

Simulation numérique dans l'enseignement de la physique : enjeux, conditions

par **Bernard RICHOUX**, **Christiane SALVETAT**
Lycée Jean-Baptiste Corot - 91600 Savigny-sur-Orge

INRP-TECNE - 92120 Montrouge

Bernard.Richoux@ac-versailles.fr

Christiane.Salvetat@ac-versailles.fr

et **Daniel BEAUFILS**

IUFM de l'académie de Versailles

Université Paris 11 - DidaScO - 91400 Orsay

daniel.beaufils@df.cso.u-psud.fr

RÉSUMÉ

La simulation numérique sur ordinateur fait désormais partie des outils didactiques préconisés pour l'enseignement de la physique. La panoplie informatique est vaste puisque relèvent de la catégorie « simulation » aussi bien les appliquettes des pages web que des logiciels sophistiqués fondés sur des algorithmes utilisés en recherche ou industrie. Nécessairement basés sur l'application de modèles de la physique, leur utilisation pour l'enseignement et l'apprentissage des bases de la physique est évidemment source de questionnement. L'article présente quelques exemples d'utilisation de simulation, de nature très diverse qui permettent de montrer les articulations entre simulation, modèle, théorie et réalité. Ceci débouche sur quelques conditions didactiques de construction d'activités cohérentes. Les schémas de séquences pédagogiques ainsi réalisées dans des lycées sont donnés en exemple. Cet article s'appuie sur une recherche en cours dans laquelle le département Technologies Nouvelles de l'INRP (Institut national de recherche pédagogiques) et l'IUFM (Institut universitaire de formation des maîtres) de Versailles sont associés et correspond à une conférence faite en juin 2001 dans le cadre de l'assemblée générale de l'Union des Physiciens d'Île-de-France.

L'utilisation de la simulation numérique sur ordinateur, si elle est d'actualité, n'est pas une idée récente. Rappelons simplement pour mémoire ici, l'existence de publications dont certaines datent d'une vingtaine d'années [13, 16, 19] et les travaux de l'INRP ayant conduit à la réalisation et l'expérimentation de nombreux logiciels de simulation autour de 1981 (REFO, GAMMA, SJJT, PANNE, etc.). Plus récemment, anticipant sur l'évolution des programmes des classes de lycées, la simulation avait de nouveau fait l'objet de travaux et de présentations, notamment dans le cadre des journées informatique et pédagogie des sciences physiques organisées par l'INRP et l'UdP [11, 31, 32]. Lors

du plan national de formation (PNF)⁽¹⁾ de mars 1997, A. DUREY abordait le problème en ces termes « *L'utilisation d'un logiciel tel qu'Interactive Physique, loin d'isoler les élèves dans un monde virtuel coupé de la réalité des objets, ce qui est la crainte généralement exprimée, peut se révéler tout au contraire un outil précieux d'investigation du monde des objets en permettant aux élèves de manipuler des objets modèles et donc de lui permettre de construire cet intermédiaire indispensable entre le champ de l'expérience et celui de la théorie* » [23-24].

Nous avons poursuivi cette réflexion sur la place et le rôle de la simulation dans l'enseignement de la physique et nous présentons ci-dessous, quelques exemples d'utilisation de logiciels très différents qui permettent de montrer les articulations entre simulation, modèle, théorie et réalité. Ceci permet de déboucher sur des conditions didactiques de construction d'activités cohérentes et de donner le schéma de séquences pédagogiques ainsi réalisées dans des lycées. Cet article s'appuie sur une recherche en cours dans laquelle le département Technologies Nouvelles de l'INRP⁽²⁾ et l'IUFM⁽³⁾ de Versailles sont associés et correspond à une conférence faite en juin 2001 dans le cadre de l'assemblée générale de l'Union des Physiciens d'Île-de-France.

1. SIMULATION, ANIMATION : EXEMPLES

La simulation sur ordinateur fait donc désormais partie des outils didactiques préconisés pour l'enseignement de la physique, voire des outils mêmes à présenter aux élèves (cf. programme de terminale S, rentrée 2002). La panoplie informatique est vaste puisque relèvent de la catégorie « simulation » aussi bien les appliquestes des pages web que des logiciels sophistiqués fondés sur des algorithmes utilisés en recherche ou dans l'industrie. Dans cette première partie nous indiquons à travers quelques exemples de simulation numérique (c'est-à-dire la simulation-représentation d'un phénomène, représentation engendrée par du calcul à partir d'un modèle mathématique), la diversité des activités possibles mais aussi les questionnements auxquels ils conduisent.

1.1. Simulation pour pallier une impossibilité

La simulation est souvent présentée comme une alternative à des manipulations dangereuses, des dispositifs coûteux ou des expériences impossibles à réaliser.

Cet exemple d'animation⁽⁴⁾ (cf. figure 1), commode pour décrire rapidement le prin-

(1) « De l'utilisation du logiciel de simulation Interactive Physique », PNF Sciences physiques et chimiques et TIC 25 et 26 mars 1997.

(2) INRP : Outils d'assistance et de coopération pour des formations en autonomie.

(3) IUFM de l'académie de Versailles : Expérimentation d'une utilisation de logiciels de simulation en physique.

(4) Le logiciel Interactive Physique est distribué par Biolab-Phylab (Paris). De nombreux sites académiques présentent des utilisations du logiciel, voir par exemple :

<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/simul.html>

(avec entre autre l'exemple du cyclotron présenté ci-dessus) :

<http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Jips8/Resource/Exemplip.htm>

cipe du cyclotron, contient aussi des potentialités plus grandes : modification des paramètres et influence sur la trajectoire, visualisation des forces...

Il nous paraît important d'indiquer d'emblée l'ambiguïté de cette argumentation trop souvent utilisée comme « garde-fou » et qui contribue en fait à entretenir un faux débat. En effet qu'il soit simple ou sophistiqué, c'est toujours un modèle (du phénomène ou du dispositif) qui est « manipulé », et il serait plus correct d'inverser la proposition et de dire : « ne pas faire l'expérience coûteuse, dangereuse, lorsqu'un modèle peut donner la réponse ».

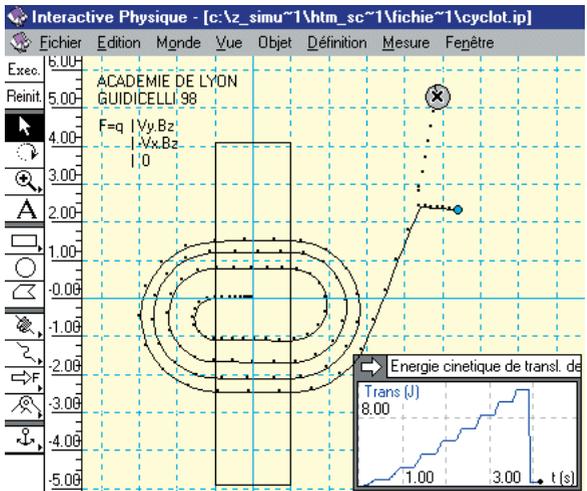


Figure 1 : Simulation du principe du cyclotron.

1.2. Simulation pour explorer un modèle

Explorer un modèle, c'est modifier les paramètres accessibles et observer ce que donnent les calculs. Un des exemples classiques porte sur le mouvement des satellites : la simulation permet de constater l'influence de divers paramètres sur la trajectoire d'un

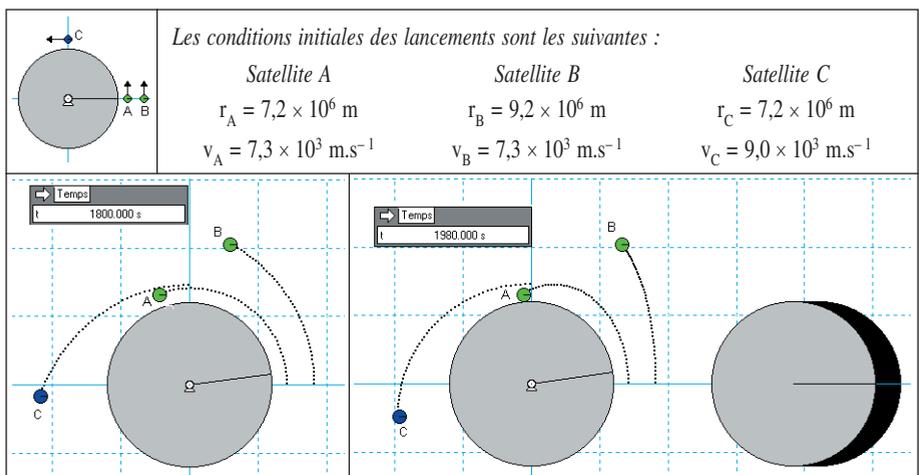


Figure 2 : Jeu sur les paramètres d'un système simulé.

satellite (vitesse, altitude, ...). L'utilisation de cette simulation peut être une simple étude de trajectoire dont les équations sont déjà contenues dans le logiciel.

Mais selon le logiciel utilisé (ici Interactive Physique) on pourra pousser l'activité plus loin en ajoutant un autre centre attracteur et étudier son influence.

Cette « expérience de pensée » donne déjà une idée de l'origine des calculs faits par le logiciel : l'utilisation des lois de Kepler pour le tracé des trajectoires ne permet pas l'introduction d'un second centre attracteur alors que le calcul pas à pas, à partir de l'intégration des lois fondamentales le permet.

On peut également organiser une réflexion sur les modèles (activités dans le domaine théorique) comme on organise des activités dans le domaine du « réel » au cours d'un TP : deux cylindres, tournant avec des vitesses égales mais opposées, entraînent une plaque dans un mouvement alternatif. Mais à quelles conditions ? Le mouvement est-il toujours sinusoïdal ? Comment le mettre en évidence ? La plaque peut-elle être un peu plus épaisse ? Qu'est ce qui est alors modifié...

Dans cet exemple (cf. figure 3), sont affichés :

- ◆ les vecteurs représentant les réactions de chaque cylindre sur la plaque (réactions normales et tangentielles) ;
- ◆ un diagramme (à gauche) représentant l'abscisse x du centre d'inertie G de la plaque en fonction de la date t ;
- ◆ un diagramme (à droite) représentant la vitesse du centre d'inertie G de la plaque en fonction de l'abscisse x de G .

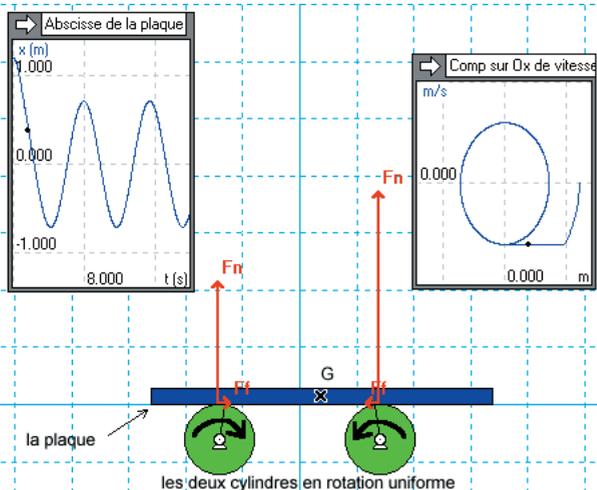


Figure 3 : Étude d'un système complexe ; visualisation des forces.

Cet exemple montre l'importance de la visualisation de certaines grandeurs (ici les vecteurs montrant la variation des réactions normales et tangentielles) pour comprendre le phénomène mais aussi l'importance du choix des représentations pour analyser le résultat. En CPGE (Classes préparatoires aux grandes écoles), le portrait de phase est utile pour mettre en évidence un régime transitoire avant le régime sinusoïdal : si les conditions initiales permettent à la plaque d'acquies une vitesse assez grande pour annuler la vitesse de glissement alors la vitesse de G reste constante jusqu'à la réapparition du glissement.

1.3. Étudier un modèle régi par une équation différentielle

Les modèles issus de l'application des lois ou principes de la mécanique, de l'électricité, etc., conduisent généralement à des équations différentielles. Toute une catégorie de logiciels de simulation repose précisément sur un traitement numérique de ces équations. Le programme de terminale S, applicable à la rentrée 2002, comporte la présentation de la méthode d'Euler pour la « résolution »⁽⁵⁾ numérique d'une équation différentielle, méthode permettant d'expliquer le principe des calculs effectués, même si d'autres algorithmes plus puissants sont évidemment utilisés [28].

Cette méthode peut être mise en œuvre avec une calculatrice ou un tableur comme Excel®. Pour les utilisateurs d'un tableur on peut réaliser une comparaison entre la solution numérique et la solution analytique, ce qui est une bonne préparation aux compétences nouvelles à acquérir à propos des simulations (choix du pas de calcul par exemple).

L'exemple ci-dessous (cf. figure 4) se trouve à l'adresse suivante :

http://pedagogie.ac-aix-marseille.fr/physique/sciences_physiques/Menu/Simulation/Tableur_equations_differentielles/resol_equa_diff.htm

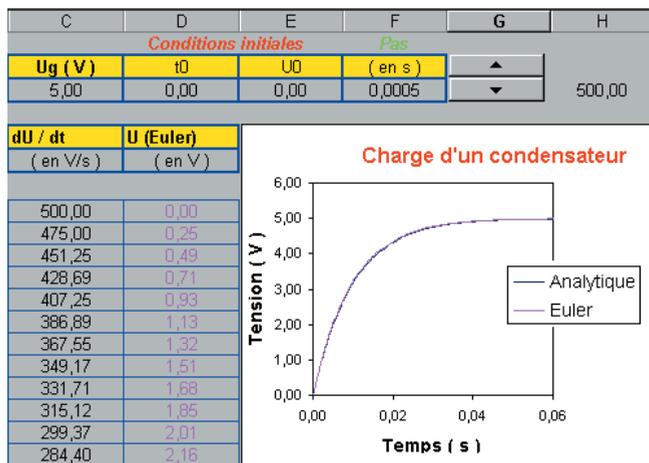


Figure 4 : Simulation numérique avec un tableur-grapheur.

D'autres logiciels nécessitent un apprentissage différent. Avec le logiciel Stella⁽⁶⁾, l'utilisateur emploie des icônes pour construire l'équation qui permet de résoudre l'équation différentielle ; l'écriture mathématique existe et s'inscrit au fur et à mesure de la

(5) Le terme est ici mis entre guillemets car, tant pour le spécialiste que pour les élèves, il ne s'agit évidemment pas d'une résolution au sens mathématique fort : l'ensemble discret de valeurs numériques est issu d'approximations numériques et ne correspond pas nécessairement à une fonction mathématique explicite.

(6) Le logiciel Stella est distribué par KBS (Paris). Pour plus de détails, voir aussi :

<http://www.hps-inc.com/STELLAdemo.htm>

<http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Jipsp8/Resource/Stelnet.htm>

constitution du modèle (visible sur demande). Les résultats du calcul sont ensuite affichés sous forme de tableaux ou de représentations graphiques.

Ce logiciel très polyvalent (physique, chimie, biologie, économie...) est construit autour d'un moteur, en fait un intégrateur, qui permet de résoudre les systèmes d'équations différentielles les plus divers, du plus simple au plus complexe.

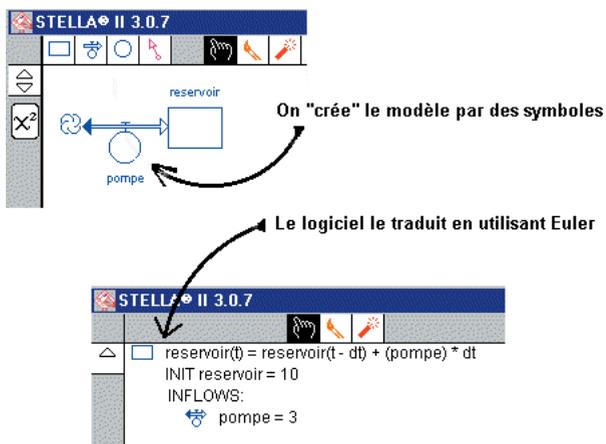


Figure 5 : Simulation « iconique » avec Stella®.

1.4. Simulation pour faire comprendre

Dans d'autres circonstances, le modèle mathématique est explicite, et peut être la base de calculs et de tracés [9] permettant de représenter, illustrer, dans le but de mieux faire comprendre tel ou tel phénomène. Il existe des appliquestes (applets en anglais) très démonstratives, peu interactives mais avec un objectif précis. On trouve cet exemple sur l'effet Doppler à l'adresse suivante :

http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/doppler/doppler.htm

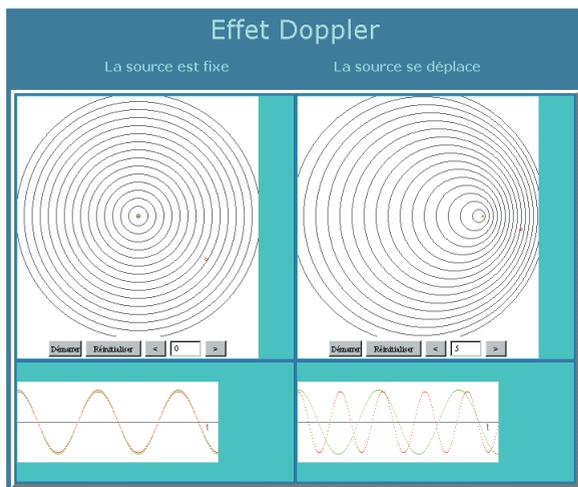


Figure 6 : Appliquette pour visualiser l'effet Doppler.

La propagation des ondes est visualisée par des fronts d'onde, lorsque la source est fixe ou en mouvement (on peut modifier la vitesse de la source). La différence de perception est mise en évidence directement sur la représentation mais aussi en déplaçant le point d'observation (« point rouge ») et en observant l'effet sur la courbe donnant la période du phénomène.

Cet exemple permet une réflexion et une « visualisation » très intuitive à propos d'un phénomène assez complexe et

surtout manipulant des notions très abstraites. D'autres appliquestes sur le même site :

http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/special/special.htm

La simulation permet aussi de préciser des méthodes et d'illustrer des notions souvent trop peu développées. Par exemple la constitution d'une image en optique.

Pour trouver l'image complète de la bougie, il faut construire l'image de chaque point-source qui constitue l'objet. Le logiciel RayTrace permet une animation : l'origine du faisceau représenté décrit le contour de l'objet (la bougie allumée ici) et on voit l'intersection des rayons émergents (en fait leurs prolongements) construire pas à pas (avec un pas réglable) la totalité de l'image.

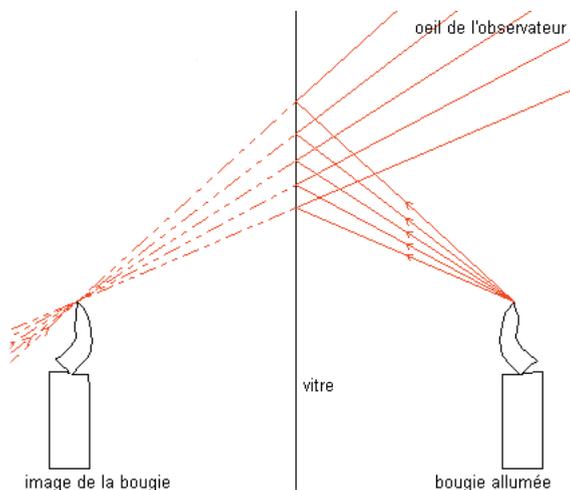


Figure 7 : Visualisation des rayons et de leurs prolongements avec RayTrace.

La version d'évaluation de RayTrace est téléchargeable à l'adresse suivante :

<http://members.ozemail.com.au/~imesoft/index.html>

Le fichier qui permet de réaliser l'exemple précédent se trouve sur le site de l'INRP, « Activités expérimentales avec l'ordinateur en sciences physiques » à l'adresse :

<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Acts simul/RT2.htm>

1.5. Simulation pour résumer, mémoriser

Les mêmes outils numériques peuvent être utilisés pour résumer une situation ou pour aider la mémorisation de propriétés. Dans le cas des interférences lumineuses (expérience des trous d'Young), une appliqueste permet de modifier les paramètres tant géométriques (L , d , ...) que physiques (longueur d'onde) et d'observer les modifications de la visualisation du phénomène.

Cette visualisation consiste en une animation de l'image figurant l'écran d'observa-

tion, ainsi que la courbe illustrant les variations de l'intensité lumineuse.

De même une autre appliquette présente le phénomène de diffraction par une fente, puis par un trou circulaire. Ensuite la limitation du pouvoir de résolution par la diffraction dans un instrument d'optique apparaît très simplement : l'image ci-contre illustre le critère de Rayleigh dans le cas de deux objets lumineux ponctuels vus à travers l'instrument.

Elle est proposée à l'adresse suivante :

http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/special/special.htm

D'autres exemples sont à l'adresse :

http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/optique/diffraction.htm

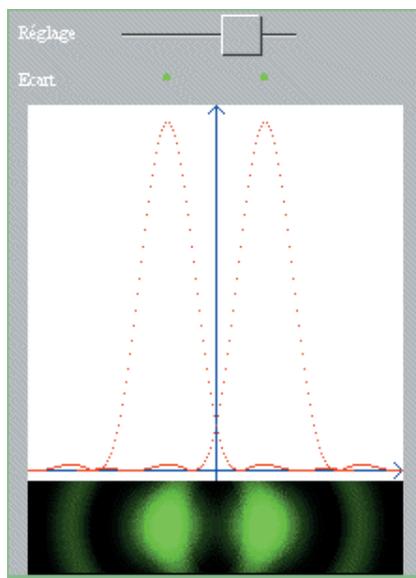


Figure 8 : Appliquette pour l'étude du critère de Rayleigh.

1.6. Simulation pour explorer une situation de TP

On peut rendre les élèves plus actifs, par exemple pour expliquer le principe d'une manipulation envisagée (focométrie par autocollimation) : ici le déplacement de l'objet permet de constater qu'une position particulière de l'objet donne une image de même taille mais renversée : cette position correspond au plan focal objet (logiciel RayTrace).

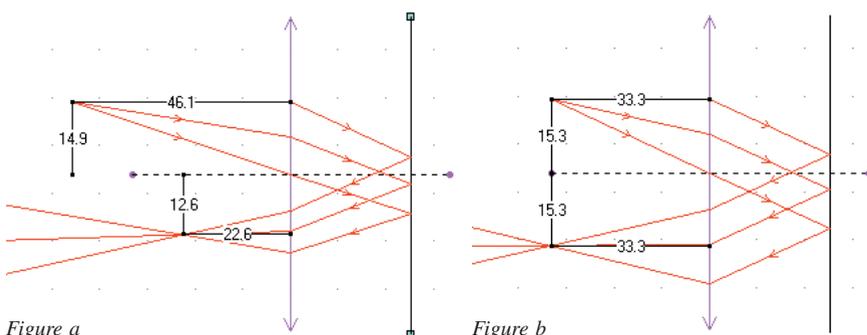


Figure 9 : Étude du principe de l'autocollimation avec RayTrace.

La justification du principe de la méthode d'autocollimation peut être plus efficace, et l'exploration rapide du rôle de la position du miroir est intéressante (dans la figure b, le déplacement du miroir laisse l'image inchangée, ce qui n'est pas vrai dans la figure a). Le fichier qui permet de réaliser l'exemple précédent se trouve sur le site de l'INRP,

«Activités expérimentales avec l'ordinateur en sciences physiques» à l'adresse :

<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimul/RT2.htm>

(choisir dans la liste en fin de page le fichier seance05.zip qui contient autocoll.ray).

2. NATURE ET FONCTIONS DE LA SIMULATION

La présentation de ces quelques exemples, où apparaît la diversité des logiciels, de leurs utilisations et des objectifs assignés par l'enseignant, montre la nécessité de s'interroger sur la cohérence entre outil, activités et objectifs pédagogiques et donc d'essayer de situer au mieux la place et le rôle de la simulation.

2.1. La simulation comme mise en fonctionnement des modèles

L'enseignement de la physique consiste, entre autre, à mettre en relation *la réalité*⁽⁷⁾ (les phénomènes, les objets, les appareils...) avec les *théories* et les *modèles* conçus ou imaginés par le physicien. La simulation est alors présentée comme un intermédiaire intéressant pour faciliter le passage entre réalité et théories. Mais cette dernière formulation laisse sous-entendre une sorte de symétrie entre théorie d'un côté et réalité de l'autre. La première remarque consiste alors à clairement indiquer qu'il n'en est rien ! Les simulations sur ordinateur sont pratiquement toujours fondées sur un modèle, exprimé sous forme de relations mathématiques qui peuvent faire l'objet d'une programmation. En d'autres termes, *la relation entre simulation et modèle ou théorie est*, la plupart du temps et dans tous les cas qui concernent l'enseignement⁽⁸⁾, *un lien constitutif de la simulation*.

On trouvera en effet des environnements de simulation construits à partir des modèles théoriques tels que la loi d'Ohm, la deuxième loi de Newton, les modèles de forces en $1/r^2$, en $-k.x$, le modèle du rayon lumineux en optique et les lois de Descartes, etc.

La simulation doit donc bien être perçue comme un espace « nouveau » dans lequel les manipulations se

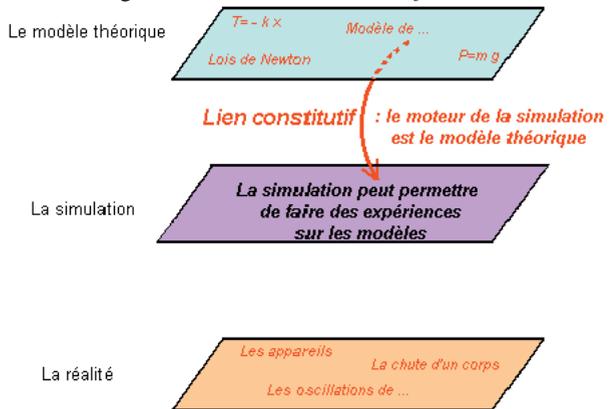


Figure 10 : La simulation entre réalité et théorie.

(7) La réalité évoquée/invoquée ici est bien celle du physicien dont on sait qu'elle est spécifique et dépendante des connaissances du moment. Nous prenons le mot dans le sens d'une simple référence empirique, sans entrer dans des questions épistémologiques.

(8) Très peu de logiciels utilisent des données prises dans la réalité ; cette situation se rencontre par contre dans l'enseignement de la biologie et de la géologie.

font avec les modèles théoriques imaginés par le physicien.

La première conséquence est alors que l'utilisation de la simulation, vue comme une manipulation de modèles, impose que le modèle soit explicite et connu des élèves ou étudiants.

Ce point est particulièrement important puisqu'il conditionne l'activité elle-même, et donc le sens que pourra lui donner l'apprenant. Suivant les cas, le modèle théorique pourra être :

- ◆ fondé sur une loi ou une relation « intégrée » : mouvement d'un satellite obtenu à partir des lois de Kepler, trajectoire dans le champ de pesanteur calculée sur le modèle d'une parabole, résonance d'intensité étudiée à partir de l'expression de l'impédance totale du circuit, figures d'interférences ou de diffraction calculées à partir des fonctions mathématiques explicites.
- ◆ fondé sur des équations locales dans l'espace et dans le temps, définissant l'évolution en un point à une date : équation différentielle du mouvement, équations élémentaires de chaque composant d'un circuit, succession de processus aléatoires, etc.

On voit bien ici, par exemple, que d'un côté il n'y aurait guère de sens à proposer une activité de découverte des propriétés des mouvements des planètes avec un logiciel de simulation basé sur les lois de Kepler, et que de l'autre il n'y aurait pas plus de sens à étudier le principe d'inertie à l'aide d'un logiciel fonctionnant par intégration de la seule deuxième loi de Newton...

2.2. La simulation comme environnement informatique

Les remarques précédentes amènent à l'évidence à s'interroger sur le fonctionnement du logiciel et les risques de confusion entre données, calculs et représentation. En fait, le plan intermédiaire représenté ci-dessus est en réalité constitué de plusieurs « couches » permettant « l'implémentation » du modèle et la production de « résultats ». On peut en effet considérer qu'un environnement de simulation est constitué de trois plans :

- ◆ un plan « informatique » (niveau numérique) qui contient la mise en code informatique du modèle et effectue les calculs nécessaires à la simulation ;
- ◆ un plan de « représentation symbolique » (interface graphique) regroupant les symboles (les schémas électriques, les schémas de ressorts...) ainsi que les résultats des calculs (sous formes de tableaux de nombres ou de représentations graphiques) ;
- ◆ un plan de « représentations figuratives » qui permet d'offrir une représentation imagée plus réaliste du modèle, en jouant sur les enrichissements ou l'animation : planète ou fusée représentée en tant que telle dans sa forme et son mouvement, schéma de lampe qui clignote, ressort en oscillation, etc.⁽⁹⁾.

Outre la réponse aux risques de confusion précédemment évoqués, l'explicitation de

(9) Voir un exemple en annexe 1.

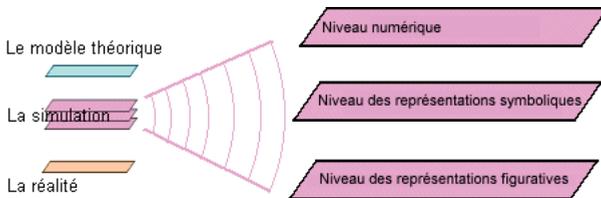


Figure 11 : Structure d'un environnement de simulation numérique.

ces niveaux met en lumière l'aspect « numérique » de la simulation. Cet aspect est essentiel pour au moins deux raisons :

- ◆ La compréhension de la tâche : conformément à la remarque faite au paragraphe précédent, il n'y a scientifiquement de sens de rechercher les propriétés « intégrales » d'un mouvement par exemple que si les calculs sont réalisés à partir des équations locales (différentielles) ; mais il faut ajouter ici la difficulté qu'il peut y avoir pour les élèves et étudiants à comprendre que la « solution » recherchée n'est pas déjà dans le logiciel ! Qu'il s'agisse de mouvement de planètes, de systèmes oscillants ou de cinétique chimique, l'interprétation des courbes intégrées comme résultat d'un traitement d'équations différentielles fondamentales est loin d'être évidente. À ce titre, l'introduction du principe de la méthode d'Euler que nous évoquions en introduction est une nécessité.
- ◆ Les compétences nécessaires : l'utilisation d'un logiciel de simulation numérique conduit inévitablement à des connaissances et compétences nouvelles, hors du champ habituel de la physique. Ainsi, l'exemple ci-dessous des rebonds d'une bille sur un support montre l'importance du choix du pas de calcul : l'utilisation (parfois implicite) d'un pas de calcul trop grand peut rendre le support « transparent » à la bille ! (cf. figure 12a). L'élève peut alors être tenté d'épaissir le support (cf. figure 12b), alors qu'il s'agit de diminuer le pas du calcul... (cf. figure 12c).

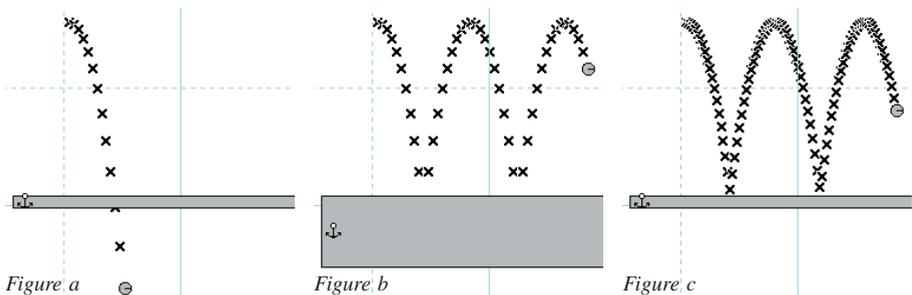


Figure 12 : Un exemple d'artefact numérique.

Au passage, cet exemple montre l'exigence correspondante au niveau des logiciels eux-mêmes : ils doivent donner accès au modèle mais également au mode de calcul utilisé (algorithme) et aux paramètres de la méthode.

2.3. Les environnements de simulation : quels points d'entrée ?

La richesse des environnements de simulation évoqués ci-dessous, conduit à l'évidence à une certaine complexité. En l'absence d'une clarification des niveaux d'entrée, des niveaux d'action, l'activité peut entraîner de nombreuses confusions : effets perçus comme ceux du modèle au lieu d'artefacts numériques, jeu sur la réalité au lieu de manipulation d'un modèle, etc.

L'ergonomie avancée et l'interactivité des logiciels actuels, permettent en effet, à partir de l'évocation de phénomène et la représentation d'objet, de simuler des situations très diverses dont on suit l'évolution en direct sur l'écran.

Le schéma proposé précédemment peut être repris et complété pour visualiser les différentes situations. Ainsi, dans certains cas, la relation théorie-simulation (flèches n° 3) est tout à fait explicite. C'est celui, par exemple en mécanique, où l'étudiant écrit réellement l'équation différentielle (avec les tableurs type Excel) ou sous forme d'icônes (avec les logiciels type Stella). Ensuite il écrit réellement des éléments du programme (avec les tableurs type Excel) ou participe à certains choix de calcul (avec les logiciels type Stella). Puis enfin il choisit d'afficher les résultats issus de « son » calcul, résultats dont l'origine est ainsi bien identifiée.

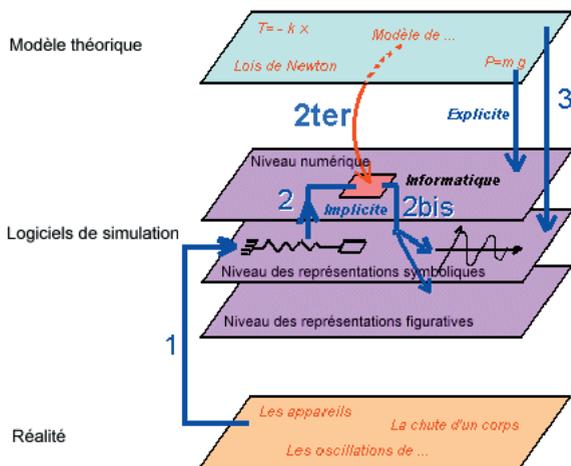


Figure 13 : Différents types d'action sur la simulation d'un système.

Au contraire, dans d'autre cas, le choix du modèle n'est pas fait par l'étudiant, il est préexistant ou simultané au choix des « objets iconiques » ; l'étudiant dessine des représentations des objets (objets massifs avec Interactive Physique, lentilles avec RayTrace, etc.), puis obtient l'affichage des résultats et parfois l'animation du système simulé. Mais dans ce cas, c'est un lien excentré et incomplet qui est mis en jeu : celui représenté par la flèche n° 1 qui passe de la réalité à un espace de représentation plus ou moins symbolique. Ce faisant, est passé sous silence le fait que la mise en fonctionnement du modèle passe par « l'informatisation » de celui-ci (flèches n° 2 et 2 bis) et donc par l'adjonction de limites informatiques. Est également passé sous silence le fait qu'il s'agit bien à la base d'un modèle de physicien ou de chimiste reposant sur l'application de lois, théorèmes, etc. et le choix d'hypothèses spécifiques (flèche n° 2 ter).

On voit donc que l'indispensable clarification repose en premier lieu sur l'informa-

tion fournie par l'auteur du logiciel puisque, selon le cas, la relation entre le modèle choisi (dans le plan de la théorie) et la simulation apparaîtra de façon explicite ou au contraire sera complètement masquée à l'utilisateur. En second lieu, il est de la responsabilité de l'enseignant de prendre en charge l'explicitation, voire l'explication, des différents éléments qui constituent l'environnement et donc les modes d'action de l'élève.

3. DES ACTIVITÉS

La position intermédiaire du plan de la simulation, et en particulier la séparation entre les plans de représentations de celui de l'informatisation, permet de bien situer les différentes activités que l'on peut rencontrer : il y a en effet tout un ensemble d'activités (généralement proposées au niveau d'enseignements du supérieur : université, CPGE) centrées sur la programmation de calculs permettant la résolution de problèmes plus ou moins complexes et/ou la visualisation graphique de modèles physico-mathématiques [10]. L'activité est donc centrée sur la liaison entre le plan des représentations et celui de la programmation. Une autre activité peut être centrée sur la mise en relation de la simulation et du monde des modèles et théories. L'activité visera alors, soit l'explication « conceptuelle » du résultat, soit la résolution analytique permettant de retrouver de façon explicite le résultat obtenu par simulation. Le premier cas renvoie généralement à des éléments de physique qualitative ou à l'application directe de principes de base pouvant être facilement mis œuvre au niveau secondaire. Dans le second cas les modèles conduisent rapidement, en mécanique notamment, à des considérations qui relèvent du supérieur. Enfin, l'activité peut être centrée sur la mise en relation des résultats de la simulation et du monde réel. Il s'agit alors de retourner à l'expérience pour confronter, qualitativement ou quantitativement, les résultats rendus par le modèle ; la difficulté, mais aussi l'intérêt, réside alors évidemment dans l'écart irréductible qui, par nature du modèle, va séparer ce dernier de l'expérience (*cf.* un exemple en annexe 2).

Nous proposons ci-dessous des activités plus spécifiques respectant les choix didactiques précédemment présentés : construire ou manipuler un modèle. Les exemples de réalisations en situation de classe qui terminent ce paragraphe dans les domaines de l'optique et de la mécanique mettent en évidence la nécessité d'associer un guide spécifique à l'activité.

3.1. Construire un modèle

Les activités des élèves seront très différentes selon les logiciels et les modèles (explicites ou implicites) mis en jeu, et l'importance de l'intervention du professeur sera modulée en conséquence.

Avec un tableur, l'activité débute par le choix du modèle théorique et ainsi par l'écriture de l'équation différentielle. Ensuite, la résolution nécessite des compétences spécifiques (à la programmation) sur le logiciel utilisé (Excel) par exemple, mais aussi sur le détail de la méthode du calcul (Euler) par exemple. L'activité envisagée devra en

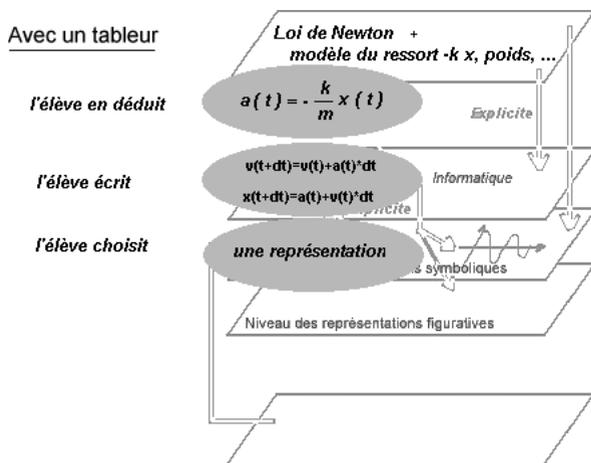


Figure 14 : Activité avec un tableur.

méthode du calcul (Euler par exemple). L'élève est déchargé de la construction du modèle numérique mais peut lire le résultat de sa construction « symbolique ». L'activité envisagée devra en tenir compte. Cependant, la métaphore pompe-réservoir est peu adaptée à certaines grandeurs physiques.

Avec un logiciel comme Interactive Physique, le modèle est bien relié à la théorie mais le lien est déjà fait par le logiciel quand l'élève travaille dans le plan des représentations ; ceci ne nécessite pas de compétences sur le logiciel utilisé (pour l'aspect programmation), mais oblige l'enseignant à un pointage très fort sur le détail de la méthode du calcul (choix du modèle, Euler, pas du calcul...). Si l'élève est déchargé de la construction du modèle numérique, il peut ne pas voir ou oublier très vite le lien avec la théorie. L'activité envisagée devra en tenir compte. Mais la construction de situations complexes est possible sans être ralenti par les difficultés d'ordre mathématique.

Avec le logiciel RayTrace, en optique, la construction d'un appareil ou l'étude de l'œil par exemple peut faire l'objet d'une activité d'élaboration avec un objectif (former une image nette sur la rétine), avec ses choix (une lentille pour le cristallin et/ou modèle

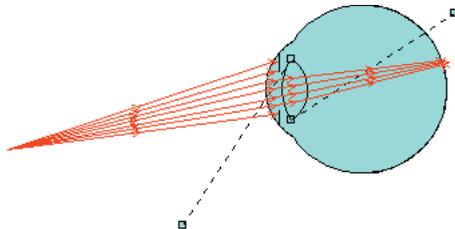


Figure 15 : Modélisation de l'œil.

dioptrique), ses discussions (rôle de l'iris), ses limites (prise en compte de la cornée), l'étude d'un œil trop ou pas assez profond et sa correction avec des lentilles...

3.2. Manipuler un modèle

Dans ce cadre, la simulation est comprise dans un sens fort : la manipulation du modèle (issu de la théorie) permet un vrai travail d'investigation sur le fonctionnement dudit modèle. Avec Interactive Physique, mais à condition de bien préciser le modèle « caché » dans le logiciel, on peut par exemple compléter l'étude du phénomène de résonance.

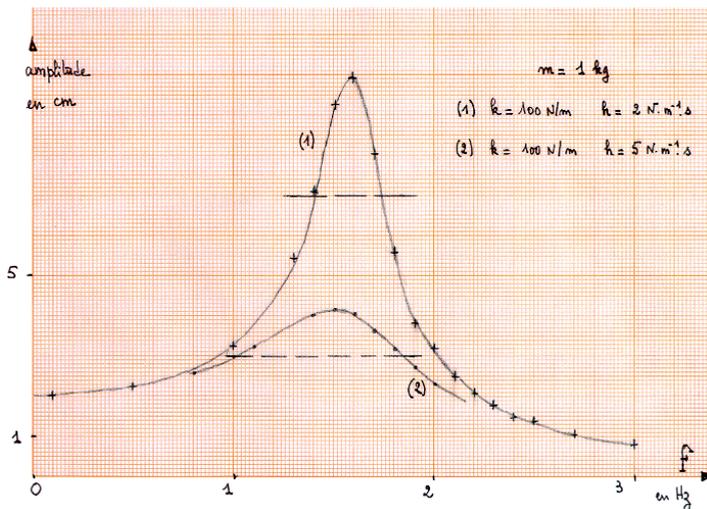
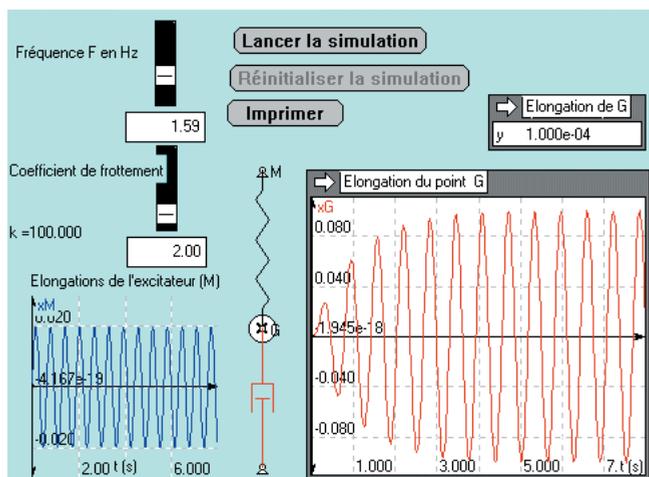


Figure 16 : Expérimenter sur modèle : exemple en mécanique.

Le modèle testé est un objet-oscillant soumis à des forces en $-kx$ et $-h v$, le poids mais aussi à l'action d'un moteur M ayant ici un mouvement sinusoïdal. L'observation de la courbe donnant l'élongation de G en fonction du temps permet plusieurs analyses (influence de m , de k , de h , de la fréquence...). L'analyse entre cause et effet (par exemple, on modifie la valeur de k , de l'amortissement, ...) ne doit pas se contenter de l'observation de l'écran (la masse qui oscille plus ou moins, la courbe $f(t)$...) puisque ces deux représentations symboliques sont pilotées par le même calcul et le passage (type déductif) de l'un à l'autre n'a pas de sens. Il faut recréer les liens qui sont dépendants du modèle théorique si l'on veut que l'élève manipule réellement le modèle. Le fonctionnement du modèle permet, en modifiant la fréquence, de relever la valeur maximale atteinte pour tracer la courbe de résonance sur papier millimétré, et cela pour des amortissements différents.

La manipulation du modèle passe aussi par l'utilisation raisonnée des différentes représentations. Celles-ci interviennent de plusieurs façons :

- ◆ soit on favorise l'apprentissage de la maîtrise de ces représentations (vecteurs, courbes, passage de l'une à l'autre, ...)
- ◆ soit, une fois acquise, cette maîtrise des représentations permettra d'interpréter les résultats dans des situations plus complexes (mise en évidence du glissement ou du roulement dans l'exemple des cylindres et de la plaque oscillante abordé au paragraphe 1.2.).

En fin de compte on favorise la recherche des grandeurs physiques les plus pertinentes.

Mais quels que soient les exemples choisis ou les classes concernées, la question de la validation de la simulation est cruciale. En effet, comme nous l'avons montré, la simulation numérique est limitée par les artefacts des méthodes de calcul. La validation d'un résultat ne peut généralement être faite qu'en référence à la théorie « pure » ou à l'expérience. Nous avons donné quelques exemples dans ce sens, mais - notamment dans l'enseignement secondaire - l'expérience n'est parfois pas réalisable (amplificateur non idéal, frottements non nuls, forces trop faibles, durée trop longue, etc.) et, d'un autre côté, le calcul théorique est inaccessible aux élèves. On voit alors que la validation du résultat ne peut reposer que sur deux éléments : la confiance faite au logiciel (et à leurs auteurs), et l'autorité de l'enseignant qui validera les résultats obtenus... Il faut cependant noter que ces deux cas de figure sont « classiques » dans l'enseignement. Notre remarque vise à attirer l'attention sur l'intérêt qu'il peut y avoir à proposer des activités initiales de prise en main du logiciel où le bon fonctionnement est alors « vérifié » sur des cas connus. La difficulté pédagogique, on l'aura compris, est alors de ne pas laisser croire que, pour paraphraser des commentaires d'élèves et d'étudiants, « de toutes façons, la solution est déjà dans le logiciel ».

3.3. Exemples de réalisations en situation de classe : comment guider les élèves dans une activité de simulation ?

Le premier exemple est la réalisation d'un ensemble de séances en spécialité de terminale S, où nous nous étions fixé un objectif d'autonomie des élèves avec le logiciel Ray-Trace. L'activité s'est ainsi déroulée sur neuf séances de cours et une séance d'exercices. Elle a concerné deux groupes d'élèves de terminale de la spécialité physique (seize et dix-sept élèves), de deux classes différentes.

Nous avons donc privilégié un apprentissage progressif du logiciel et nous avons remplacé l'aide du logiciel par un fichier (fichier .hlp) composé de trois parties :

- ◆ un guide d'activité sur neuf séances recouvrant la majeure partie du programme. Le guide propose les simulations et les expériences que doivent réaliser les élèves. L'élève dispose également d'un polycopié à compléter permettant des prises de notes rapides mais organisées ; cette méthode donne au professeur la possibilité de construire des synthèses en commun tout en laissant une certaine autonomie aux élèves ;
- ◆ une aide technique sur la manipulation du logiciel : des indications concernant la prise en main du logiciel sont regroupées dans une « aide générale de RayTrace ». Ces indications sont également accessibles directement depuis le guide d'activité lorsque qu'une situation nouvelle nécessitant de l'aide apparaît ;
- ◆ une troisième rubrique, présente dans le sommaire, regroupe toutes les notions d'optique géométrique nécessaires à la compréhension des activités proposées. Pour permettre une activité en autonomie, l'accès à ces connaissances de référence est également proposé dans le guide d'activités lorsque cela est nécessaire.

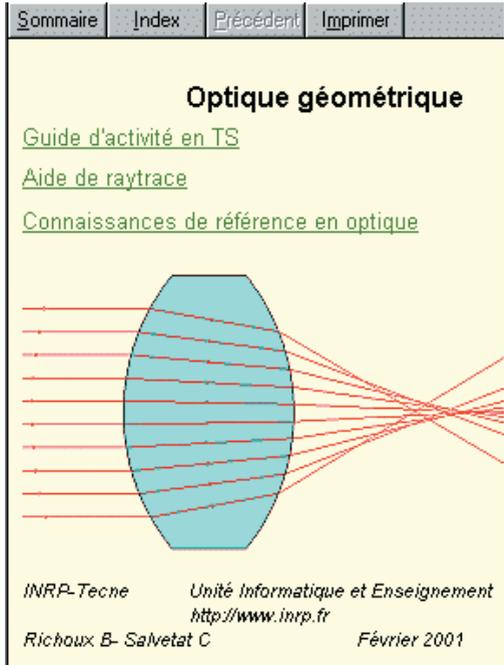


Figure 17 : Guide d'activité et aide sous forme de fichier Hlp.

L'ensemble est disponible sur le site « Activités expérimentales avec l'ordinateur en sciences physiques » de l'INRP à l'adresse suivante :

<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimul/RT2.htm>

Le second exemple est une utilisation du logiciel Interactive Physique en classe pré-

paratoire, où nous avons cherché à favoriser une activité « ouverte » d'investigation. L'apprentissage du logiciel est très réduit mais l'initiation au calcul numérique, qui peut être réalisé dans une séance précédente avec Maple® par exemple, permet d'approfondir les modèles numériques. Les exemples proposés portent sur les trajectoires dans un champ constant, les changements de référentiels, les oscillateurs. Selon la classe concernée, les situations sont proposées en mécanique du point (en PCSI) ou en mécanique du solide (en PC).

Le travail en autonomie est favorisé par la présence, sous forme de pages HTML, de guides et d'aides portant sur le logiciel, les questions de méthode et de physique (visible en haut de chaque page).

L'écran est alors partagé en deux fenêtres, l'une contenant la page précédemment décrite, l'autre contenant le logiciel Interactive Physique.

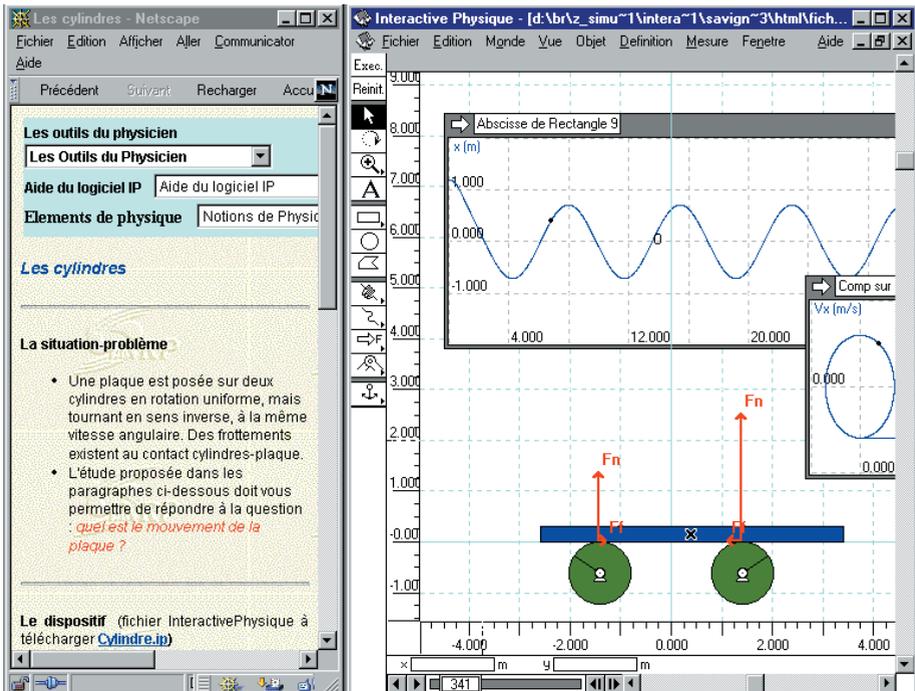


Figure 18 : Guide d'activité et aide en page web.

Après une description de l'environnement à étudier, la question proposée est très ouverte, pour inciter l'étudiant à un questionnement pertinent. Après une période de réflexion-essais-erreurs, un guide (sous forme de pages HTML imbriquées) est proposé pour permettre à l'étudiant de vérifier si tous les points intéressants ont été abordés. Une étude théorique est souvent demandée et un compte-rendu sur fiche pré-imprimée termine l'activité.

4. ÉLÉMENTS DE CONCLUSION

La simulation apparaît donc aujourd'hui comme l'un des outils didactiques de l'enseignant de physique et de chimie. Prenant le cas de la physique où les logiciels et appli-quettes sont déjà très nombreux, nous avons montré leur diversité (dans le contenu, la programmation et l'ergonomie) et les activités sur modèle, à l'instar des activités expérimentales sur paillasse, que l'on peut envisager. L'hypothèse d'apprentissage implicite est ici que, si la manipulation des objets et instruments peut favoriser la compréhension et la mémorisation, il en est *a priori* de même avec le champ théorique. C'est dans ce sens qu'A. DUREY et R. BOUROULET indiquaient à propos de l'utilisation d'Interactive Physique « *qu'un logiciel de simulation utilisant des modèles peut permettre à l'élève de se construire une représentation mentale des phénomènes physiques et des objets utilisés en physique* » (cf. note 1).

Mais, pour continuer la comparaison, si certaines activités « expérimentales » ne font pas nécessairement sens pour l'élève et peuvent, en l'absence de certaines conditions didactiques, n'apporter aucune aide à la compréhension de la physique, l'utilisation de la simulation requiert de la part de l'enseignant un travail d'élaboration mettant en cohérence logiciels et activités, ainsi que la prise en charge de l'explicitation (voire de l'enseignement) d'un certain nombre de paramètres liés à « l'informatisation » du modèle.

En particulier, pour éviter le risque de confusion « réalité-théorie », le plus simple est de séparer clairement les deux domaines et de bien présenter les activités comme des activités sur des modèles. La difficulté réside alors dans le sens des mots « modèle », « activité » et « simulation » pour les élèves, car ceux-ci n'ont pas d'idée précise de ce que signifie « modèle », donnent généralement une connotation « manuelle » au mot « activité » et n'ont de représentation de la simulation qu'éventuellement celle des jeux « vidéo ». À ce niveau, la conséquence est bien l'exigence de montrer quel modèle est pris en compte dans le logiciel et sous quelle forme. Et, prenant en compte que l'élève découvre que la simulation est aussi un outil du physicien, il convient d'appliquer d'abord cette utilisation à des cas où le modèle peut être explicité et où la méthode de calcul peut être expliquée. En l'absence de ces informations, on voit que le jeu sur le plan des représentations, autre intérêt didactique de la simulation⁽¹⁰⁾ (et autre ensemble de compétences) est un jeu délicat à maîtriser, puisque risquant de n'être qu'un travail en surface, il peut donc évidemment rester superficiel...

Nous voulons également attirer l'attention sur les difficultés que peut rencontrer l'enseignant au niveau de l'élaboration des guides d'activité. L'une d'elles est liée à l'utilisation d'un environnement informatique inconnu des élèves. Le risque est d'être amené, comme il est souvent arrivé avec l'introduction de l'ordinateur outil de laboratoire, à créer des guides d'activité comportant essentiellement des instructions relatives aux commandes et touches à utiliser successivement, et donc permettant d'aller jusqu'au bout de la tâche sans nécessairement lui donner du sens et apprendre de la physique ou de la chi-

(10) Point que nous n'avons pas développé ici ; voir [2].

mie. L'autre difficulté, connexe, est celle liée à ce qu'on appelle parfois « le degré d'ouverture » du logiciel. L'intérêt de nombreux environnements réside en effet dans l'étendue des possibilités : le système peut être préparé mais avec de nombreux « points d'action » ou, même, l'environnement de simulation peut être « vide ». Sans guide précis d'activité, l'élève ou l'étudiant peut alors rester sans savoir quoi faire ou, « au mieux », se contenter de cliquer ici ou là pour voir « ce que ça fait ». Enfin, la mise en relation des manipulations en simulation avec les modèles sous-jacents vus en cours et éventuellement les dispositifs expérimentaux utilisés en travaux pratiques (cas de l'optique géométrique, par exemple), n'est pas automatique⁽¹¹⁾ et nécessite donc une élaboration spécifique du guide d'activité.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANDRÉ D. et al. Un nouveau concept de licence-maîtrise de physique : les travaux d'expérimentation numérique, in *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1998, p. 127-131.
- [2] BEAUFILS D. Des logiciels de simulation pour modéliser et expérimenter sur modèle : quels enjeux pour les apprentissages ?, in *Actes du premier séminaire national TICE et Sciences physiques*, 2000.
<http://www.aquitaine.iufm.fr/fr/14-actualite/01-seminaires/03-scphy/>
- [3] BEAUFILS D. La simulation numérique comme élément d'une démarche expérimentale, in *Actes du colloque L'intégration de l'informatique dans l'enseignement et la formation des enseignants*, Paris : INRP-EPI, 1992, p. 100-103.
- [4] BEAUFILS D. et JOURNEAUX R. *Physique et informatique, une approche programmatique*. Versailles : CARFI, 1990, 83 pages.
- [5] BEAUFILS D. et SCHWOB M. (Eds). *Outils informatiques d'investigation scientifique dans l'enseignement des sciences physiques*. Actes de l'université d'été (Nantes, 1995), INRP-UdP, 1997, 272 pages.
- [6] BENEY M. *Contribution à l'analyse des phases manipulatoires des travaux pratiques de physique en premier cycle universitaire. Les apprentissages possibles à travers la conduite de l'action*. Thèse, Université Paris XI, 1998.
- [7] BOUCHET M. et al. Simulation de travaux pratiques en électricité, électronique et électrotechniques, in *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1998, p. 99-102.
- [8] BUTY C. *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, Lyon 2, 2000.
- [9] CNDP. *Des outils pour le calcul et le traçage de courbes*. Dossier de l'ingénierie éducative n° 19, 1995.
- [10] DEPONDT Ph. *Physique numérique (le calcul numérique sur ordinateur au service de la physique : une introduction)*. Vuibert, 1995, 324 pages.

(11) De nombreux travaux de didactique l'ont montré pour ce qui concerne les activités expérimentales : [6, 27, 29].

- [11] DURANDEAU J.-P. et SARMANT J.-P. De l'expérience à la simulation, in *Actes des 7^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1996, p. 25-32.
- [12] DUREY A. *Vers des activités didactiques de mise au point de modèle de physique avec des micro-ordinateurs. Exemples: trajectoires, frappes et rebonds de balles en rotation*. Thèse d'état, 1987.
- [13] DUREY A., LAURENT M. et JOURNEAUX R. Avec des micro-ordinateurs, faire de la physique d'abord. *Bull. Un. Phys.*, mars 1983, vol. 77, n° 652, p. 757-780.
- [14] DUREY A. et SCHWOB M. Les utilisations du micro en sciences physiques : essai de classification. *Éducation et Informatique*, 1984, n°20, p. 27-31.
- [15] DUVAL R. Registres de représentation sémiotiques et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, 1993, n° 5, p. 37-65.
- [16] GIORDAN A. et MARTINAND J.-L. (Eds). *Modèles et simulation, Actes des 9^e journées sur l'éducation scientifique*. Paris : UER didactique, 1987, Paris 7.
- [17] GIRAULT B. *Des clés pour l'électronique (travaux dirigés illustrés par simulation)*. Ellipses, 1998.
- [18] INRP. *Des logiciels de simulation pour des activités scientifiques*. 2000.
<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimul/Introsim.htm>
- [19] JÉRÔME P. L'informatique support logique de la démarche expérimentale en sciences naturelles. *APBG*, 1979, dossier.
- [20] JOUBERT R. et REBMANN G. L'atelier-schéma d'optique géométrique : un micro-monde et son environnement d'apprentissage, in *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1998, p. 183-186.
- [21] MEHEUT M. Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège, Questionnement et simulation. *Didaskalia*, 1996, n° 8.
- [22] MEN. Propositions de programme de terminale S, 2001.
<http://www.eduscol.education.fr/D0017/LLPKPRTS.pdf>.
- [23] MILOT M.C. (Coord.), BEAUFILS D., BOUROULET R., JOURNEAUX R., RICHOUX B. et DUREY A. De nouveaux outils de modélisation et de simulation : Stella, Interactive Physique, in *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1998, p. 75-84.
- [24] MILOT M.C. (Coord.), BEAUFILS D., BOUROULET R., JOURNEAUX R., RICHOUX B. et DUREY A. 1998. *De nouveaux outils de modélisation et de simulation : Stella, Interactive Physique* (brochure, 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques), Paris : UdP, 1998, 32 pages.
- [25] RADON J. Simulation de cinétiques par la technique des automates moléculaires, in *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*, Paris : UdP-INRP, 1998, p. 145-150.

- [26] REBMANN G. 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 »*, 2000 (www.u-psud.fr/siecle/).
- [27] RICHOUX H. *Rôles des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au lycée*. Thèse : didactique de la physique, Paris 7, 2000, 205 pages.
- [28] SERRA G. Résolution des équations différentielles par les méthodes de l'analyse numérique. *Bull. Un. Phys.*, juin 1999, vol. 93, n° 815 (1), p. 965-976.
- [29] ROBINAULT K. *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques*. Thèse, Lyon 1, 1997.
- [30] UdP. De nouveaux outils supports de modélisation et de simulation : Interactive Physique et Stella. Brochure UdP, JIPSP 1998.
- [31] UdP-INRP. *Actes des 7^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*. Paris : UdP-INRP, 1996, 296 pages.
- [32] UdP-INRP. *Actes des 8^{es} Journées nationales Informatique et Pédagogie des Sciences Physiques*. Paris : UdP-INRP, 1998, 256 pages.
- [33] VINCE J. *Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse nouveau régime, Lyon 2, 2000.

SUR LA TOILE

Les adresses indiquées dans cet exposé sont rappelées ci-dessous :

- ◆ « De l'utilisation du logiciel de simulation Interactive Physique », PNF Sciences physiques et chimique et TIC 25 et 26 mars 1997 :
<http://www.educnet.education.fr/phy/simulation/nantweb.htm>
- ◆ Le site de la société commercialisant le logiciel Raytrace, avec la possibilité de télécharger une version d'évaluation :
<http://members.ozemail.com.au/~imesoft/index.html>
- ◆ Le site de la société commercialisant le logiciel Stella, avec la possibilité de télécharger une version d'évaluation :
<http://www.hps-inc.com/STELLAdemo.htm>
- ◆ Le site donnant des indications succinctes sur le logiciel Stella :
<http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Jipsp8/Resource/Stelnet.htm>
- ◆ Un fichier Excel pour résoudre les équations différentielles :
http://pedagogie.ac-aix-marseille.fr/physique/sciences_physiques/Menu/Simulation/Tableur_equations_differentielles/resol_equa_diff.htm
- ◆ Exemple du cyclotron avec Interactive Physique :
<http://www2.ac-lyon.fr/enseigne/physique/docs/simul.html>
- ◆ Trois exemples d'oscillateur traités avec Interactive Physique :
<http://www.inrp.fr/Tecne/Rencontre/Jipsp8/Resource/Exemplip.htm>

- ◆ Le site du Lycée Comte de Foix qui contient des appliquettes sur l'effet Doppler, la diffraction et beaucoup d'autres exemples :
http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/doppler/doppler.htm
http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/special/special.htm
http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/optique/diffraction.htm
http://www.andorra.ad/lycee_comte_de_foix/cinetique/cinetique.htm
- ◆ Le site contenant l'appliquette sur les interférences en optique :
<http://www.u-bourgogne.fr/condorcet/InterfApple.html>
- ◆ Le site de l'INRP, « Activités expérimentales avec l'ordinateur en sciences physiques » est à l'adresse :
<http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimpl/Introsim.htm>
puis : <http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimpl/RT2.htm>
ou : <http://www.inrp.fr/Tecne/Acexosp/Actsimpl/IP2.htm>
- ◆ Option « Physique en ligne » (DEUG SM d'Orsay) :
<http://formation.etud.u-psud.fr/physique/pel/Index.htm>

On trouvera d'autres compléments aux adresses suivantes :

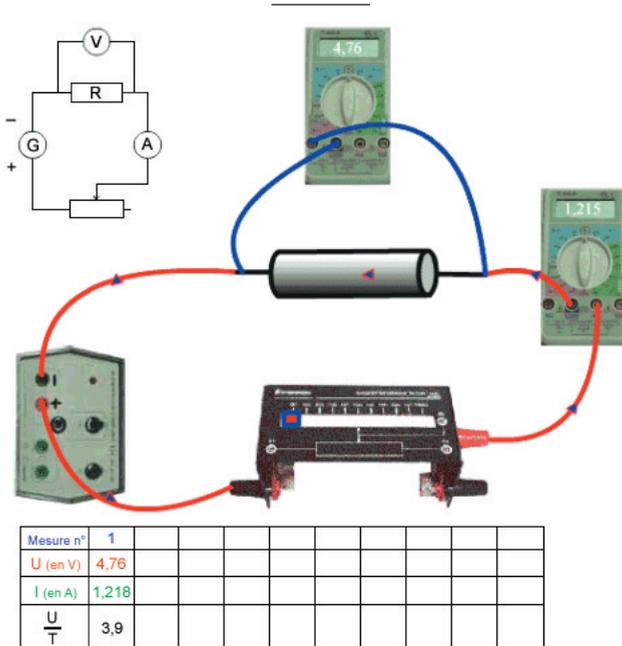
- ◆ Des appliquettes en optique géométriques :
<http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/optigeo/diopsher.html>
- ◆ Des animations en électronique, chimie industrielle, nucléaire...
http://www.cnam.fr/instituts/evariste/2_themes/flash_2.htm
- ◆ Une animation portant sur le pendule :
<http://web.avo.fr/papik/physique/animHTML/animA1.html>
- ◆ Une animation sur les ondes :
<http://members.nbci.com/surendranath/Lwave/Lwave02.html>
- ◆ Une cours avec des animations sur la modulation :
<http://www.ac-nice.fr/physique/modulation/modamfm.htm>
- ◆ Des notes de cours avec une animation sur Fourier :
<http://www.ac-nice.fr/physique/Fourier/fourier.htm>

D'autres logiciels de simulation :

- ◆ Electronic WorkBench (EWB) : logiciel de Interactive Image Technologies (<http://www.interactiv.com>), distribué par Isti (France : <http://www.istica.com>).
- ◆ Cabri-Géomètre (logiciel de géométrie distribué par Texas Instruments, <http://www.ti.com/calcl/>) : conception Université Joseph Fourier de Grenoble.
- ◆ Cabri et CabriJava (tout domaine de la physique) :
<http://www.up.univ-mrs.fr/~laugierj/indexjml.html>
- ◆ Gassim : simulation de gaz (modèle particulaire) :
<http://www.ozemail.com.au/~imesoft/index.html>

Annexe 1

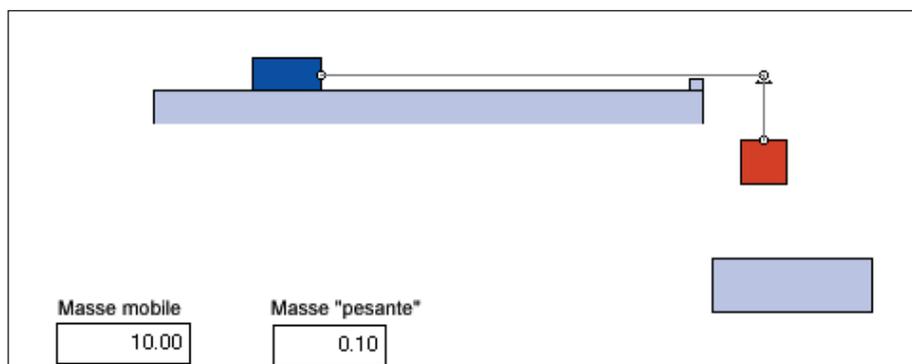
Exemple de représentation figurative



Annexe 2

À titre d'exemple, nous évoquons l'étude d'une situation classique : « *un solide peut glisser sans frottement sur une surface horizontale. Il est tiré par un fil au bout duquel est suspendue, via une poulie, une masse. Cette dernière descend jusqu'à toucher le sol.* Question : *décrire le mouvement du mobile sur la table* ».

Le premier point est de noter que cette question peut très bien être entendue dans son énonciation théorique ci-dessus. La question est alors, que dit la théorie, que dit le modèle ? La simulation avec Interactive Physique par exemple, ne pose pas de difficulté :



Après une phase de prédiction des élèves, de discussion et d'argumentation entre eux, l'utilisation du logiciel de simulation peut être proposée. La manipulation du modèle, le jeu sur les valeurs des masses, l'obtention de valeurs numériques ou de graphiques permet alors une réelle investigation. La réponse fournie par la simulation (une phase uniformément accélérée, dont l'accélération dépend des valeurs des deux masses, et une seconde phase de mouvement uniforme). La suite de l'étude, suivant les difficultés rencontrées lors des prédictions, peut alors consister en la recherche d'une interprétation théorique valide : à un niveau « conceptuel » par l'application de l'énoncé qualitatif de la seconde loi de Newton et celle du principe d'inertie, ou à un niveau quantitatif et mathématique par la mise en équation du mouvement dans les deux phases. Mais la suite peut aussi être la confrontation à l'expérience. Dans ce cas, il s'agit clairement de mettre en place un dispositif qui est au plus près des conditions fixées par la situation-problème : un banc à coussin d'air, une poulie de faible masse et de faible frottement, etc.