Review ; International Forum on Education Technology Issues and Applications. Vol 11. No. 1.

<http://www.aace.org/pubs/etr/issue4/clements.cfm>

CLEMENTS, D.H., and MCMILLEN, S. (1996). Rethinking "concrete" manipulatives. Teaching Children Mathematics : 2(5)

COUTANT, F. (2007). Étude empirique des simulations éducatives pour l'enseignement des sciences : vers une caractérisation des simulations. Actes du congrès de l'AIPU 2007.

CROWDER, N. (1959). Automatic tutoring by means of intrinsic programming. In E. H. Galanter (Ed.). Automatic Teaching: The State of the Art. New York : John Wiley et Sons.

DENNIS, J. R. (1979). Computer simulation and its instructional uses. The Illinois series on educational application of computer, University of Illinois.

DUMAS, J. S., REDISH, J. C. (1999). A practical guide to usability testing. Revised edition, Intellect.

FOSHAY, R., et AHMED, M. I. (2000). A Practical Process for Reviewing and Selecting Educational Software. PLATO Learning. Inc.. Bloomington. MN

GALITZ, W. O. (1997). The essential guide to user interface design: An introduction to GUI design principles and techniques. New York, NY: John Wiley & Sons.

GARDNER, C. M., SIMMONS, P. E., et Simmons, R. D. (1992). The effects of CAI and hands-on activities on elementary students' attitudes and weather knowledge. *School Science and Mathematics*, 92, 334-336.

GLATTHORN, A.A. (1994). Constructivism: Implications for curriculum. *International Journal of Educational Reform*, 3(4), 449-455.

HACKOS, J. T. et REDISH, J.C. (1998). User and task analysis for interface design. John Wiley & Sons.

HOOVER, E. J., et THOMAS, R. A. (1991). Simulations: An opportunity we are missing. *Journal of Research on Computing in Education*, 23(4), 497-513.

HORWITZ, P. et TINKER, R. (2001). Pedagogica to the Rescue : A Short History of Hypermodels. Concord Consortium, Vol 5. No. 1.

<http://www.concord.org/newsletter/2001spring/cover.html>

KAMTHAN, P. (1999) Java Applets in Education. IRT.org

<http://www.irt.org/articles/js151/index.htm>

KELLER, B., WASBURN MOOSES, J. et HART, E. (2002). Improving Students' Spatial Visualization Skills and Teachers' Pedagogical Content Knowledge by using On-Line Curriculum-Embedded Applets.

<http://illuminations.nctm.org/downloads/IsoPaperV4.pdf>

NORMAN, D.A. (1986). Cognitive Engineering, in Norman D.A. et Draper S., User Centered System Design : New perspectives on Human-Computer Interactions, Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, 31-61.

MAHER, C. (1991) Implementing a thinking curriculum in Mathematics. *Journal of mathematics behaviour*, 10(3), 219-224.

MARKS, G. H. (1982). Computer simulations in science teaching: An Introduction. *The journal of Computers in Mathematics and Science Teaching*, 1(4), 18-20.

MERGEL, B. (1998). Instructional Design and Learning Theory. Scholarly paper, University of Saskatchewan.

<http://www.usask.ca/education/coursework/802papers/mergel/brenda.htm>

NIELSEN, J. (1994). Heuristic evaluation. Dans J. Nielsen et R. L. Mack (Éds.), *Usability inspection Methods*, John Wiley & Sons, New York, NY

PIAGET, J. (1969). Psychologie et pédagogie. Gonthiers Denoël, coll. Médiations, Paris.

PHYE, G. D. et ANDRE, T. (1986). Cognition learning and education in cognitive classroom learning: Understanding, thinking and problem thinking. Gary D. Phye and Thomas Andre (eds.) New York: Academic Press.

RAVDEN, S. et JOHNSON, G. (1989). Evaluating Usability of Human-Computer Interfaces: a Practical Method. Halsted Press.

REBMANN G., JOUBERT, R. et DESMOND, Ph. (2000). Intégration de simulations dans l'enseignement de la physique en première année de DEUG, communication à la Journée de rencontre "Recherches sur l'enseignement scientifique supérieur et TICE"

RÉZEAU J. (2001). Médiatisation et médiation pédagogique dans un environnement multimédia, PhD, Université Bordeaux 2, Bordeaux, France.

ROBERT, J.-M. et FISET, J.Y. (1992). Conception et évaluation ergonomique d'une interface pour un logiciel d'aide au diagnostic : une étude de cas. ICO, vol. 4, no 1-2, 67-73.

ROSCHELLE, J. M., PEA, R. D., HOADLEY, C. M., GORDIN, D. N. et MEANS, B. M. (2000). Changing How and What Children Learn in School with Computer-Based Technologies. The Future of Children; Children and Computer Technology. Vol. 10. No. 2.
http://www.futureofchildren.org/information2826/information_show.htm?doc_id=69809

ROY M.-H. (2004). Le potentiel de l'utilisation des simulations pour l'apprentissage des mathématiques et des sciences au secondaire.

SCHULTE, P.L. (1996). A definition of constructivism. Science Scope, 20(3), 25-27.

SHANNON, R. E. (1975), Systems Simulation: The Art and Science, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.

SKINNER, B. F. (1968) The technology of teaching, Appleton Century Crofts, New York
 traduction française : La révolution scientifique de l'enseignement, Dessart, Bruxelles.

CRAMPTON SMITH, G. (2000): Design brief: Royal College of Art. In Interactions, 7 (2) pp. 54-58

THOMAS R.A., BOYSEN J.P. (1984). A Taxonomy for the Instructional Use of Computers.

VANDERDONCKT, J. (1994). Guide ergonomique des interfaces home-machine. Presses universitaires de Namur, Belgique.

VIRZI, R. A. (1992). Refining the test phase of usability evaluation : How many subjects is enough? *Human Factors*, 34, 457-468.

WATSON, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological Review*, 20, 158-177

WETHERILL, K., MIDGETT, C. et MCCALL, M. (2002). Determining the Impact of Applet-Based Instructional Materials on Teacher Knowledge of Content and Pedagogy, Instructional Planning, and Student Learning of Fractions. University of North Carolina at Wilmington.

WHITE, B. et FREDERIKSEN, J. (2000). Metacognitive Facilitation : An Approach to Making Scientific Inquiry Accessible to All.

<http://thinkertools.soe.berkeley.edu/Pages/paper.html#The%20Development%20of%20Physics%20Expertise>

WHITE, B., FREDERIKSEN, J., FREDERIKSEN, T., ESLINGER, E., LOPER, S. et COLLINS, A. (2002). Inquiry Island : Affordances of Multi-Agent Environment for Scientific Inquiry and Reflective Learning. Projet Thinker Tools, University of California, Berkeley. Proceedings of the Fifth International Conference of the Learning Sciences (ICLS).

<http://thinkertools.soe.berkeley.edu/Media/ICLS02.pdf>

WILENSKY, U. et WALTER, M. S. (2000). Neworked Gridlock : Students Enacting Complex Dynamic Phenomena with the HubNet Architecture. Center for Connected Learning & Computer-Based Modeling. The Participatory Simulations Project.

ANNEXE 1 : SIMULATIONS DE L'ÉTUDE EMPIRIQUE

N°	Adresse de la simulation
1	http://argento.bu.edu/java/java/2drw/RandWalk2D.html
2	http://faraday.physics.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/Flash/Chaos/ThreeBody/ThreeBody.html
3	http://www.slu.edu/classes/maymk/Applets/Riemann.html
4	http://mathdl.maa.org/images/upload_library/4/vol4/kaskosz/antapp.html
5	http://argento.bu.edu/java/java/dla2/dla.html
6	http://faraday.physics.utoronto.ca/PVB/Harrison/Flash/ClassMechanics/AirTrack/AirTrack.html
7	http://perso.orange.fr/jean-paul.davalan//proba/allu/index.html
8	http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Geometry/Roussel.shtml
9	http://www.walter-fendt.de/m11e/circleangles.htm
10	http://www.opensourcephysics.org/apps/stp/approach.html
11	http://math.furman.edu/~dcs/java/circle.html
12	http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Geometry/SlantedRack.shtml
13	http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/main.php?t=525
14	http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/main.php?t=41
15	http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/thermal/browian.html
16	http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/transistor/index.html
17	http://abcmaths.free.fr/terminales/sommesderiemanngeo.html
18	http://perso.orange.fr/jean-paul.davalan//algebre/lin/det/detnt.html
19	http://www.vias.org/simulations/simsoft_cenlimit.html
20	http://math.furman.edu/~dcs/java/change.html
21	http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electri/condo2.html
22	http://labo.ntic.org/ph11f/oscirc_f.html
23	http://www.falstad.com/coupled/
24	http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/oscillations/oscillator_coupled.html
25	http://hypo.ge-dip.etat-ge.ch/www/physic/simulations/champb/champB.html
26	http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/electro/lissajou.html
27	http://www.slu.edu/classes/maymk/banchoff/CriticalPoints.html
28	http://www.myphysicslab.com/dangle_stick.html
29	http://www.walter-fendt.de/m11e/circleangles.htm
30	http://www.chm.davidson.edu/ChemistryApplets/kinetics/RateOfReaction.html
31	http://labo.ntic.org/ph11f/n2law_f.html
32	http://gc.saliegue.fr/projet/Diffraction/diff.html
33	http://www.shodor.org/interactivate/activities/DirectableFire/
34	http://www.cut-the-knot.org/proofs/mediant.shtml
35	http://www.physics.northwestern.edu/ugrad/vpl/mechanics/pendulum.html
36	http://www.opensourcephysics.org/apps/mechanics/drivenchain.html
37	http://www.quantum-physics.polytechnique.fr/index.html
38	http://nlvm.usu.edu/en/nav/frames_asid_312_g_4_t_1.html
39	http://perso.orange.fr/jpq/proba/equidyn/index.htm
40	http://math.dartmouth.edu/~klbooksite/appfolder/214unit/ErrorFunction.html
41	http://www.math.ubc.ca/~feldman/demos/demo1.html
42	http://math.dartmouth.edu/~klbooksite/appfolder/304unit/EulersMethod.html
43	http://www.colorado.edu/physics/2000/bec/evap_cool.html
44	http://www.math.uri.edu/~bkaskosz/flashmo/nov11fin.html
45	http://enlvm.usu.edu/ma/nav/activity.jsp?sid=nlvm&cid=4_4&lid=273
46	http://math.dartmouth.edu/~klbooksite/appfolder/213unit/Newton.html
47	http://www.slu.edu/classes/maymk/Applets/Derivatives2.html
48	http://illuminations.nctm.org/ActivityDetail.aspx?ID=16

N°	Nom de la simulation	Matière	Langage
1	2-D Random Walk Java Applet	Sciences Physiques	Applets Java
2	3-Body Gravitational	Sciences Physiques	Flash
3	A Riemman Sums Applet	Mathématiques	Applets Java
4	Accumulated Change and Antiderivative Plotter	Mathématiques	Flash
5	Aggregation: Growing Fractal Structures	Sciences Physiques	Applets Java
6	AirTrack	Sciences Physiques	Flash
7	Allumettes de Banach	Mathématiques	Javascript
8	Angle Trisectors on Circumcircle	Mathématiques	Applets Java
9	Angles at the Circle	Mathématiques	Applets Java
10	Approach to Equilibrium	Autres	Applets Java
11	area of a unit circle	Mathématiques	Applets Java
12	Bottles in a Slanted Rack	Mathématiques	Applets Java
13	Bouncing Balls	Sciences Physiques	Applets Java
14	Brownian Motion	Sciences Physiques	Applets Java
15	Brownian Motion(physlets)	Sciences Physiques	Bibliothèques java
16	Building A Transistor	Autres	Applets Java
17	Calcul d'aires	Mathématiques	Outils auteurs
18	calculs matriciels	Mathématiques	Javascript
19	central limit theorem	Mathématiques	Exécutables
20	Change of variable	Mathématiques	Applets Java
21	Charge et décharge d'un condensateur	Sciences Physiques	Applets Java
22	Circuit électromagnétique oscillant	Sciences Physiques	Applets Java
23	coupled oscillations	Sciences Physiques	Applets Java
24	Coupled Oscillators	Sciences Physiques	Bibliothèques java
25	Courant et champ magnétique	Sciences Physiques	Bibliothèques java
26	Courbes de Lissajous	Sciences Physiques	Applets Java
27	critical points	Mathématiques	Applets Java
28	Dangling Stick	Sciences Physiques	Applets Java
29	Demonstrate Limits	Mathématiques	Applets Java
30	Determination of the Rate of Reaction	Autres	Bibliothèques java
31	Deuxième loi de Newton	Sciences Physiques	Applets Java
32	Diffraction de Fraunhofer	Sciences Physiques	Autres
33	Directable Fire	Mathématiques	Applets Java
34	Dots and Fractions	Mathématiques	Applets Java
35	double pendulum	Sciences Physiques	Applets Java
36	Driven Chain	Sciences Physiques	Applets Java
37	Dualité onde corpuscule	Sciences Physiques	Applets Java
38	Dueling calculators	Mathématiques	Applets Java
39	Équilibres dynamiques en chimie	Autres	Applets Java
40	error function	Mathématiques	Applets Java
41	Euler's Method	Mathématiques	Applets Java
42	euler's method (dartmouth)	Mathématiques	Applets Java
43	Evaporative Cooling	Sciences Physiques	Applets Java
44	Families of Functions	Mathématiques	Flash
45	Fill and Pour	Mathématiques	Applets Java
46	finding roots with Newton's method	Mathématiques	Applets Java
47	first and second derivative	Mathématiques	Applets Java
48	Flowing Through Mathematics	Mathématiques	Applets Java

N° Adresse de la simulation

- 49 http://labo.ntic.org/ph11f/lorentzforce_f.html
- 50 <http://www.surendranath.org/Applets/Oscillations/FDHM/FDHMApplet.html>
- 51 <http://www.math.ubc.ca/~feldman/demos/demo3.html>
- 52 <http://www.falstad.com/fourier/>
- 53 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/fourier/fourier.html>
- 54 http://enlvm.usu.edu/ma/nav/activity.jsp?sid=nlvm&cid=4_3&lid=136
- 55 http://www2.dsu.nodak.edu/users/edkluk/public_html/crt_aphys/m_gracc_h.html
- 56 <http://www.math.com/students/wonders/life/life.html>
- 57 <http://www.falstad.com/gas/>
- 58 http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/centralforces/central_force_RF.html
- 59 <http://www.ph.biu.ac.il/~rapaport/java-apps/gyro.html>
- 60 http://enlvm.usu.edu/ma/nav/activity.jsp?sid=nlvm&cid=4_5&lid=310
- 61 <http://cs.jsu.edu/mcis/faculty/leathrum/Mathlets/parts.html>
- 62 <http://web01.shu.edu/projects/realms/classes/Integrator.html>
- 63 <http://polymer.bu.edu/java/java/intermol/index.html>
- 64 http://www2.dsu.nodak.edu/users/edkluk/public_html/crt_aphys/m_kepler_h.html
- 65 http://comp.uark.edu/~jgeabana/mol_dyn/KinTh1.html
- 66 http://labo.ntic.org/ph11f/lawdecay_f.html
- 67 http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/optics4/laser.html
- 68 <http://perso.orange.fr/jpq/equadiff/botafumeiro/botafumeiro1.htm>
- 69 <http://www.chm.davidson.edu/ChemistryApplets/equilibria/Temperature.html>
- 70 http://www.vias.org/simulations/simusoftware_lenses.html
- 71 <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/lenzlaw/index.html>
- 72 <http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/equadiff/vanderpol.html>
- 73 <http://perso.orange.fr/jpq/proba/cereales/index.htm>
- 74 <http://illuminations.nctm.org/ActivityDetail.aspx?ID=120>
- 75 <http://hypo.ge-dip.etat-ge.ch/www/physic/simulations/optique/oeil.html>
- 76 <http://www.ph.biu.ac.il/~rapaport/java-apps/lorenz.html>
- 77 <http://argento.bu.edu/java/java/winning/WinningStreak.html>
- 78 <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/magneticclines2/index.html>
- 79 <http://www.surendranath.org/AppletsJ2.html>
- 80 <http://www.colorado.edu/physics/2000/microwaves/mwintro.html>
- 81 <http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Calculus/BoxVolume.shtml>
- 82 <http://www.opensourcephysics.org/apps/mechanics/pendulum.html>
- 83 http://www.vias.org/simulations/simusoftware_molform.html
- 84 <http://www.myphysicslab.com/molecule4.html>
- 85 http://www.myphysicslab.com/dbl_pendulum.html
- 86 <http://www.myphysicslab.com/RollerFlight.html>
- 87 http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/newt/newtmtn.html
- 88 <http://www.calvin.edu/~rpruim/java/jcm/newton.shtml>
- 89 <http://cs.jsu.edu/mcis/faculty/leathrum/Mathlets/newton.html>
- 90 <http://www.shodor.org/interactivate/activities/NormalDistribution/>
- 91 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/diff2/diff2.html>
- 92 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/grenz/grenz.html>
- 93 <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/ohmslaw/index.html>
- 94 http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Oscillateurs/ressort_rsf.html
- 95 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/main.php?t=39>
- 96 http://labo.ntic.org/ph11f/resonance_f.html
- 97 <http://www.math.uri.edu/~bkaskosz/flashmo/parcur/>
- 98 http://www.sciences.univ-nantes.fr/physique/perso/gtulloue/Meca/Charges/q_dans_EB1.html
- 99 <http://labo.ntic.org/meca/pendule.html>

N°	Nom de la simulation	Matière	Langage
49	Force de Laplace	Sciences Physiques	Applets Java
50	forced oscillations	Sciences Physiques	Applets Java
51	Fourier Series	Sciences Physiques	Applets Java
52	Fourier series (falstad)	Sciences Physiques	Applets Java
53	fourier series (maths online)	Mathématiques	Applets Java
54	Fractals - Mandelbrot and Julia Sets	Mathématiques	Applets Java
55	Free fall motion	Sciences Physiques	Applets Java
56	Game of Life	Mathématiques	Applets Java
57	Gas Molecules Simulation	Sciences Physiques	Applets Java
58	Gravitation	Sciences Physiques	Bibliothèques java
59	Gyroscopic motion	Sciences Physiques	Applets Java
60	Hamlet happens	Mathématiques	Applets Java
61	Integration by Parts	Mathématiques	Applets Java
62	Integrator	Mathématiques	Applets Java
63	Intermolecular Interactions	Sciences Physiques	Applets Java
64	kepler, newton, gravitation	Sciences Physiques	Applets Java
65	Kinetic Theory	Sciences Physiques	Applets Java
66	La loi de décroissance radioactive	Sciences Physiques	Applets Java
67	Laser Cavity	Sciences Physiques	Bibliothèques java
68	Le botafumeiro	Sciences Physiques	Applets Java
69	Le Chatelier's Principle	Autres	Bibliothèques java
70	Lenses	Sciences Physiques	Exécutables
71	Lenz's law	Sciences Physiques	Applets Java
72	L'équation de Van Der Pol	Sciences Physiques	Flash
73	Les images dans une boîte de cereals	Mathématiques	Applets Java
74	Light Bounce	Sciences Physiques	Bibliothèques java
75	L'oeil et ses défauts	Sciences Physiques	Bibliothèques java
76	Lorenz attractor	Mathématiques	Applets Java
77	Lottery Java Applet	Mathématiques	Applets Java
78	Magnet Poles	Sciences Physiques	Applets Java
79	magnetic field	Sciences Physiques	Applets Java
80	Marshmallows and the microwave oven	Sciences Physiques	Applets Java
81	Maximum Volume of a Cut Off Box	Mathématiques	Applets Java
82	Mechanics - Pendulum	Sciences Physiques	Applets Java
83	molecular formulas	Autres	Exécutables
84	molecule spring model	Sciences Physiques	Applets Java
85	MyPhysicsLab - Double Pendulum	Sciences Physiques	Applets Java
86	MyPhysicsLab - Roller Coaster with Flight	Sciences Physiques	Applets Java
87	Newtonian Mountain	Sciences Physiques	Applets Java
88	Newton's Method	Mathématiques	Applets Java
89	Newton's Method	Mathématiques	Applets Java
90	Normal Distribution	Mathématiques	Applets Java
91	Nowhere differentiable	Mathématiques	Applets Java
92	Numerical computation of series	Mathématiques	Applets Java
93	ohm's law	Sciences Physiques	Applets Java
94	Oscillateur mécanique en régime sinusoïdal force	Sciences Physiques	Flash
95	Oscillation and Wave (resonance)	Sciences Physiques	Applets Java
96	Oscillations forcées (résonance)	Sciences Physiques	Applets Java
97	parametric curves in 3D	Mathématiques	Flash
98	particule chargée dans des champs	Sciences Physiques	Flash
99	Pendule simple amorti	Sciences Physiques	Applets Java

N° Adresse de la simulation

- 100 http://labo.ntic.org/ph11f/cpendula_f.html
- 101 <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/meca/pendcoup1.html>
- 102 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/~hwang/Pendulum/Pendulum.html>
- 103 <http://perso.orange.fr/jean-paul.davalan//mots/comb/perm/ud.html>
- 104 <http://www.math.uah.edu/stat/applets/PoissonExperiment.xhtml>
- 105 <http://www.math.uah.edu/stat/applets/PokerExperiment.xhtml>
- 106 <http://labo.ntic.org/electri/wheatsto.html>
- 107 <http://cauchy.math.colostate.edu/Applets/PredatorPrey/predatorprey.htm>
- 108 <http://hypo.ge-dip.etat-ge.ch/www/physic/simulations/gaz/pression.html>
- 109 http://labo.ntic.org/ph11f/huygenspr_f.html
- 110 http://abcmaths.free.fr/terminales/produitcomplexe/complexeproduit_worksheet.html
- 111 <http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Games/ProizvolovGame.shtml>
- 112 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/main.php?t=24>
- 113 <http://www.sunsite.ubc.ca/LivingMathematics/V001N01/UBCExamples/Pythagoras/pythagoras.html>
- 114 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/gleich/gleich.htmlquadr2>
- 115 <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/main.php?t=229>
- 116 <http://www.gametheory.net/Mike/applets/Random/random.html>
- 117 <http://www.ies.co.jp/math/java/vector/v6kaku/v6kaku.html>
- 118 <http://gc.salieg.fr/projet/neurones/Hopfield.html>
- 119 <http://www.math.ubc.ca/~feldman/demos/demo5.html>
- 120 <http://math.dartmouth.edu/~klbooksite/appfolder/tools/RiemannSums.html>
- 121 <http://www.falstad.com/ripple/>
- 122 http://webphysics.davidson.edu/physlet_resources/centralforces/scattering_HD.html
- 123 <http://cs.jsu.edu/mcis/faculty/leathrum/Mathlets/seqser.html>
- 124 http://mathdl.maa.org/images/upload_library/4/vol5/sequence/seqapp.html
- 125 <http://www.math.psu.edu/dlittl/java/geometry/euclidean/sixpointcircle.html>
- 126 <http://www2.cs.utah.edu/~zachary/isp/applets/SlidingBlock/SlidingBlock.html>
- 127 <http://www.walter-fendt.de/m11e/sectang.htm>
- 128 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/geom1/geom1.htmlgb>
- 129 http://enlvm.usu.edu/ma/nav/activity.jsp?sid=nlvm&cid=4_2&lid=117
- 130 <http://www.math.uah.edu/stat/applets/SuccessRunsExperiment.xhtml>
- 131 http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/flashlets/innerplanets.htm
- 132 <http://www.msu.edu/user/brechtjo/physics/cannon/cannon.html>
- 133 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/fun2/fun2.html>
- 134 <http://www.math.psu.edu/dlittl/java/calculus/parametricArcLength.html>
- 135 <http://www.ies.co.jp/math/java/calc/exp/exp.html>
- 136 <http://www.walter-fendt.de/m14d/wuerfel.htm>
- 137 http://enlvm.usu.edu/ma/nav/activity.jsp?sid=nlvm&cid=4_2&lid=118
- 138 <http://gc.salieg.fr/projet/Fourier/FFT1.html>
- 139 <http://www.ph.biu.ac.il/~rapaport/java-apps/travel.html>
- 140 <http://www.univie.ac.at/future.media/moe/galerie/trig/trig.htmldreieck>
- 141 <http://physics.weber.edu/amiri/director/dcrfiles/airResistance/racingSpheresS.dcr>
- 142 <http://www.shodor.org/interactivate/activities/TwoColors/>
- 143 <http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/lentepai.html>
- 144 <http://www.sunsite.ubc.ca/LivingMathematics/V001N01/UBCExamples/Bezier/bezier.html>
- 145 <http://www.falstad.com/vector3d/>
- 146 <http://www.ies.co.jp/math/java/vector/vectorCircle/vectorCircle.html>
- 147 <http://www.walter-fendt.de/m11e/line3d.htm>
- 148 <http://cs.jsu.edu/mcis/faculty/leathrum/Mathlets/vecfield3.html>
- 149 <http://www.ph.biu.ac.il/~rapaport/java-apps/vecspin.html>
- 150 <http://www.ph.biu.ac.il/~rapaport/java-apps/grvib.html>

N°	Nom de la simulation	Matière	Langage
100	Pendules couples	Sciences Physiques	Applets Java
101	Pendules couplés (Iemans)	Sciences Physiques	Applets Java
102	Pendulum	Sciences Physiques	Applets Java
103	permutations, dérangements, down-up, up-down	Mathématiques	Javascript
104	poisson experiment	Mathématiques	Applets Java
105	poker experiment	Mathématiques	Applets Java
106	Pont de Wheatstone	Autres	Applets Java
107	Predator Prey	Mathématiques	Applets Java
108	Pression	Sciences Physiques	Bibliothèques Java
109	Principe de Huygens	Sciences Physiques	Applets Java
110	Produit de complexes	Mathématiques	Outils auteurs
111	Proizvolov's Identity	Mathématiques	Applets Java
112	Projectile Orbits and Satellite orbits	Sciences Physiques	Applets Java
113	Pythagoras' theorem	Mathématiques	Applets Java
114	Quadratic equations	Mathématiques	Applets Java
115	Racing Balls	Sciences Physiques	Applets Java
116	Random Sequence Applet	Mathématiques	Applets Java
117	Regular Hexagon	Mathématiques	Applets Java
118	Réseaux d'Automates à Seuils	Mathématiques	Applets Java
119	Resonance math ubc	Sciences Physiques	Applets Java
120	Riemann sums (darmouth)	Mathématiques	Applets Java
121	Ripple tank simulation	Sciences Physiques	Applets Java
122	Scattering from a potential	Sciences Physiques	Bibliothèques Java
123	Sequences and series	Mathématiques	Applets Java
124	Sequences and Series Plotter	Mathématiques	Flash
125	Six Point Circle	Mathématiques	Applets Java
126	Sliding Block	Sciences Physiques	Applets Java
127	Slope of a Secant / Tangent Line	Mathématiques	Applets Java
128	spatial coordinates	Mathématiques	Applets Java
129	Stick or Switch	Mathématiques	Applets Java
130	Success-runs experiment	Mathématiques	Applets Java
131	Système solaire	Sciences Physiques	Flash
132	The Cannon	Sciences Physiques	Applets Java
133	The graphs of sin, cos and tan	Mathématiques	Applets Java
134	The Length of a Parametric Curve	Mathématiques	Applets Java
135	The number e(2)	Mathématiques	Applets Java
136	Tirage de dés	Mathématiques	Applets Java
137	Towers of Hanoi	Mathématiques	Applets Java
138	Transformée de Fourier Rapide	Mathématiques	Autres
139	Traveling salesman problem	Autres	Applets Java
140	triangle and law of sines	Mathématiques	Applets Java
141	Two Bowling Ball Drop	Sciences Physiques	Flash
142	Two Colors Applet	Mathématiques	Applets Java
143	types de lentilles	Sciences Physiques	Applets Java
144	Interactive Bezier Splines	Mathématiques	Applets Java
145	Vector 3D	Sciences Physiques	Applets Java
146	Vector and Circle	Mathématiques	Applets Java
147	Vector Equation of a Line in Three-Dimensional Space	Mathématiques	Applets Java
148	Vector Fields and Phase Plots in Three Dimensions	Mathématiques	Applets Java
149	Vector spin model	Sciences Physiques	Applets Java
150	Vibrating granular layer	Sciences Physiques	Applets Java

ANNEXE 2 : ANALYSE DES SIMULATIONS

2.1 : Simulation A : Pression

1.1. Analyse fonctionnelle

1.1.1. Paramètres d'entrée

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface
Température	Numérique	Zone de saisie numérique
Taille particules	Naturel	3 boutons

1.1.2. Paramètres de sortie

Paramètre de sortie	Langage
Particules en mouvement	Géographique (animation)
Graphie de la pression en fonction du temps	Géographique
$N \cdot T / V$	Numérique
$P = dp/dt$	Numérique
$<P>$	Numérique

1.1.3. Paramètres de représentation

Paramètre de représentation	Type	Représentation dans l'interface
Play	Temporel	Bouton
Pause	Temporel	Bouton
Stop>>	Temporel	Bouton
Clear	Temporel	Bouton

1.1.4. Dépendances

Paramètres d'entrée	Processus	Paramètres de sortie	Réponse
Température	Calcul des vitesses	Vitesse des particules	dilaté
Vitesse des particules	Déplacement des particules	Position des particules	Temps-réel
Position des particules		Nouvelles vitesses des particules	Temps-réel
Taille des particules	Calcul des collisions	Pression instantanée sur la paroi	Temps-réel
Pressions instantanées sur les parois	Calcul de la pression instantanée P (somme sur les particules et les parois)	Graphie de la pression en fonction du temps	Temps-réel
Pression instantanée P	Moyenne sur les 100 dernières valeurs	Pression $<P>$	Temps-réel
Position des particules		Particules en mouvement	Temps-réel
Taille des particules	Affichage des particules		Temps-réel
Température T, N et V	Calcul de $N \cdot T / V$	$N \cdot T / V$	Temps-réel

1.2. Analyse pédagogique

1.2.1. Objectifs généraux

Difficultés des étudiants	Objectifs pédagogiques
Faire le lien entre des événements microscopiques connus, et des propriétés macroscopiques connues.	Permettre par l'expérimentation l'observation des effets microscopiques, et la comparaison avec la mesure des variables d'états.

1.2.2. Apprentissage des processus

Processus	Niveau de connaissance pré-requis	Niveau de détail	Guidage
Calcul des vitesses	Néophyte	Caché	Aucun
Déplacement des particules	Maîtrisé	Montré explicitement	
Calcul des collisions	Familier	Montré implicitement (pas d'équations)	Aucun
Calcul de la pression instantanée P (somme sur les particules et les parois)	Néophyte	Caché	Aucun
Moyenne sur les 100 dernières valeurs	Familier	Caché	Aucun
Affichage des particules	Maîtrisé	Montré explicitement	
Calcul de N^*T/V		Caché	Aucun

1.2.3. Apprentissage des paramètres

Paramètre	Niveau de connaissance pré-requis	Guidage
Température	Familier	Aucun
Taille particules	Maîtrisé	
Particules en mouvement	Maîtrisé	
Graphique de la pression en fonction du temps		
N^*T/V	Néophyte	Aucun
$P_e dt/dt$	Néophyte	Aucun
$\langle P \rangle$	Familier	Aucun

1.3. Analyse ergonomique

1.3.1. Liens entre les paramètres fonctionnels

Paramètres	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité
Température			Non
Taille particules			Acceptable
Particules en mouvement			Oui
Graphie de la pression en fonction du temps			Oui
$N^{\circ}T/V$			Oui
$P = dp/dt$			Oui
$<P>$			Peu

1.3.2. Éléments incitateurs

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur
Observer que chaque choc correspond à un pic de pression	Chocs des molécules et graphie de la pression	Aucun
Observer le lien entre température et pression	Température et graphie de la pression	Evident

2.1 : Simulation B : Fourier

1.1. Analyse fonctionnelle

1.1.1. Paramètres d'entrée

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface
Changement fonction	Graphique	Dessin à la souris
Changement coefficients	Graphique	Cliquer et déplacer
Passage au dessus d'un coefficient	Graphique	Passage de la souris
Choix fonction	Symbolique	Bouton
Choix opération	Naturel	Bouton
Son	Naturel	Casse à cocher
Nombre de termes	Numérique	Glisseur

1.1.2. Paramètres de sortie

Paramètre de sortie	Langage
Affichage de la fonction en blanc	Graphique
Affichage de la fonction somme des coefficients en rouge	Graphique
Affichage coefficients	Graphique
Son	Sonore
Affichage composante sinusoïdale	Graphique

1.1.3. Paramètres de représentation

Paramètre de représentation	Type	Représentation dans l'interface
-----------------------------	------	---------------------------------

1.1.4. Dépendances

Paramètres d'entrée	Processus	Paramètres de sortie	Réponse
Passage au dessus de Ai	Affichage de $Ai^*sin(x)$	Affichage composante sinusoïdale	Temps-réel
Choix fonction Ou Changement fonction	Affichage fonction	Affichage fonction en blanc	Temps-réel
Ou Choix opération	Calcul décomposition	Affichage coefficients	
Changement coefficient Ou Nombre de termes	Calcul de $\sum A_k^*cos(kx)$...	Affichage de la fonction somme en rouge	Temps-réel
Son	Envoi de $\sum A_k^*cos(kx)$... dans la carte son	Affichage de la fonction somme en rouge	Temps-réel

1.2. Analyse pédagogique

1.2.1. Objectifs généraux

Difficultés des étudiants	Objectifs pédagogiques
Difficulté de se dégager du formalisme fort des séries de Fourier, de comprendre les interdépendances entre une fonction et sa décomposée.	Montrer de manière visuelle et expérimentale que les séries de Fourier et les fonctions périodiques sont deux aspects d'une même entité.

1.2.2. Apprentissage des processus

Processus	Niveau de connaissance pré-requis	Niveau de détail	Guidage
Affichage de $\Delta t \sin(\omega t)$	Maîtrisé	Aucun	Aucun
Affichage fonction	Maîtrisé	Aucun	Aucun
Calcul décomposition	Familier	Aucun	Aucun
Calcul de $\sum \Delta t^* \cos(k\omega t)$...	Familier	Aucun	Aucun
Envoi de $\sum \Delta t^* \cos(k\omega t)$... dans la carte son	Néophyte	Aucun	Aucun

1.2.3. Apprentissage des paramètres

Paramètre	Niveau de connaissance pré-requis	Guidage
Changement fonction	Aucun	Explicite
Changement coefficients	Familier	Explicite
Passage au dessus d'un coefficient	Familier	Explicite
Clics fonction	Familier	Implicite
Choix opération	Aucun	Explicite
Son	Aucun	Explicite
Nombre de termes	Maîtrisé	Explicite
Affichage de la fonction en blanc	Maîtrisé	Explicite
Affichage de la fonction somme des coefficients en rouge	Familier	Explicite
Affichage coefficients	Familier	Explicite
Son (sortie)	Aucun	Explicite
Affichage composante sinusoïdale	Maîtrisé	Explicite

1.3. Analyse ergonomique

1.3.1. Représentations des paramètres fonctionnels

Paramètres	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité
Changement fonction			OUI
Changement coefficients			Oui
Passage au dessus d'un coefficient			Oui
Choix fonction			NON
Choix opération			Oui
Son			Non
Vombre de termes			A améliorer
Affichage de la fonction en blanc			A améliorer
Affichage de la fonction somme des coefficients en rouge			Oui
Affichage coefficients			A améliorer
Son (sortie)			Oui
Affichage composante sinusoïdale			Oui

1.3.2. Éléments incitateurs

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur
Changer les coefficients de Fourier et voir la fonction changer	Coefficients et fonction	Texte
Dessiner une fonction et observer les coefficients de Fourier	Coefficients et fonction	Texte
Comprendre que les fréquences élevées correspondent à des variations rapides	Coefficients et fonction	Texte
Comprendre que les fréquences élevées correspondent à un son aigu	Coefficients et fonction	Texte

2.1 : Simulation C : Résonance

1.1. Analyse fonctionnelle

1.1.1. Paramètres d'entrée

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface
Fréquence ω	Numérique	Bouton à tourner
Facteur qualité Q	Numérique	Bouton glisseur

1.1.2. Paramètres de sortie

Paramètre de sortie	Langage
Mouvement fils et poulies	Graphique
Mouvement ressort	Graphique
Mouvement masse	Graphique
Graphé Gain/Fréquence	Graphique
Graphé de l'excitation	Numérique
Graphé du déplacement	Numérique

1.1.3. Paramètres de représentation

Paramètre de représentation	Type	Rep.ésentation dans l'interface
Marche/Arrêt		Bouton
Clear	Temporel	Bouton

1.1.4. Dépendances

Paramètres d'entrée	Processus	Paramètres de sortie	Réponse
Fréquence ω	Mouvement moteur	Mouvement fils et poulies	Temps réel
Facteur qualité	Calcul de h à partir de Q	Amortissement h	Temps réel
Mouvement fils et poulies (excitation y)	Résolution de l'équation des forces	Mouvement ressort	Temps réel
Amortissement h		Graphé du déplacement	
Facteur qualité			
Fréquence ω	Calcul du gain en fonction de Q et ω	Graphé Gain/fréquence	Temps réel

1.2. Analyse pédagogique

1.2.1. Objectifs généraux

Difficultés des étudiants	Objectifs pédagogiques
Difficulté d'avoir une compréhension précise de la fonction de transfert.	Montrer explicitement la réalité physique sous-jacente aux fonctions de transfert et montrer comment le gain varie en fonction de la fréquence

1.2.2. Apprentissage des processus

Processus	Niveau de connaissance pré requis	Niveau de détail	Guidage
Mouvement mcteur		Explicite	aucun
Calcul de h à partir de Q	Familier	Aucun	Aucun
Résolution de l'équation des forces	Familier	Aucun	Explicite (après simulation)
Calcul du gain en fonction de Q et ω	Familier	Aucun	Explicite (après simulation)

1.2.3. Apprentissage des paramètres

Paramètre	Niveau de connaissance pré requis	Guidage
Fréquence ω	Maîtrisé	Aucun
Facteur qualité Q	Familier	Aucun
Mouvement fils et poulies	Familier	Explicite
Mouvement ressort	Familier	Explicite
Mouvement masse	Familier	Explicite
Gain Gain/fréquence	Familier	Implicite
Gain de l'excitation	Familier	Implicite
Gain du déplacement	Familier	Implicite

1.3. Analyse cognitive

1.3.1. Représentations des paramètres fonctionnels

Paramètres	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité
Fréquence ω	Mouvements fils et poulies	Proximité	Oui
Facteur qualité Q	Aucun	f	Oui
Mouvement fils et poulies			Oui
Mouvement ressort		Comportement	Oui
Mouvement masse			Non
Graphie Gain/Fréquence	Aucun	f	Oui
Graphie de l'excitation	Mouvement fils et poulies	Comportement et proximité (pas évident)	Oui
Graphie du déplacement	Mouvement masse	Comportement et proximité (pas évident)	Oui

1.3.2. Éléments incitateurs

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur
Observer déphasage entre excitation et déplacement	Graphie de l'excitation et graphie du déplacement.	Possibilité peu évidente de superposer les graphes; le texte mentionne cette possibilité
Observer augmentation du gain lorsque l'amortissement diminue	Graphie du déplacement et réglage de Q	Aucune
Observer le phénomène de résonance	Graphie du déplacement et réglage de f Ou Graphie gain/fréquence et réglage de f	Texte

2.1 : Simulation D : Méthode des rectangles

1.1. Analyse fonctionnelle

1.1.1. Paramètres d'entrée

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface
a,b	Numérique	Zone de saisie
c,d,e	Numérique et Graphique	Zone de saisie et translation
Translation des droites c,d,e	Graphique	Déplacement à la souris
f(x)	Symbolique	Zone de saisie
Translation de f(x)	Graphique	Déplacement à la souris
N (zone)	Numérique	Saisie
N(curseur)	Numérique	Curseur

1.1.2. Paramètres de sortie

Paramètre de sortie	Langage
Inf et Sup (à gauche et sur le graphique)	Numérique
g(x) (à gauche et sur le graphique)	Symbolique
Affichage des droites c,d,e	Graphique
Affichage de la fonction	Graphique
Affichage des rectangles inf et des Sup	Graphique

1.1.3. Paramètres de représentation

Paramètre de représentation	Type	Représentation dans l'interface
Affichage grille et/ou axes	Spatial	Menu après un clic droit
Zoom	Spatial	Menu après un clic droit
Aspect de proportionnalité	Spatial	Menu après un clic droit
Couleurs		Menu après un clic droit

1.1.4. Dépendances

Paramètres d'entrée	Processus	Paramètres de sortie	Réponse
f(x)	Calcul de primitive	g(x)	Temps-réel
f(x), a, b, n	Calcul des fonctions Inf et Sup	Affichage des fonctions Inf et Sup	Temps-réel
Fonctions Inf et Sup	Calcul des aires Inf et Sup	Valeurs de Inf et Sup	Temps-réel
c, d, e	Affichage des droites d'encadrement	Affichage de c, d, e	Temps-réel
f(x)	Affichage de la fonction	Affichage de f(x)	Temps-réel

1.2. Analyse pédagogique

1.2.1. Objectifs généraux

Difficultés des étudiants	Objectifs pédagogiques
Les étudiants ont tendance à se focaliser sur l'aspect calculatoire de l'intégration, et oublient la base	Permettre aux étudiants de manipuler la méthode des rectangles pour qu'ils reviennent à la signification première de l'intégration

1.2.2. Apprentissage des processus

Processus	Niveau de connaissance pré-requis	Niveau de détail	Guidage
Calcul de primitive	Faillier	Caché	Aucun
Calcul des fonctions Inf et Sup	Faillier	Montré explicitement	
Calcul des aires Inf et Sup	Maîtrisé	Montré explicitement	
Affichage des droites d'encadrement			
Affichage de la fonction			

1.2.3. Apprentissage des paramètres

Paramètre	Niveau de connaissance pré-requis	Guidage
ab	Maîtrisé	aucun
c/d	Maîtrisé	aucun
Translation des droites c/d	Maîtrisé	aucun
$f(x)$	Maîtrisé	Explicite
Translation de $f(x)$	Maîtrisé	aucun
$N(zone)$	Faillier	Explicite
$N(cursueur)$	Faillier	Explicite
Inf et Sup (à gauche et sur le graphique)	Faillier	Aucun
$g(x)$ (à gauche et sur le graphique)	Faillier	Aucun
Affichage des droites c/d	Maîtrisé	aucun
Affichage de la fonction	Maîtrisé	aucun
Affichage des rectangles Inf et des Sup	Faillier	Aucun

1.3. Analyse cognitive

1.3.1. Représentations des paramètres fonctionnels

Paramètres	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité
a,b	aucun		NON
c,d,e	+ Affichage des droites c, d, e	Couleur	Oui
Translation des droites c,d,e			Oui
f(x)	+ Affichage de la fonction	Couleur	Oui
Translation de f(x)			Oui
N (zone)		Couleur	Oui
N (curseur)			Oui
Inf et Sup (à gauche et sur le graphique)	Affichage des rectangles	Proximité	Oui
g(x) (à gauche et sur le graphique)			Non : g(x) et f(x)
Affichage des droites c,d,e	c, d, e	Couleur	Oui
Affichage de la fonction	f(x)	Couleur	Oui
Affichage des rectangles Inf et des Sup	Valeur des Inf et Sup	Proximité	Oui

1.3.2. Éléments incitateurs

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur
Observer le resserrement de l'encadrement numérique	Paramètre "a" d'un côté, Inf, Sup et la valeur théorique de l'autre	Aucun
Observer la convergence graphique	Paramètre "a" et les graphiques	Lien évident (graphique central)
Essayer d'autres fonctions		Aucun

ANNEXE 3 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DE PARTICIPATION

École Polytechnique de Montréal

PROJETS DE RECHERCHE AVEC DES SUJETS HUMAINS

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT DE PARTICIPATION

Projet : Comparaison de simulations éducatives pour l'enseignement des sciences	
Responsable du projet : Coutant Fabien, étudiant à la maîtrise	
DÉPARTEMENT : Département des mathématiques et génie industriel	TÉLÉPHONE : 514-340-4711 poste 2158 COURRIEL : fabien.coutant@polymtl.ca

DÉCLARATION

Je, _____ déclare avoir pris connaissance et avoir compris le but, la nature, les avantages, les inconvénients et les risques de cette recherche, et en avoir discuté avec Fabien Coutant.

Après réflexion, je consens librement à participer à cette recherche. Je sais que je peux me retirer de celle-ci en tout temps, sans aucune forme de préjudice. De plus, tous les renseignements obtenus me concernant seront strictement confidentiels, à moins d'une autorisation de ma part ou d'une disposition législative. Pour ce faire, ces renseignements seront conservés sous clé à Montréal, pour une durée de 1 année après la fin de la recherche. Par la suite, tous ces renseignements seront détruits.

Cependant, je consens à ce qu'aux fins de vérification de la saine gestion de cette recherche, les personnes suivantes puissent consulter les informations s'y rattachant : un membre du comité d'éthique de la recherche (C.É.R.), et/ou un délégué des autorités gouvernementales de Santé Canada, et/ou un ministère concerné du Québec, et/ou un délégué des organismes commanditaires. Par ailleurs, j'accepte que les résultats de cette recherche puissent être publiés, dans une revue technique ou scientifique, ou communiqués dans le cadre d'un congrès technique ou scientifique, sans que mon anonymat en soit compromis.

Signature du sujet

Date

ANNEXE 4 : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT POUR LE DROIT À L'IMAGE

École Polytechnique de Montréal

PROJETS DE RECHERCHE AVEC DES SUJETS HUMAINS

FORMULAIRE DE CONSENTEMENT POUR LE DROIT À L'IMAGE

Projet : Comparaison de simulations éducatives pour l'enseignement des sciences	
Responsable du projet : Coutant Fabien, étudiant à la maîtrise	
DÉPARTEMENT : Département des mathématiques et génie industriel	TÉLÉPHONE : 514-340-4711 poste 2158 COURRIEL : fabien.coutant@polymtl.ca

DÉCLARATION

Je soussigné(e) _____ autorise par la présente Fabien Coutant à pratiquer tout type d'enregistrement audio et vidéo dans le cadre de son expérience intitulée "*Comparaison de simulations éducatives pour l'enseignement des sciences*". Ces enregistrements et documents ne pourront servir que dans le cadre exclusif de ces travaux et de leur promotion.

Le responsable du projet a le droit de montrer, d'exploiter et de faire traduire les séquences tournées, d'en faire la publicité, et ce, de façon permanente, universellement et dans toutes les langues, quel que soit le mode d'utilisation et le média utilisé, notamment les CD-ROM, les DVD, l'Internet et autres produits liés aux médias interactifs. Le responsable du projet peut, en toute liberté, utiliser, adapter ou modifier les séquences tournées, dans le souci constant du respect de la personne et du respect des contenus. Par la présente cession de droits, je renonce à toute rétribution de quelque nature et forme que ce soit concernant ces enregistrements et ces éventuelles diffusions ou utilisations d'images dans le cadre précisé ci-avant.

Le (la) soussigné(e) déclare et garantit qu'il (elle) a le droit de signer le présent formulaire de consentement et d'accorder au producteur les droits conférés par la présente, sans qu'il (elle) ait à obtenir quelque autre consentement ou permission.

Le (la) soussigné(e) déclare donc que le responsable du projet a le droit d' :

- ☐ enregistrer son et vidéo lors de l'expérience
- ☐ exploiter les enregistrements dans les conditions ci dessus

Le (la) soussigné(e) a lu et compris le présent formulaire de consentement, ainsi que les modalités qui y sont prévues, avant de le signer.

Signature du sujet

Date

ANNEXE 5 : QUESTIONNAIRES

Utilisateur n°

Simulateur A : Pression

Questions sur le contenu :

1. À l'aide d'un baromètre très précis placé dans l'air ambiant, on mesure la pression. Peut-on observer les mêmes fluctuations que celles observées dans la simulation? Pourquoi?

2. Quels sont les effets microscopiques et macroscopiques d'une augmentation de température?

3. Comment est calculée la pression instantanée P ?

Questions sur l'expérience :

1. Toutes les commandes présentes sont utiles.

Pas d'accord ☐ d'accord ☐

2. Toutes les commandes nécessaires sont présentes; il n'en manque pas.

Pas d'accord ☐ d'accord ☐

3. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).

Pas d'accord ☐ d'accord ☐

4. Le texte autour de la simulation est indispensable.

Pas d'accord ☐ d'accord ☐

5. Cette simulation a augmenté ma compréhension de la pression.

Pas d'accord ☐ d'accord ☐

Utilisateur n°

Simulateur B : Fourier

Questions sur le contenu :



1. Soit une fonction quelconque et sa décomposition en série de Fourier avec les coefficients en sinus et les coefficients en cosinus. Que se passe-t-il si on augmente légèrement le 100^{ième} coefficient des cosinus?



2. Que donne la décomposition de la fonction $f(x) = 3 \sin(2x) + \cos(x)$ en séries de Fourier?



3. Que se passe-t-il lorsqu'on augmente le nombre de termes de la décomposition?

Questions sur l'expérience :

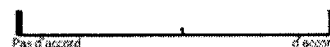
1. Toutes les commandes présentes sont utiles.



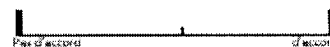
2. Toutes les commandes nécessaires sont présentes; il n'en manque pas.



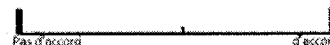
3. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).



4. Les variables utilisées sont clairement définies.



5. Cette simulation a augmenté ma compréhension des séries de Fourier.



Utilisateur n°

Simulateur C : Résonnance

Questions sur le contenu :



1. L'excitation sinusoïdale crée un déplacement sinusoïdal de la masse. Est-ce que l'excitation et le déplacement ont mêmes amplitudes? Même fréquence? Même phase?



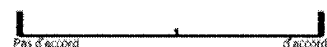
2. Comment l'amortissement du au fluide influe t'il sur le gain du dispositif?



3. Le phénomène de résonance (gain maximal autour d'une certaine fréquence) peut il s'observer pour tous les oscillateurs en régime sinusoïdal forcé?

Questions sur l'expérience :

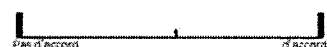
1. Toutes les commandes présentes sont utiles.



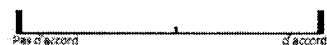
2. Les variables utilisées sont clairement définies.



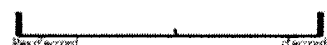
3. J'ai rapidement compris les objectifs de la simulation.



4. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).



5. Cette simulation a augmenté ma compréhension des phénomènes de gain et de résonnance



Utilisateur n°

Simulateur D : L'aire sous la courbe

Questions sur le contenu :



1. À partir de la méthode des rectangles, comment peut-on approcher l'aire de fonctions tantôt négatives, tantôt positives?



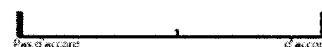
2. La hauteur des rectangles dans la simulation était le maximum (et le minimum) pris par la fonction f sur l'intervalle. Si on prenait pour la hauteur du rectangle, la valeur prise par f au milieu de l'intervalle, la convergence se ferait t'elle? Obtient-on une meilleure ou une moins bonne approximation?



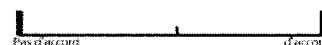
3. Avec quelles fonctions la convergence sera-t-elle plus lente?

Questions sur l'expérience :

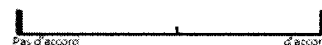
1. Je me sens libre de faire ce que je souhaite.



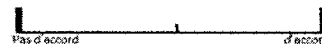
2. Dès que la simulation est ouverte je comprends comment l'utiliser; je ne me sens pas perdu(e).



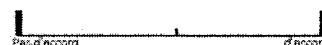
3. J'ai rapidement compris les objectifs de la simulation.



4. Toutes les commandes présentes sont utiles.



5. Cette simulation a augmenté ma compréhension du processus de calcul de l'aire.



ANNEXE 6 : GUIDE DE CONCEPTION ET D'AMÉLIORATION DES SIMULATIONS

1. ANALYSE

Analyse fonctionnelle

Paramètres d'entrée

Paramètre d'entrée	Langage	Représentation dans l'interface
<i>Nom du paramètre</i>	<i>Numérique/Naturel/Graphique</i>	<i>Bouton/Case à cocher/...</i>

Paramètres de sortie

Paramètre de sortie	Langage
<i>Nom du paramètre</i>	<i>Numérique/Naturel/Graphique</i>

Paramètres de représentation

Paramètre de représentation	Type	Représentation dans l'interface
<i>Nom du paramètre</i>	<i>Spatial/Temporel</i>	<i>Bouton/Case à cocher/...</i>

Dépendances

Paramètres d'entrée	Processus	Paramètres de sortie	Réponse
<i>Noms du (des) paramètre(s) d'entrée</i>	<i>Nom du processus</i>	<i>Noms du (des) paramètre(s) de sortie</i>	<i>Temps-réel/Différé</i>

Analyse pédagogique

Objectifs généraux

Difficultés des étudiants	Objectifs pédagogiques
<i>Liste des problèmes pédagogiques</i>	<i>Liste des objectifs/stratégies pédagogiques</i>

Apprentissage des processus

Processus	Niveau de connaissance pré-requis	Niveau de détail	Guidage
-----------	--------------------------------------	------------------	---------

<i>Nom du processus</i>	<i>Néophyte/Familier/Maitrisé</i>	<i>Caché/Élémentaire/Complet</i>	<i>Aucun/Implicite/Explicite</i>
-------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Apprentissage des paramètres

Paramètre	Niveau de connaissance pré-requis	Guidage
<i>Nom du paramètre</i>	<i>Néophyte/Familier/Maitrisé</i>	<i>Aucun/Implicite/Explicite</i>

Analyse cognitive

Représentations des paramètres fonctionnels

Paramètres	Autre élément de l'interface lié	Nature du lien	Compatibilité
<i>Nom du paramètre</i>	<i>Nom du (des) paramètre(s) lié(s)</i>	<i>Couleur/Aspect semblable/Proximité/...</i>	<i>Oui/Non</i>

Éléments incitateurs

Point de passage	Paramètres à observer	Élément incitateur
<i>Description du point de passage</i>	<i>Noms des paramètres</i>	<i>Nom de l'élément incitateur</i>

2. RECOMMANDATIONS COMMUNES

- Les symboles et les paramètres de sortie ne doivent pas court-circuiter le cheminement d'apprentissage de l'apprenant en donnant directement une solution au problème.
- Les moyens d'interaction des paramètres doivent être adaptés à la précision que l'on souhaite donner à l'utilisateur.
- Les conventions à l'œuvre dans chaque domaine doivent être respectées.
- Les processus choisis devront être réellement calculés à l'aide des données de la simulation, et non pas simulés.
- La simulation doit tenir sur une seule page.
- L'introduction, des instructions de base et de l'aide pour l'utilisation doivent figurer sur la page même de la simulation.
- Les exemples, exercices et procédures peuvent être sur la même page et affichables sur commande.

- Les compléments théoriques, l'analyse et la conclusion doivent se situer en dessous de la simulation ou sous forme de liens.
- L'introduction joue un rôle majeur; elle doit être travaillée, concise, précise, et utiliser des moyens de mise en relief.
- Les exemples, exercices ou protocoles doivent être énoncés de façon courte.
- Les auteurs doivent annoncer quelles approximations ont été faites le cas échéant.
- Les compléments théoriques doivent revenir sur les observations qui ont été faites lors de la manipulation.

3. TYPOLOGIE

Visualisation : le but est d'enseigner le processus dans sa globalité, de développer l'intuition de l'apprenant.

Équivalence : le but est de montrer que deux quantités sont équivalentes et de mettre en évidence la bijection qui les lie.

Dépendance : le but est de montrer comment les paramètres de sortie se modifient en fonction des paramètres d'entrée et d'étudier la relation de dépendance.

Processus : le but est d'examiner le processus en détails, les cas typiques, le fonctionnement et les limites.

4. RECOMMANDATIONS SPÉCIFIQUES

Visualisation

Conditions : les paramètres et les processus sont peu connus

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : ils doivent être présents en quantité très limitée : il est préférable de laisser le caractère informatif aux compléments théoriques.

Paramètres : les paramètres doivent être intuitifs, peu nombreux, peu précis, conventionnels et avoir une compatibilité maximale avec les usages. Les paramètres de représentation doivent être autant automatisés que possible.

Processus : il est souhaitable de limiter le nombre de variables utilisées. Le processus doit être interactif, en temps réel, simple et explicite.

▲ *Organisation*

Nous recommandons de disperser les paramètres dans l'interface, de les lier aux éléments contrôlés par la couleur et le placement notamment, et de placer l'introduction en évidence.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : l'introduction et les instructions de base doivent être les premiers éléments vus et doivent être mis en évidence. On doit y replacer la simulation dans un contexte plus général, présenter les questions principales soulevées par la simulation, et des instructions sur les principales fonctions. L'introduction doit être concise, les éléments importants mis en évidence (gras, police plus grande, couleur, ...)

Guidage pendant l'expérience : nous recommandons que le guidage pendant l'expérience éventuel soit limité à des questions ouvertes et courtes ou à des exemples de paramètres préenregistrés.

Guidage après l'expérience : le guidage post-expérimental doit aussi être limité. On peut proposer des compléments théoriques brefs, ouvrir sur d'autres simulations plus poussées, résumer rapidement le processus et proposer des liens vers d'autres éléments.

Équivalence

Conditions : les processus et les paramètres sont connus par l'étudiant et les paramètres sont à la fois entrée et sortie.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : il faut fournir les éléments qui expliquent la bijection : formule, illustration du phénomène...

Paramètres : une simulation de type équivalence doit proposer le même type d'interaction pour les deux éléments mis en bijection, et les contrôles choisis doivent permettre le balayage d'un grand nombre de valeurs.

Processus : nous recommandons qu'il soit effectué en temps réel et qu'il soit montré de manière explicite.

▲ *Organisation*

Il faut ajouter de nombreux liens entre les paramètres. Nous recommandons de veiller à respecter une certaine équité visuelle pour les deux paramètres. C'est-à-dire leur réserver le même espace visuel, positionner les éléments annexes sans privilégier un paramètre plutôt que l'autre, etc.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : le guidage pré-expérimental doit être court et direct.

Guidage pendant l'expérience : une telle simulation doit proposer des exemples ou exercices ouverts, permettant de faire visiter un grand nombre de valeurs, et de faire effectuer des va-et-vient entre les deux paramètres.

Guidage après l'expérience : il faut résumer et enrichir les observations faites.

Dépendance

Conditions : le processus doit être connu, les paramètres connus mais non maîtrisés.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : nous conseillons de fournir les informations qui expliquent la dépendance de manière théorique et définissent clairement les variables importantes et les calculs du processus. Les variables moins importantes peuvent être expliquées dans le guidage.

Paramètres : ils doivent autant précis que nécessaires et peuvent être nombreux. Il faut multiplier les types de représentation des paramètres d'entrée.

Processus : sa représentation doit être simple.

▲ *Organisation*

Nous suggérons que les paramètres d'entrée et de sortie doivent être mis en évidence et que de nombreux liens doivent être établis entre les éléments (couleurs, disposition, comportement, etc.). De plus, il faut prendre en compte les zones d'attention et surtout le sens de lecture pour disposer les éléments.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : ces informations devront être courtes et directes.

Guidage pendant l'expérience : les exemples, exercices et/ou procédures proposés doivent assurer que tous les jeux de paramètres intéressants soient pris, et que les observations correspondantes soient faites.

Guidage après l'expérience : on doit y revenir sur toutes les observations faites, les expliquer, les compléter, les catégoriser et donner des compléments théoriques.

Processus

Conditions : les paramètres doivent être connus des apprenants, alors que le processus, plus complexe, n'est pas maîtrisé.

▲ *Éléments de l'interface*

Symboles : il faut fournir les éléments qui expliquent le processus traité et définissent comment les calculs sont faits.

Paramètres : les paramètres doivent être autant précis que nécessaire et suffisamment nombreux. Il faut veiller à inclure des cas "normaux" d'utilisation, des cas triviaux, typiques, des cas qui mettent en évidence les limites du modèle,...

Processus : nous recommandons que le processus soit détaillé, décomposé et que les sous processus soient explicités et illustrés.

▲ *Organisation*

Il est souhaitable de mettre l'illustration du processus au centre de la simulation, et de regrouper les paramètres pour plus d'efficacité et de clarté.

▲ *Guidage*

Guidage avant l'expérience : le guidage pré-expérimental doit être court et direct.

Guidage pendant l'expérience : les exemples, exercices et/ou protocoles peuvent être détaillés dans les cas complexes, pour s'assurer que tous les cas prévus sont effectivement vus par l'utilisateur, notamment grâce à des jeux de paramètres préenregistrés.

Guidage après l'expérience : pour ce type de simulations, ces informations sont importantes; elles doivent revenir sur ce qui a été observé et mettre en évidence le fonctionnement et les limites du processus.