

Richesses et limites d'un « modèle matérialisé » informatisé en optique géométrique

Wealth and limits of a computer-based « materialised model » in geometrical optics

Christian BUTY

UMR ICAR – équipe COAST, CNRS-INRP-Université Lyon II
ENS LSH
15, parvis René-Descartes
69342 Lyon cedex 07, France.

Résumé

D'une part l'article décrit l'incorporation d'un modèle matérialisé informatisé dans une séquence d'enseignement en optique géométrique, et les hypothèses d'apprentissage qui le fondent, d'autre part il rend compte de l'analyse de l'activité des élèves utilisant ce modèle dans une classe réelle de Terminale. Il en ressort indubitablement que cet outil favorise la construction de sens et les processus de modélisation, et que ces effets positifs sont liés à ses conditions d'utilisation et notamment à l'intervention de l'enseignant.

Mots clés : *modélisation, TICE, activités prédictives, optique géométrique, milieu didactique.*

Abstract

The paper shows first how a computer-based materialised model can be implemented in a teaching-learning sequence in geometrical optics. Then it gives results from the analysis of the students activity when using this materialised model in a real class in the last level of upper secondary school. The conclusion is certainly that this tool facilitates the meaning construction and modeling processes, but that this positive effect is related to its conditions of use and in particular to the teacher intervention.

Key words : modeling, ICT, predictions, geometrical optics, learning environment.

Le développement et la banalisation dans les classes des Technologies de l'Information et de la Communication appliquées à l'Enseignement (TICE) exigent des didacticiens, en particulier de la physique, de produire un cadre théorique pour appréhender et conduire les phénomènes didactiques qui accompagnent cet usage des TICE. Le travail réalisé a pour objectif, dans un contexte particulier et limité, de fournir des éléments pour la construction de ce cadre et pour l'analyse des activités des élèves lorsqu'ils se servent de telles technologies. L'article se base sur l'analyse du déroulement d'une séquence d'enseignement en optique géométrique, en classe de Terminale (enseignement de spécialité Sciences Physiques¹), où intervenaient des simulations informatiques. Cette séquence, construite *ad hoc* dans une collaboration entre des enseignants du secondaire et le chercheur, comprend quinze « situations », et s'étend sur huit séances de deux heures de cours-TP, à raison d'une séance par semaine.

1. NOTRE CADRE THÉORIQUE : DEUX MONDES POUR ENSEIGNER ET APPRENDRE LA PHYSIQUE

1.1. Les processus de modélisation en didactique des sciences

Sinaceur décrit bien la suite de sens différents qu'a pris le mot « modèle » au cours de l'histoire des sciences : depuis le sens originel et très concret de *maquette* architecturale, un modèle a toujours assumé « *une fonction heuristique dans le processus de connaissance théorique ou technique* » (Sinaceur, 1999, p. 649). Par conséquent, qu'il soit « matérialisé » ou non, le modèle n'est pas censé « *reproduire fidèlement un*

phénomène, mais au contraire le simplifié[r] suffisamment pour pouvoir l'analyser, l'expliquer... et en prédire... la répétition » (*ibid.*, p. 649). Un modèle présente inévitablement une « *double face abstraite-concrète [qui] le rend apte à remplir le double rôle d'illustration et de support de preuve d'une part, de paradigme et de support d'analogies d'autre part* » (*ibid.*, p. 651).

Il serait surprenant que l'usage du terme modèle dans l'étude de l'enseignement scientifique diminue sa polysémie intrinsèque : au contraire on doit intégrer de nouvelles significations, issues des points de vue différents des personnages de la scène éducative. Ainsi Gobert & Buckley (2000), comme Gilbert & Boulter (1998), distinguent-elles les *modèles mentaux*, représentations internes et individuelles du système ou du phénomène modélisé, et les *modèles exprimés*, figurations externes dudit système par un moyen quelconque, dessin, discours ou maquette ; parmi les modèles exprimés, les *modèles-consensus* font l'objet d'un accord dans un groupe donné de scientifiques ou d'apprenants, et les *modèles d'enseignement* sont destinés à faire comprendre, dans un contexte scolaire, tel ou tel phénomène ou théorie scientifique.

Parmi ces modèles d'enseignement, Harrison & Treagust (2000) distinguent plusieurs catégories, et pointent deux problèmes importants :

- beaucoup de concepts scientifiques mettent en jeu des processus et non des objets ; l'exemple que prennent les auteurs est l'équilibre chimique, mais on peut en dire autant de la formation des images optiques. C'est une source de difficultés pour les apprenants, si l'explicitation de ce caractère de processus n'est pas prise en compte dans l'enseignement ;

- les simulations dynamiques (notamment informatisées), qui peuvent articuler plusieurs types de modèles, permettent de modéliser des phénomènes aussi complexes que le réchauffement de la planète ou les fluctuations d'une population d'insectes ; mais le revers de la médaille est qu'elles peuvent très facilement être confondues avec la réalité par l'utilisateur.

Il reste que, selon les termes de Harrison & Treagust, « *la modélisation est l'essence de la pensée et du travail scientifique* » (*ibid.*, p. 1011).

1.2. Le cadre théorique des deux mondes

Notre cadre théorique général, qui déborde largement le cas des simulations informatiques, résulte de trois choix fondamentaux :

- 1 Désigner les processus de modélisation comme moteur principal du fonctionnement de la physique comme discipline d'enseignement ;

– 2 Donner la priorité au point de vue de l'apprenant dans l'analyse des phénomènes didactiques ;

– 3 Assumer l'hypothèse que le fonctionnement cognitif de l'apprenant peut s'apprécier en termes de processus de modélisation.

Autrement dit, l'objectif de ce cadre théorique (que l'on appellera « des deux mondes », ou « des niveaux de savoir ») est de donner des outils d'analyse à la fois du fonctionnement de la physique enseignée (le contenu des séquences d'enseignement entre autres) et de l'activité cognitive des élèves quand ils sont en classe de physique, par le biais, entre autres, de leurs verbalisations.

Mettre en application ce cadre théorique consiste à classer les connaissances contenues dans un texte, ou les productions langagières des acteurs, en deux catégories : celles qui réfèrent au monde des théories et des modèles, celles qui réfèrent au monde des objets et des événements.

Depuis l'article *princeps* de Tiberghien (1994), ces choix fondamentaux ont nourri un certain nombre de travaux de recherche dans des domaines divers de la physique ou de la chimie : Bécu-Robinault, 1997a ; Guillaud, 1998 ; Quintana-Robles, 1997 ; Séjourné, 2001 ; Vince, 2000.

1.2.1. Le monde des théories et des modèles

Une théorie physique est une totalité articulée de concepts ; chaque concept est défini (Vergnaud, 1990) par ses relations avec les autres concepts de son champ, par un ensemble de situations de références où il s'applique, par un signifiant distinctif, par un ensemble de situations de validation (Balacheff, 1987). Un aspect important d'une théorie, qui lui assure sa cohérence interne, est d'être produite par un débat scientifique collectif et public.

En ce qui concerne les élèves, le terme « théorie-modèle » ne se réduit évidemment pas à des connaissances ni à des relations entre elles, compatibles avec les théories de la physique. Le cadre théorique des deux mondes (c'est la conséquence du troisième choix ci-dessus) considère en effet que les élèves fonctionnent, en classe de physique, en utilisant des éléments de nature théorique, c'est-à-dire possédant une certaine généralité et un pouvoir explicatif ; ces éléments sont souvent issus de la vie quotidienne du sujet. Les conceptions classiquement répertoriées par la didactique de la physique font partie de ces éléments « théoriques ». Autre différence importante avec les théories physiques : le caractère le plus souvent individuel de la théorie employée par l'élève, qui n'assure pas que les outils explicatifs que celui-ci utilisera dans deux situations différentes seront cohérents entre eux ; un travail récent (Redfors & Ryder, 2001) montre

au contraire comment les modèles utilisés par l'élève peuvent varier d'une situation à l'autre.

1.2.2. Le monde des objets et des événements

L'autre pôle de l'analyse est l'ensemble des connaissances ou énoncés qui réfèrent aux objets du monde réel et aux événements qui s'y déroulent. Bien entendu ces connaissances, ces énoncés, sont produits par une théorie (le sens commun dans le cas d'un individu, en général) sous-jacente et souvent implicite : la simple dénomination d'un objet lui assigne une place dans une théorie, si peu élaborée soit-elle ; Chalmers (1982) explicite la théorie cachée derrière un énoncé du type « *le vent pousse le landau vers la falaise* ».

L'histoire de la physique fourmille de tels exemples : Aristote ne voit pas le monde comme Galilée, lequel ne voit pas le monde comme Newton, parce qu'ils n'ont pas les mêmes systèmes explicatifs du mouvement et de ce qui le cause (Kuhn, 1970).

Du côté de l'individu apprenant un phénomène analogue se produit. Dans un dispositif expérimental, l'élève ne voit pas les mêmes éléments que l'enseignant, et ne fait pas les mêmes relations événementielles entre eux, parce qu'il ne les interprète pas avec la même théorie. Pour reprendre et extrapoler un autre exemple de Chalmers (1982), alors que l'enseignant décrit une expérience donnée par l'énoncé « *le faisceau d'électrons est repoussé par le pôle magnétique de l'aimant* », l'élève pourra décrire la même expérience par l'énoncé « *quand j'approche l'aimant, la courbe bleue est déformée et une partie disparaît* ».

Le corollaire de ces considérations définissant le « monde des objets et des événements » est qu'il n'importe pas pour l'étude des phénomènes d'apprentissage que la réalité matérielle à laquelle on fait référence soit une réalité naturelle (l'arc-en-ciel) ou technologique (un appareil photographique) ou une expérience de classe (le banc d'optique). L'expert en physique verra des différences fondamentales entre ces situations, et pourra énoncer que l'expérience de cours est une théorie réifiée, et non la réalité naturelle. Mais pour l'élève en situation de classe, travailler sur un phénomène naturel, un dispositif technologique, un montage didactique, sont des situations analogues : il s'agit toujours d'une réalité perceptible, qu'il interprète en fonction de son système explicatif préexistant, et sur laquelle on lui assigne un certain nombre de tâches qui visent à lui faire produire une réponse conforme à ce que l'enseignant attend.

Par ailleurs cela signifie nécessairement que le classement d'un énoncé dans tel ou tel monde est relatif au processus d'enseignement-

apprentissage en cours, car le même mot peut jouer un rôle théorique ou un rôle de référence empirique. Par exemple, un élève en train de construire le concept de réfraction, comme classe d'événements se déroulant dans des circonstances analogues, pourra utiliser le terme « réfraction » comme référence théorique ; alors qu'on classera peut-être un énoncé d'un autre élève (qui a déjà construit le concept de réfraction) comportant ce terme, comme une référence à un événement particulier se déroulant en un endroit particulier de son dispositif expérimental. Par conséquent, pour classer de façon certaine un énoncé dans telle ou telle catégorie, une connaissance du contexte dans lequel il a été émis est nécessaire ; il faut donc prendre en considération une certaine durée des interactions.

1.2.3. Construire le sens des concepts de la physique

Nous considérons que c'est la mise en relation des deux mondes (voir figure 1) qui, pour les élèves, pose le problème essentiel de l'apprentissage de la physique : de nombreuses études ont montré que les élèves pouvaient manipuler des formules traduisant des relations entre grandeurs physiques du modèle sans leur donner aucun correspondant pratique, ou au contraire qu'ils pouvaient mener à bien des manipulations sans jamais traduire ce qu'ils faisaient en termes de théorie physique ; c'est une critique classique adressée aux activités traditionnelles de travaux pratiques (Lunetta, 1998 ; Séré & Beney, 1997). D'autres études (Bécu-Robinault, 1997a, 1997b ; Pateyron, 1997) ont montré que dans ces activités traditionnelles les élèves avaient tendance à rester dans le même monde et à éviter les mises en relation.

2. PROBLÉMATIQUE ADOPTÉE DANS L'ÉTUDE

Si l'on considère que la mise en relation des deux mondes est à la fois primordiale et difficile, il est naturel de faire porter sur elle l'effort principal de l'enseignement. Plusieurs possibilités s'offrent, qui ne sont évidemment pas exclusives. La priorité donnée aux processus de modélisation doit transparaître dans le discours de l'enseignant et dans les tâches demandées aux élèves. Elle peut aussi se traduire dans les ressources mises à disposition des élèves pour accomplir ces tâches. C'est le chemin qui a été suivi dans notre travail.

Pour faciliter aux élèves le passage entre les deux mondes, nous avons choisi de leur fournir un intermédiaire, que nous appelons « *modèle matérialisé* », qui soit à la fois :

– une figuration du *modèle* de la physique, conforme aux lois qu'on souhaite voir acquérir ;

– une figuration *matérialisée* au sens où c'est une réalité perceptible et où les élèves peuvent agir sur elle.

La double nature du modèle matérialisé peut se représenter par la figure 1 ci-dessous.

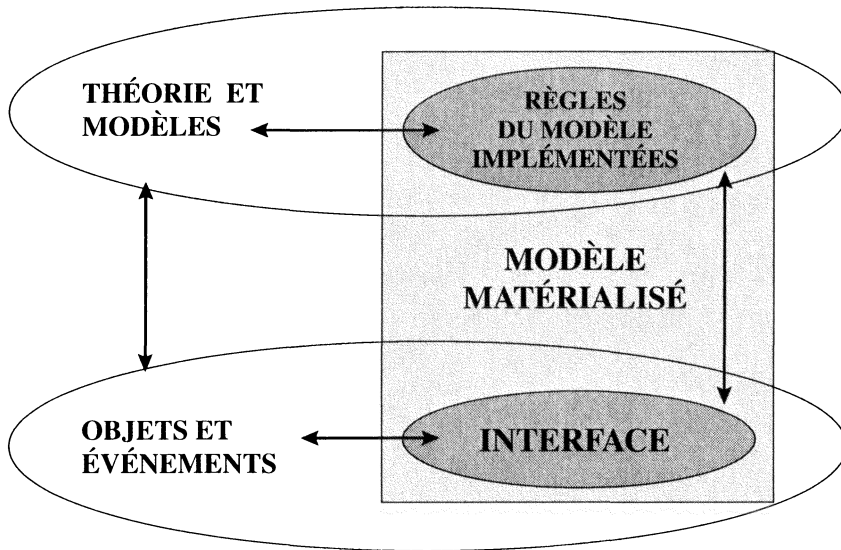


Figure 1 • L'intervention d'un modèle matérialisé

De façon générale, un modèle matérialisé doit comporter une interface qui fournit des informations à l'apprenant et est son moyen d'action sur la figuration du modèle ; il doit également fonctionner dans une certaine mesure conformément aux règles du modèle physique qu'on souhaite voir mettre en œuvre.

Fournir cette ressource à l'apprenant a pour but de lui apporter une aide sur trois plans (Mouloud, 1985) :

- sur le plan de la compréhension, grâce à la clarté de figuration qu'il peut trouver dans des schémas ou dans une maquette ;
- sur le plan de la recherche de solutions aux problèmes qu'on lui a posés, grâce à la puissance d'analogie du modèle ;
- sur le plan de la preuve qu'il apporte de ses assertions, « *qui trouve dans l'objectivité des modèles une part de ses garanties* » (Mouloud, 1985, p. 413).

Notons un effet secondaire (au sens chronologique) mais important de cet usage d'un modèle matérialisé : on peut faire l'hypothèse que les

élèves ont plus de chance de devenir conscients du statut de modèle de cette figuration parce qu'elle est incarnée dans une réalité tangible, parce qu'elle cesse de n'exister que dans leur esprit.

2.1. Des cas de modèles matérialisés dans d'autres domaines

Nous étudions ici trois travaux empiriques où le terme « modèle matérialisé » est explicitement utilisé par les auteurs pour désigner tout ou partie de leur dispositif.

Quintana-Robles (1997) analyse l'influence sur l'apprentissage réalisé par les élèves d'une simulation filmée du modèle particulaire et de la détente des gaz. Elle définit le modèle matérialisé comme

« *un groupement de correspondances analogiques entre un objet théorique et un objet fabriqué... Le modèle matérialisé est plus facilement manipulable que l'objet étudié, dans notre cas le modèle particulaire. En effet, grâce à son fonctionnement et au jeu des opérations qu'il permet, il conduit à l'obtention de résultats applicables à l'objet [théorique] étudié* » (Quintana-Robles, 1997, p. 27).

Dans ce cas, le dispositif de simulation consiste en une table à coussin d'air sur laquelle flotte une population d'aimants cylindriques représentant les particules d'un gaz. Le film présente en parallèle des expériences réalisées sur une masse de gaz (détentes, etc.) et les expériences correspondantes réalisées sur la population d'aimants. Les consignes demandent aux élèves d'interpréter ce qu'ils voient dans le film.

Robardet *et al.* (1999) ont proposé un modèle matérialisé pour l'étude, en classe de seconde de la propagation des sons. Envisageant la propagation unidirectionnelle d'une onde sonore à travers un gaz, ils ont découpé le volume de gaz en tranches d'épaisseur limitée, perpendiculaires à la direction de propagation, et associé à chaque tranche une boule indéformable de masse m ; cette boule, représentant l'inertie de la tranche d'air, est reliée à la précédente et à la suivante par des ressorts de raideur k , qui traduisent la rigidité du milieu vis à vis des perturbations de pression. Ils ont ainsi constitué ce qu'ils appellent un *modèle théorique* du milieu de propagation du son, qui est mécaniste, constitué d'une suite de boules et de ressorts.

À ce « modèle théorique » les auteurs ont associé un *modèle matérialisé*, « à visée didactique », constitué de petits chariots en Lego Techniques reliés par des ressorts identiques mobiles sur une gouttière en plastique et fixés aux deux extrémités de la chaîne qu'ils forment. La propa-

gation s'observe grâce à l'excitation par impulsions ou périodique du premier chariot. Chaque chariot est donc associé à une tranche de gaz.

Méheut (1996, 1997) a construit et utilisé avec des élèves de cinquième une simulation informatique pour une séquence d'enseignement des propriétés des gaz. Cette simulation informatique est associée à un dispositif expérimental constitué de deux pistons verticaux reliés par une canalisation horizontale dans laquelle un index de mercure peut se déplacer. L'auteur décrit finement (1996, pp. 12-15) à la fois les correspondances entre le dispositif expérimental et l'aspect de l'écran de l'ordinateur, et les relations que les élèves sont censés construire entre ce qu'ils voient sur cet écran et les grandeurs de la théorie thermoélastique des gaz. À dire vrai, la simulation n'est pas appelée par l'auteur *modèle matérialisé* mais *concrétisation* du modèle cinétique des gaz (1996, p. 12, légende de la figure 1). L'élément essentiel de ce type de modélisation est qu'il présente à l'apprenant un modèle microscopique qui sert à interpréter des événements macroscopiques qui se déroulent sur le dispositif expérimental.

2.2. Un modèle matérialisé informatisé

Dans notre étude, nous avons choisi d'implémenter le modèle matérialisé sur ordinateur. L'interface est alors constituée d'une part de l'écran de l'ordinateur, sur lequel l'élève voit apparaître un certain nombre de tracés, se dérouler un certain nombre d'événements, et d'autre part des moyens d'actions de l'élève sur l'ordinateur : clavier, souris. S'agissant du modèle de l'optique géométrique, la volonté d'incorporer des règles du modèle physique oriente le choix du logiciel.

Le logiciel Cabri-géomètre (®Texas Instruments) convient à cet objectif, pour plusieurs raisons :

- on connaît des constructions géométriques traduisant les lois physiques de l'optique géométrique, par exemple la construction de Snell pour la loi de la réfraction ;

- or Cabri-géomètre fonctionne par tracés d'objets géométriques directement sur l'écran, et ces tracés peuvent être montrés ou cachés à volonté ; cela permet aux élèves d'avoir accès aux constructions géométriques qui traduisent les lois physiques ;

- Cabri-géomètre appartient à la catégorie des micromondes ; il est donc susceptible *a priori* d'offrir une grande liberté de création à ses utilisateurs, en particulier aux élèves ;

- il a déjà été étudié en didactique des mathématiques comme constituant potentiel d'un milieu didactique (par exemple Laborde & Capponi, 1994).

Si on compare ce type de modèle matérialisé avec les exemples cités précédemment on constate un certain nombre de différences marquantes :

- les élèves peuvent effectivement manipuler sur leur ordinateur la figure qui leur est fournie, à la différence de la simulation des gaz par des aimants cylindriques de Quintana-Robles (1997), où les élèves ne peuvent que voir sur la vidéo les transformations qu'un intervenant filmé fait subir au simulateur ; le simulateur de Méheut (1996, 1997) fonctionne de façon analogue à notre dispositif quoiqu'un peu différemment, puisque les utilisateurs peuvent modifier des paramètres numériques de la simulation ou ses modalités de fonctionnement (la paroi est-elle fixe ou libre, par exemple) par des codes du clavier et non à la souris ;

- à la différence de l'étude de Quintana-Robles (1997) et de celle de Robardet *et al.* (1999), les principes de construction et de fonctionnement du modèle matérialisé informatisé sous Cabri-géomètre sont la traduction exacte des lois physiques régissant le domaine phénoménologique considéré ; en effet, dans ces deux études, le modèle matérialisé obéit à des lois *différentes* des lois physiques qu'on veut enseigner, mais qui produisent un fonctionnement *analogue* : la population d'aimants cylindriques a un comportement analogue aux molécules d'un gaz, le petit train a un comportement analogue aux molécules de l'air où le son se propage. Là encore, le simulateur de Méheut se distingue : l'apparence de l'écran résulte d'un calcul effectué par l'ordinateur, conformément aux lois de la théorie cinétique des gaz, donc celles du domaine phénoménologique considéré ; mais ce calcul reste invisible à l'élève qui ne voit que son résultat.

2.3. Un exemple de situation d'enseignement

Nous donnons ici un exemple, tiré de la séquence d'enseignement de terminale S, montrant comment une modélisation d'une expérience bien classique d'optique géométrique peut être implémentée sous Cabri-géomètre, et comment elle donne lieu à des activités d'apprentissage dans le contexte de cette classe : un enseignement en cours-TP, des élèves travaillant par paires.

L'expérience en question est la méthode de Bessel pour mesurer la distance focale d'une lentille mince convergente. Cette expérience fait intervenir la lentille dont on veut mesurer la distance focale, un objet étendu comme source lumineuse, un écran de projection. On laisse fixes l'objet et l'écran, à une distance au moins égale à quatre fois la distance focale estimée. On déplace la lentille entre l'objet et l'écran, et on constate que, pour deux positions de la lentille, et deux seulement, une image de l'objet apparaît sur l'écran. À partir de ces deux positions, et de la distance objet-écran, une

formule permet de calculer la distance focale.

Pour chaque paire d'élèves, la situation mise en place dans notre étude à propos de cette méthode de Bessel comporte les éléments suivants :

- le banc d'optique habituel et le matériel nécessaire : source, lentille, écran ;
- un fichier réalisé sous Cabri-géomètre sur un ordinateur, modélisant l'expérience ;
- une feuille de consignes.

2.3.1. *Le fichier informatique modélisant l'expérience*

Ci-dessous on trouvera (figure 2) l'aspect de l'écran de l'ordinateur que les élèves découvrent quand ils chargent le fichier, et (figure 3) l'ensemble des tracés qu'ils peuvent observer quand ils font apparaître les constructions cachées.

Les élèves ont donc devant les yeux les symboles conventionnels de trois objets réels : l'objet, la lentille et l'écran. Objet et écran sont fixes, la lentille peut se déplacer par son centre. Ces trois symboles sont alignés sur l'axe optique de la lentille. Sont aussi représentés sur ce fichier deux objets théoriques, deux rayons issus de l'extrémité de l'objet : celui qui passe par le centre optique de la lentille, et un rayon quelconque, qui passe par un point quelconque de la lentille ; ce dernier rayon peut être modifié en déplaçant le point d'incidence sur la lentille, et balayer ainsi toutes les positions possibles pour les rayons issus du point source traversant la lentille.

La figure 3 montre comment est tracée la partie émergente du rayon quelconque : les élèves peuvent faire apparaître cette figure et reconnaître que cette construction fait appel aux propriétés du foyer secondaire objet de la lentille, propriétés qu'ils ont apprises dans des situations précédentes de la séquence.

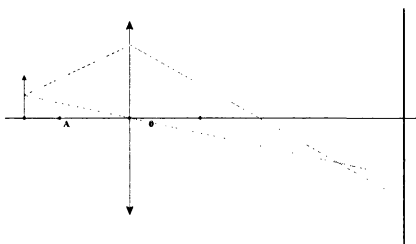


Figure 2 • Aspect de l'écran pour l'expérience de Bessel

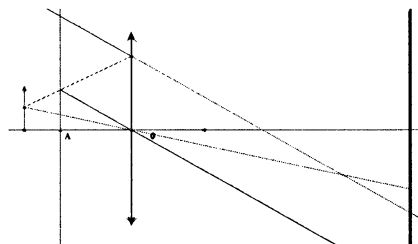


Figure 3 • La construction cachée du rayon quelconque

2.3.2. La feuille de consignes

On demandait aux élèves, dans l'ordre, de :

– montrer, en utilisant le modèle matérialisé, que, pour une distance objet-écran D suffisamment grande, il existe deux positions (OA_1 et OA_2) de la lentille donnant une image sur l'écran. La formule reliant D , OA_1 , OA_2 et la distance focale de la lentille est établie ;

– décrire comment procéder, avec le matériel de TP dont ils disposent, pour mesurer la distance focale d'une lentille en se fondant sur la formule en question ;

– faire avec ce matériel plusieurs mesures correspondant à plusieurs valeurs de la distance objet-écran et d'en déduire la distance focale de la lentille.

La première étape exige des élèves une interprétation des tracés sur l'écran en termes de formation de l'image ; il faut que les élèves identifient l'intersection des deux rayons émergents comme le point image du point source. La réussite de la première étape met en acte les connaissances fondamentales que la séquence d'enseignement voulait voir construire : un objet est une juxtaposition de sources ponctuelles ; tous les rayons émergents issus d'un point source passent par le point image. Par contre les deuxième et troisième étapes portent davantage sur la liaison que l'élève est capable de faire entre le modèle matérialisé sur l'écran et le matériel expérimental qui est mis à sa disposition.

2.4. Questions de l'étude

La double nature du modèle matérialisé conduit à un double questionnement :

– le modèle matérialisé tel qu'il a été mis en œuvre a-t-il facilité effectivement la mise en relation des deux mondes par les élèves, et quelle signification a pris cette mise en relation ? La suite de l'article sera consacrée à cette partie des résultats ;

– quel rôle ce modèle matérialisé et les situations qui ont été mises en place autour de lui ont-ils joué dans l'apprentissage réalisé du concept d'image en optique géométrique ? La réponse à cette question sera peu développée ici, on pourra se reporter à d'autres références (Buty, 2000, 2001).

3. MÉTHODOLOGIES EMPLOYÉES

Notre centre d'intérêt est l'activité de l'élève en situation d'apprentissage, ici en présence d'un modèle matérialisé informatisé. Nous avons filmé l'activité d'une paire d'élèves (Adeline et Emmanuel) pendant la totalité

de la séquence faisant intervenir ce modèle. Il s'agit d'une étude de cas, visant à dégager des processus ou des mécanismes. L'enregistrement vidéo nous a d'ailleurs permis de recueillir également la plupart des interventions de l'enseignant ainsi que ses discussions avec la paire d'élèves étudiée. La durée totale enregistrée est de 13 heures environ.

Nous avons traité ces données de deux façons :

- à partir d'une visualisation directe de la bande vidéo, nous avons catégorisé les productions verbales d'un des deux élèves de la paire (Emmanuel) en fonction des relations qu'elles établissent ou non entre les niveaux de modélisation ; cette catégorisation ouvre la possibilité d'un décompte, donc d'une comparaison semi-quantitative (Niedderer *et al.*, 2003 ; Buty, 2003) entre deux types d'activités, celui où les élèves utilisent le modèle informatisé, et celui où ils utilisent leur dispositif expérimental ;

- nous avons transcrit les productions verbales des élèves et de l'enseignant, et noté certains gestes et comportements : il faut insister sur le fait que seule la visualisation des gestes, notamment vers l'écran de l'ordinateur, permet une compréhension de certaines verbalisations des élèves. Nous avons organisé le corpus obtenu suivant les *situations* de la séquence d'enseignement ; puis nous avons subdivisé chacune de ces situations en *épisodes* puis en *étapes* (Buty, 1998) ; nous avons obtenu un corpus précis et organisé, susceptible de servir de base à une analyse *qualitative* fine de l'activité fonctionnelle et cognitive de l'élève étudié.

N° de la situation	Contenu d'enseignement	Nom abrégé
1	Introduction au cadre de l'optique géométrique	Introduction
2	Première condition de Gauss, foyer principal image	Foyer principal image
3	Existence et propriétés du centre optique	Centre optique
4	Seconde condition de Gauss, foyers secondaires image	Foyers secondaires image
5	Foyers objets principal et secondaires	Foyers objets
6	Image d'un point source comme intersection des rayons émergents	Point image
7	Image d'un objet comme ensemble des points images	Objet image
8	Formule de conjugaison et grandissement	Conjugaison
9	Focométrie par la méthode d'autocollimation	Autocollimation
10	Focométrie par la méthode de Bessel	Bessel
11	Focométrie par la méthode de Silbermann	Silbermann
12	Propriétés d'une lentille convergente fonctionnant en loupe : notion d'image virtuelle	Loupe
13	Propriétés d'une lentille divergente	Lentilles divergentes
14	Propriétés optiques et défauts de l'œil	Vision
15	Étude d'une lunette astronomique	Lunette astronomique

Tableau 1 • Découpage en 15 situations de la séquence d'enseignement étudiée (jusqu'à la situation 12 incluse, l'étude est restreinte aux lentilles convergentes)

Le tableau 1 ci-dessus énumère les diverses situations qui constituent la séquence d'enseignement. Dans la suite, nous ferons référence aux situations par leur numéro et leur appellation abrégée.

Comme on le constate, une situation est définie par son contenu d'enseignement. La focométrie par la méthode de Bessel par exemple, telle qu'elle a été exposée plus haut, constitue une situation.

4. RÉSULTATS

4.1. Résultats semi-quantitatifs sur les verbalisations de l'élève

Le premier constat qu'on peut faire à partir de l'analyse semi-quantitative des productions verbales des élèves est leur orientation très marquée à rester dans le monde des objets-événements quand ils manipulent le dispositif expérimental. Ceci ne constitue pas une surprise et va dans le sens des résultats des autres études brièvement rappelées plus haut.

Par comparaison à ces moments de manipulations purement expérimentales, l'usage du modèle matérialisé favorise la diversité des productions verbales des élèves, en particulier l'expression des concepts de la physique. Par contre, globalement, la relation entre le modèle physique (ici sa figuration sur l'écran de l'ordinateur) et le monde des objets et des événements n'est pas particulièrement renforcée, ce qui tendrait à faire penser que le modèle matérialisé a manqué son objectif de favoriser la liaison entre les deux mondes.

Cependant, une analyse plus fine, situation par situation, indique que les utilisations prédictives du modèle matérialisé (lorsqu'il est utilisé avant la réalisation de l'expérience, et pour en prédire le résultat) améliorent la fréquence des mises en relation entre les deux mondes, non seulement pendant l'utilisation de l'ordinateur, mais même au cours des activités de manipulations expérimentales qui la suivent.

Aussi est-il pertinent de se livrer à une analyse qualitative après l'analyse semi-quantitative, à partir du corpus de transcriptions, et de la signification des productions verbales que nous venons de caractériser, pour observer de près l'activité des élèves quand ils utilisent le modèle matérialisé. C'est ce que nous allons faire ci-dessous.

4.2. Le statut du modèle informatisé pour les élèves

La première question que nous envisageons est le statut que prend le modèle matérialisé pour les élèves. L'envisagent-ils comme une boîte noire produisant des figures de façon quelque peu magique ?

Dans notre cas, il est clair que la visibilité des traits de construction cachés aide les élèves à comprendre que le fonctionnement du modèle informatisé incorpore les lois de l'optique géométrique et par conséquent les conduit à accorder une grande confiance dans sa prédictibilité. L'explication donnée par l'enseignant dès le début de la séquence sur le principe de construction est comprise et mise en pratique. Ainsi dans la situation 9 (autocollimation), le rayon émergent n'est pas tracé lorsque l'objet est situé entre le foyer principal objet et la lentille ; sa disparition brusque surprend Emmanuel, qui, pour la comprendre, utilise spontanément la commande « montrer-cacher » (cette manœuvre, à elle seule, ne lui donne pas l'explication, mais elle en fait partie).

Cette confiance de base étant acquise, les écarts à la réalité que le modèle peut présenter ne sont pas compris par les élèves comme des échecs du modèle, mais comme une approximation normale qu'ils ont rencontrée de nombreuses fois en physique auparavant, dans l'application numérique de formules par exemple.

Cependant cette évaluation positive doit être nuancée.

Il arrive que les élèves attribuent au logiciel des potentialités qu'il ne possède pas. Par exemple, au début de la situation 6 (point image), l'enseignant montre à toute la classe comment construire, sur un fichier Cabri, l'image d'un point source à travers une lentille convergente. Pour cela il commence à tracer la parallèle à l'axe passant par le point représentant la source : elle se trace, en traversant évidemment le segment représentant la lentille ; un élève réagit aussitôt en s'exclamant « *M'sieur la lentille elle marche pas* ». Il veut dire par là que le rayon réfracté n'apparaît pas immédiatement, par l'opération du logiciel, comme c'était le cas dans les fichiers précédemment utilisés. On détecte ici, comme en d'autres occasions, une croyance selon laquelle le logiciel prend en charge la modélisation physique de systèmes optiques, alors qu'il ne peut qu'offrir des primitives géométriques au concepteur des fichiers, qui, lui, doit implémenter les lois physiques.

Autrement dit, la visibilité des constructions des fichiers que permet Cabri-géomètre est un élément essentiel pour que les élèves prennent conscience du statut de modèle de la simulation informatique. Cela ne suffit cependant pas toujours pour éviter les confusions avec la réalité, et l'enseignant doit prévoir à la fois des activités spécifiques visant à lever cette confusion et la possibilité qu'elle apparaisse au détour d'une intervention d'élève.

4.3. Le modèle matérialisé comme aide à l'exploration et à l'usage du monde théorique

Nous avons relevé, dans l'activité des élèves, trois catégories d'aides que peut apporter le modèle matérialisé pour l'exploration du modèle physique.

En premier lieu une facilité d'identification des objets pertinents du modèle ; cela vient de la nécessité où se trouve l'élève, s'il veut utiliser le modèle matérialisé, de produire une interprétation des éléments qu'il voit sur l'écran.

Un *exemple* par l'absurde est fourni par la manipulation infructueuse d'Emmanuel lors de la situation 7 (objet image). Il tente de déplacer le segment représentant l'image puis de modifier la taille de ce segment, alors que ces deux caractéristiques ne peuvent être modifiées qu'en agissant sur le segment représentant l'objet. La dépendance entre ces éléments traduit une loi physique, ce qu'Emmanuel semble ne pas avoir compris. On peut même dire qu'il n'a compris ni la loi physique, ni le concept d'image sous-jacent. La suite de l'analyse montre au contraire que son interprétation (qui conduit à un blocage de l'utilisation du modèle matérialisé) est conditionnée par sa propre « théorie » des phénomènes liés à l'image, très proche de la conception classique de l'image voyageuse, selon laquelle l'image peut se matérialiser n'importe où ; il est alors normal d'essayer de la déplacer ou de modifier sa taille. Mais le modèle matérialisé, construit conformément à la physique, résiste...

En second lieu, la mise à jour des relations fonctionnelles entre certains de ces éléments ; cela est autorisé par la variation continue des caractéristiques des objets présents sur l'écran, que permettent le logiciel et sa manipulation directe par la souris.

Par exemple au début de la situation 2 (foyer principal image) on demande aux élèves de manipuler un fichier représentant une lentille hémicylindrique traversée par un rayon incident perpendiculaire à sa face d'entrée plane (figure 4). Adeline, en répétant l'identification des angles dans plusieurs positions successives du rayon incident, établit une relation entre l'écart d'un rayon parallèle à l'axe, la position de la normale au point de sortie de la lentille, et la valeur de l'angle d'incidence, par la possibilité que lui offre l'ordinateur d'une variation continue de ces éléments. Elle énonce donc une loi de variation de l'angle en fonction de la position du rayon incident. Elle établit de même, dans l'étude du centre optique de la lentille (situation 3), une relation fonctionnelle du même type entre « angle d'incidence » et « écart entre incident et émergent » : plus l'angle d'incidence est grand, plus la

déviations entre incident et émergent est grande (« *et tu vois ça fait euh (...)* c'est dévié quand même un peu ça dépend / plus l'angle d'incidence est grand en fait et ça fait un(...) une déviation (rires) / ça fait un angle plus grand quoi enfin t'as compris », en disant cela elle montre avec son doigt le rayon intérieur à la lentille pendant que la figure se modifie).

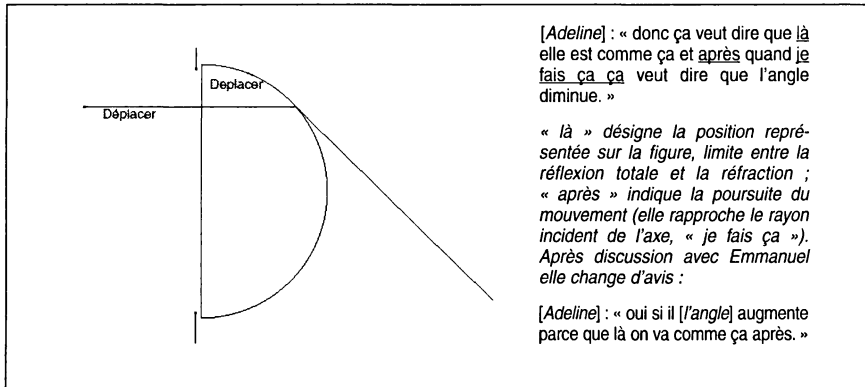


Figure 4 • Utilisation du modèle matérialisé et découverte de relations fonctionnelles

En troisième lieu la mise en place de procédures de contrôle spécifiques pour vérifier la validité de constructions ou de conjectures, ce que Rolet (1996) avait déjà montré en didactique des mathématiques.

Par exemple, une procédure de contrôle très souvent utilisée porte sur le parallélisme d'un rayon émergent à l'axe optique, représenté conventionnellement comme horizontal. En effet, la nature pixelisée de l'écran qu'observent les élèves produit, au cas où le tracé en question n'est pas horizontal, un décrochement qu'ils savent très bien repérer. Autre procédure effectivement observée, lors de la situation 6, portant sur la construction de l'image d'un point à travers une lentille convergente : on demande aux élèves de tracer les rayons émergents correspondant aux rayons spéciaux (passant par les foyers et le centre optique) et à un rayon quelconque, dont le point d'incidence sur la lentille est mobile ; Emmanuel vérifie la validité de ses constructions en déplaçant le rayon quelconque pour le faire coïncider avec les rayons spéciaux ; il s'aperçoit ainsi d'une erreur, dont il détecte l'origine, dans l'un des tracés. Il s'agit dans ces deux cas de contrôles (car l'élève exerce volontairement une action dont il perçoit et évalue le résultat) instrumentés par le logiciel Cabri-géomètre (car ce sont les propriétés du logiciel et de l'interface graphique qui permettent d'énoncer le jugement final).

Au total, la possibilité de manipuler le modèle matérialisé direc-

tement et commodément grâce à la souris facilite l'exploration du monde théorique par les élèves, de façon relativement autonome, pour identifier des éléments, chercher des explications ou des relations, autocontrôler leur activité.

4.4. Des moments privilégiés pour l'établissement de liens entre les deux mondes

L'objectif principal de l'introduction d'un modèle matérialisé est, dans notre perspective, de favoriser la construction de sens par la mise en relation des deux mondes. Il est donc essentiel de s'intéresser, dans l'activité des élèves, aux moments où, effectivement, ils se servent du modèle informatisé pour faire le rapprochement entre le modèle théorique de la physique et leur activité expérimentale.

On peut d'abord dire que la séquence a été bâtie pour que les élèves effectuent ces allers-retours entre théorie et expérience. Nous n'insisterons donc pas sur ces allers-retours quand ils consistent à suivre les consignes prévues dans le texte de la séquence. L'idée générale est qu'ils permettent des manipulations plus rapides et plus assurées. L'exemple le plus net est à cet égard la situation 10 (méthode de Bessel). Cette expérience est en général difficile à réaliser en classe, car les élèves se livrent à beaucoup de tâtonnements que ni eux ni l'enseignant ne savent interpréter. L'utilisation préalable du modèle matérialisé leur fournit le *modus operandi* le plus efficace (déplacer la lentille calmement de l'objet à l'écran), parce qu'elle leur fournit une première description de ce qu'il doit se passer : la formation de deux images, la première grande, la seconde petite. Le modèle matérialisé sert ainsi d'aide à une réalisation raisonnée des expériences.

Il n'est donc pas surprenant d'observer, après une phase de prise en main, un recours au modèle matérialisé spontané, indépendant des consignes, pendant la réalisation d'expériences. Ainsi durant la situation 9 (autocollimation), voit-on Adeline et Emmanuel se tourner vers l'écran de l'ordinateur pour chercher confirmation de l'endroit où il est raisonnable de chercher l'image (en dessous de l'axe optique qu'ils ont localisé sur leur montage).

Autre exemple : dans les situations qui terminent la séquence d'enseignement, l'enseignant a laissé aux élèves un temps pour explorer les fichiers qu'ils avaient à leur disposition, sans leur donner de consignes précises. Ce fut l'occasion pour les élèves d'effectuer un réel travail de modélisation, d'identification des éléments du modèle et de compréhension du fonctionnement de ce modèle.

Par exemple, dans la situation 12 (consacrée à la loupe), l'enseignant se borne à demander à l'ouverture du fichier « *qu'est-ce que vous pouvez faire avec ce fichier ?* » (figure 5). L'activité des élèves s'oriente vers les modifications possibles des objets du fichier, dans leurs taille et position. Il y a rapidement concentration sur la position de l'objet, ce qui donne lieu à une interprétation en termes de formation d'images par Adeline (on aura constaté sur la figure 5 que l'image ne figure pas sur le fichier) ; cela conduira, dans la suite, à une discussion entre les deux élèves sur la visibilité de l'image à travers la lentille (voir paragraphe suivant).

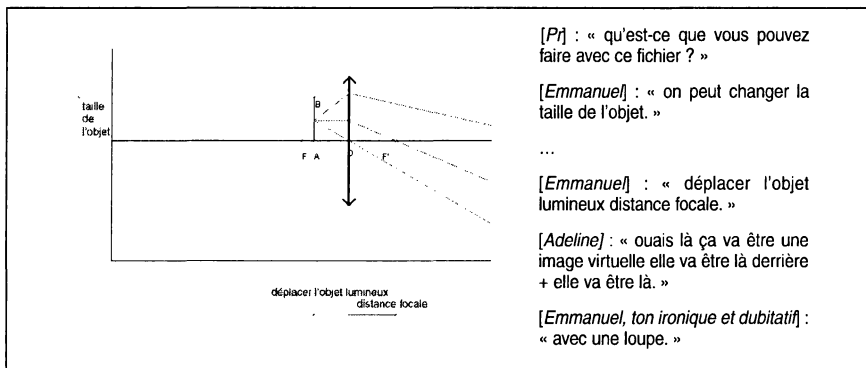


Figure 5 • Fichier loupe et verbalisation des élèves

4.5. L'utilisation prédictive du modèle dans une situation expérimentale

La situation 12 sur la loupe, abordée plus haut, est l'occasion d'une activité prédictive des élèves. Cette prédiction s'amorce spontanément dès la manipulation autonome du modèle matérialisé. Au début, la prédiction reste au niveau du modèle : les élèves font référence à l'image, désignent des parties de l'écran, parlent des événements qu'ils provoquent sur l'écran en manipulant la souris. Quand l'enseignant, quelques instants après, leur distribue une feuille sur laquelle ils doivent faire les constructions géométriques classiques des rayons, ils restent dans le modèle pendant un bon moment, vérifiant la conformité de leurs tracés aux règles connues sans chercher à leur donner sens (Emmanuel : « *normalement on présente les/ces traits en pointillés* »). Tout à coup cependant la discussion entre les deux élèves change de niveau, et porte sur ce qu'on verrait dans le monde réel si on regardait à travers la loupe :

Adeline : *faut se mettre où par rapport à la lentille pour la voir [l'image]*
Emmanuel : *on peut pas la voir*
Adeline : *là (!) si (!)*
Emmanuel : *elle est virtuelle*
Adeline : *c'est une loupe (insiste sur le mot)*
Emmanuel : *elle est vir-tu-elle (insiste sur le mot)*
Adeline : *et ben quand on voit une image virtuelle on peut la voir à travers euh quelque chose / on peut pas la voir reculer sur un écran certes et quand tu regardes dans une loupe tu vois bien c'que ... ce que tu regardes.*

À partir de ce moment, la discussion se poursuit en utilisant le modèle matérialisé pour appuyer les raisonnements de chacun ; ce recours au modèle matérialisé a deux fonctions : aider chacun des protagonistes à visualiser ce qu'il pense, mais aussi avoir une base matérielle commune pour dialoguer.

Cette phase de discussion sur le modèle matérialisé aboutira à un constat de désaccord clair, et à l'expression de deux prédictions opposées : Adeline soutient qu'on va voir l'image agrandie en regardant à travers la lentille ; Emmanuel soutient au contraire qu'on ne va rien voir, ou alors à la fois l'objet et son image, ce qui lui paraît absurde. Adeline sera particulièrement satisfaite, lors de la réalisation de l'expérience, de constater et de faire constater à Emmanuel qu'elle avait raison.

4.6. Le modèle matérialisé comme milieu didactique

La capacité du modèle matérialisé de répondre aux actions de son utilisateur, non comme celui-ci le voudrait mais conformément aux lois de l'optique géométrique, se manifeste à de nombreuses reprises. Dans plusieurs cas, Emmanuel ou Adeline manifestent qu'ils en sont conscients.

Dans la situation 5 (foyers secondaires objet), le rayon émergent auquel Emmanuel s'intéresse n'est pas parallèle à l'axe secondaire (voir figure 6) ; le point source est trop éloigné de l'axe optique, on se trouve hors des conditions de Gauss. Emmanuel considère que l'intersection de la droite qu'il veut tracer comme axe secondaire et du rayon émergent a un sens physique de foyer image, et il veut tracer le plan focal image qu'il estime être le correspondant du plan focal objet. Il utilise toutes les possibilités que lui offre le logiciel, y compris le déplacement de la partie de page visible à l'écran que l'enseignant lui a montré quelques minutes auparavant (la rapidité d'assimilation des commandes du logiciel dont les élèves font preuve est souvent surprenante). Mais son utilisation du logiciel le détrompe : il doit reconnaître

que quand on déplace A sur le segment qui représente le plan focal objet, « *t'obtiens pas un plan de l'autre côté* ». Il s'obstine, en traçant la perpendiculaire à l'axe optique passant par cette intersection d'un émergent quelconque et de l'axe secondaire. Une fois qu'il a achevé la construction, il énonce que le plan focal image doit être symétrique au plan focal objet. Il propose le déplacement du point A comme technique pour vérifier la validité de sa construction et de son raisonnement, et doit reconnaître qu'elle conduit à un échec. On voit ici qu'Emmanuel mène un ensemble de stratégies que la résistance du milieu, localement adidactique, rend toutes perdantes.

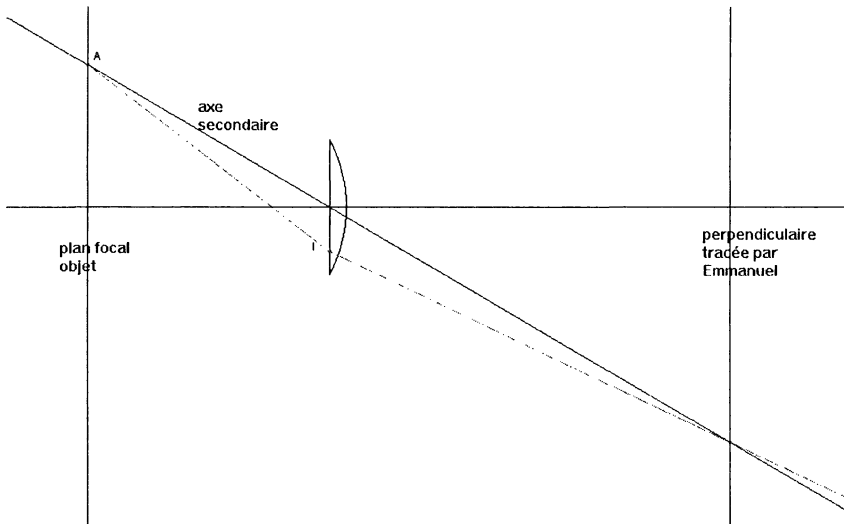


Figure 6 • **Invalidation par le milieu des conjectures de l'apprenant**

Pour autant, ces échecs ne conduisent pas forcément à une remise en cause des conceptions erronées qui les ont produits. L'utilisation du modèle matérialisé est fondée sur une interprétation par l'élève des événements qui sont perceptibles sur l'écran ; cette interprétation fait intervenir un nombre assez élevé d'hypothèses ; un échec remet en cause certaines de ces hypothèses, mais l'élève ne sait pas lesquelles ; il peut supposer que son incompréhension porte sur le fonctionnement du logiciel plutôt que sur des lois physiques. Dans les occasions où la résistance du milieu fait évoluer les positions de l'élève, un tiers est toujours impliqué (l'autre membre de la paire, ou l'enseignant), dont l'argumentation s'appuie sur le comportement du logiciel.

5. CONCLUSIONS

Ces résultats permettent de fonder une discussion pour savoir si la démarche utilisée a atteint ses objectifs, c'est-à-dire mettre à la disposition des élèves un modèle matérialisé pour leur faciliter la mise en relation des deux mondes, et ainsi la construction de sens aux concepts de la physique.

De façon générale la réponse est affirmative, mais il faut la nuancer.

L'aspect le plus positif est certainement que le modèle matérialisé a permis aux élèves une exploration et une réflexion assez avancées sur le modèle de l'optique géométrique. Un tel outil permet, non seulement de leur demander une activité prédictive assez systématique, mais surtout de fonder leurs prédictions sur des raisonnements impliquant le modèle qu'on souhaite enseigner. Le modèle matérialisé guide l'activité de prédiction.

De façon générale d'ailleurs, il ne faut pas sous-estimer le fait que mettre à disposition des élèves une ressource telle que le modèle matérialisé oriente leur activité cognitive suivant la structure de la ressource : les fichiers traduisent tous plus ou moins l'organisation du monde matériel vue par les savoirs de l'optique géométrique enseignée ; y sont représentés un objet, une lentille, une image qui a le statut de conséquence. Assigner une tâche aux élèves à partir de ces fichiers, c'est, quasi certainement, les voir prendre comme cadre de travail cette représentation du monde, c'est donc guider très fortement leur activité.

Il n'est pas moins important que les élèves soient conscients du caractère de modèle des fichiers informatiques qu'on leur fait utiliser ; leur apprendre au cours de cet enseignement d'optique qu'il faut distinguer la réalité et sa modélisation, c'est peut-être une base pour qu'ils adoptent des attitudes correctes dans d'autres domaines de la physique. On a vu cependant que se manifestait, en certaines occasions, une croyance selon laquelle le logiciel pouvait prendre en charge la modélisation physique de systèmes optiques. On retrouve ici, sous une forme adaptée, un des risques mentionnés par Harrison Treagust (2000), indiqués plus haut.

Une des caractéristiques majeures du modèle matérialisé que nous avons utilisé est la visibilité des constructions qui fondent le fonctionnement des fichiers réalisés sous Cabri-géomètre. Cette visibilité renforce nettement la crédibilité du modèle matérialisé, favorise les raisonnements des élèves et leur prise en charge des problèmes qu'on leur pose. Plus fondamentalement d'ailleurs, le simple fait que les élèves puissent modifier les figures présentes à l'écran par manipulation directe à la souris permet au logiciel de jouer pleinement le rôle de milieu didactique.

On peut pointer trois limites de nos résultats.

En premier lieu, une des conclusions du travail de Quintana-Robles (1997) est qu'effectivement le recours à un modèle matérialisé semble faciliter la mise en relation par les élèves du modèle théorique (particulière dans son cas) et du champ expérimental. Dans notre cas, la fréquence des relations entre les deux mondes n'est pas très élevée. Il s'agit sans doute là d'un facteur sur lequel une organisation différente de la séquence d'enseignement pourrait jouer, car nous avons vu que les instructions *ad hoc* de l'enseignant ou les situations de prédiction conduisent à une mise en relation plus fréquente.

En second lieu, le rôle de milieu que joue le logiciel consiste à réfuter les hypothèses de l'apprenant. Plus exactement, la réponse du logiciel est interprétée comme une réfutation par l'apprenant, qui attendait un certain événement, lequel ne se produit pas. L'apprenant en déduit qu'il a commis une erreur, mais il ne sait pas laquelle. Dans l'ensemble de connaissances que l'élève a mobilisées pour faire sa prédiction, le milieu ne l'aide pas à choisir quelle est la connaissance erronée. Le milieu (tel qu'il est organisé dans cette séquence d'enseignement autour des fichiers Cabri-géomètre) rend un oracle, sanctionne, mais ne guide pas. On peut caractériser ce milieu comme passif.

La question est ouverte de la constitution de milieux didactiques actifs, qui, non seulement invalideraient les hypothèses fausses de l'apprenant, mais, au terme d'une analyse de ses actions, seraient capables de proposer des pistes de rectification. De telles pistes de recherche ont été engagées en mathématiques, en utilisant Cabri-géomètre (Luengo, 1997) ; la transposition en physique pose sans doute des problèmes particuliers.

La dernière remarque qu'on peut faire à ce travail est qu'il prend peu en compte les actions de l'enseignant, qui introduisent évidemment des paramètres nouveaux. Préciser comment l'utilisation du modèle matérialisé peut s'articuler au mieux avec les interactions entre les apprenants et l'enseignant est notre objectif actuel de recherche.

NOTE

1. En France tout élève de terminale doit choisir un enseignement de spécialité. À raison de deux heures par semaine, cet enseignement fournit des compléments dans une discipline (mathématiques, sciences physiques, sciences de la vie et de la Terre). Il est évalué au baccalauréat.

BIBLIOGRAPHIE

- BALACHEFF N. (1987). Processus de preuves et situations de validation. *Educational Studies in Mathematics*, vol. 18, pp. 147-176.
- BÉCU-ROBINAULT K. (1997a). *Rôle de l'expérience en classe de physique dans l'acquisition des connaissances sur les phénomènes énergétiques*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- BÉCU-ROBINAULT K. (1997b). Activités de modélisation des élèves en situation de travaux pratiques traditionnels : introduction expérimentale du concept de puissance. *Didaskalia* n° 11, pp. 7-37.
- BUTY C. (1998). Pour une étude de l'apprentissage dans une séquence d'enseignement utilisant une modélisation informatique, en classe de terminale. In F. Langlois & V. Maffeo, *Actes du sixième séminaire national de didactique des sciences physiques et de la technologie, Lyon octobre 97*, pp. 152-158.
- BUTY C. (2000). *Étude d'un apprentissage dans une séquence d'enseignement en optique géométrique à l'aide d'une modélisation informatique*. Thèse, université Lumière-Lyon II.
- BUTY C. (2001). A case of learning process in a computer-based modelling environment. In D. Psillos, P. Kariotoglou, V. Tselves, G. Bisdikian, G. Fassoulopoulos, E. Hatzikranielis & M. Kallery (Éds), *Proceedings of the third international conference of ESERA, Thessaloniki*, pp. 328-330.
- BUTY C. (2003). Modelling In Geometrical Optics Using A Microcomputer. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching And Learning In The Science Laboratory*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 231-242.
- CHALMERS A.F. (1997). *Qu'est-ce que la science ?* Paris, Le Livre de Poche.
- GILBERT J.K. & BOULTER C.J. (1998). Learning Science through models and modelling. In B.J. Fraser & K.G. Tobin (Éds), *International Handbook of Science Education*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 53-66.
- GOBERT J.D. & BUCKLEY B.C. (2000). Introduction to model-based teaching and learning in science education. *International Journal of Science Education*, vol. 22, n° 9, pp. 891-894.
- GUILLAUD J.-C. (1998). *Enseignement et apprentissage du concept de force en classe de troisième*. Thèse, université Joseph Fourier-Grenoble I.
- HARRISON A.G. & TREAGUST D.F. (2000). A typology of science school models. *International Journal of Science Education*, vol. 22, n° 9, pp. 1011-1026.
- KUHN T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris, Flammarion.
- LABORDE C. & CAPPONI B. (1994). Cabri-géomètre constituant d'un milieu pour l'apprentissage de la notion de figure géométrique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 14, n° 12, pp. 165-210.
- LUENGO V. (1997). Un micromonde de preuve intégrant la réfutation. In M. Baron, P. Mendelsohn & J.-F. Nicaud (Éds), *Actes des cinquièmes journées EIAO de Cachan*. Paris, Hermès, pp. 85-97.
- LUNETTA V. N. (1998). The school science laboratory : historical perspectives and contexts for contemporary teaching. In K. Tobin & B. Fraser (Éds), *International Handbook of Science Education*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 249-262.
- MÉHEUT M. (1996). Enseignement d'un modèle particulière cinétique de gaz au collège. *Didaskalia*, n° 8, pp. 7-32.
- MÉHEUT M. (1997). Designing a learning sequence about a pre-quantitative kinetic model of gases : the parts played by questions and by a computer-simulation. *International Journal of Science Education*, vol. 19, n° 6, pp. 647-660.

- MOULOUD N. (1985). Perspectives épistémologiques. In *Encyclopedia Universalis*, article « *Modèle* », vol. 12, pp. 412-415.
- NIEDERRER H., BUTY C., HALLER K., HUCKE L., SANDER F., AUFSCHEITER S. V., FISCHER H. & TIBERGHEN A. (2003). Talking Physics in Labwork Contexts – A Category Based Analysis of Videotapes. In D. Psillos & H. Niedderer (Éds), *Teaching And Learning In The Science Laboratory*. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Publishers, pp. 31-41.
- PATEYRON B. (1997). *Mobilisation des savoirs dans la formation professionnelle*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- QUINTANA-ROBLES M. (1997). *Étude didactique de films comme aide pour l'enseignement de la physique. Cas de l'expansion des gaz*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- REDFORS A. & RYDER J. (2001). University physics students' use of models in explanations of phenomena involving interaction between metals and electromagnetic radiation. *International Journal of Science Education*, vol. 23, n° 12, pp. 1283-1301.
- ROBARDET G., ORAND N. & PLUVINAGE C. (1999). Un modèle de la propagation des sons. *Bulletin de l'union des physiciens*, n° 815, pp. 951-964.
- ROLET C. (1996). *Dessin et figure en géométrie : analyse des conceptions de futurs enseignants dans le contexte Cabri-géomètre*. Thèse, université Claude Bernard-Lyon I.
- SÉJOURNÉ A. (2001). *Conception d'un hypermédia et analyses de l'influence de l'organisation des contenus sur l'activité des élèves : le cas de « Labdoc Son et Vibrations »*. Thèse, université Lumière Lyon 2.
- SÉRÉ M.-G. & BENEY M. (1997). Le fonctionnement intellectuel d'étudiants réalisant des expériences : observation de séances de travaux pratiques en premier cycle universitaire. *Didaskalia*, n° 11, pp. 73-102.
- SINACEUR H. (1999). Modèle. In D. Lecourt (Dir.), *Dictionnaire d'histoire et philosophie des sciences*. Paris, PUF, pp. 649-651.
- TIBERGHEN A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp. 71-87.
- VERGNAUD G. (1990). La théorie des champs conceptuels. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 10, n° 3, pp. 133-170
- VINCE J. (2000). *Approches phénoménologique et linguistique des connaissances des élèves de seconde sur le son. Contribution à l'élaboration et à l'analyse d'un enseignement et au développement d'un logiciel de simulation*. Thèse, université Lumière Lyon 2.

Cet article a été reçu le 30 avril 2002 et accepté le 14 janvier 2003.