

Situations-problèmes et modélisation ; l'enseignement en lycée d'un modèle newtonien de la mécanique

Guy ROBARDET

Laboratoire Interdisciplinaire
de Didactique des Sciences Expérimentales
Université Joseph Fourier
BP 53 X
38041 Grenoble, France.

Résumé

Nous présentons ici une expérience d'enseignement de mécanique au lycée. Avec la mise en œuvre de ce travail, notre principal objectif fut de nous attaquer à la conception d'impetus. Dans cette séquence nous avons proposé à la classe d'élaborer un modèle newtonien. Cette construction a été réalisée de manière progressive en emboîtant successivement des modèles dont le champ expérimental est de plus en plus étendu.

Mots clés : *conception, mécanique, modèle, modélisation, situation-problème.*

Abstract

We present an experiment about teaching mechanics in Senior High School, in which our main goal was to attack impetus misconceptions. In this teaching experiment we have suggested to the students to elaborate a newtonian model. This construction has been done progressively using successive models, each having a wider experimental field, each model encasing the previous one.

Key words : *misconception, mechanics, model, modelisation, problem situation.*

Resumen

Presentamos aquí una experiencia de enseñanza de mecánica en el liceo. Con la realización de este trabajo, nuestro principal objetivo fue de atacar la concepción de ímpetus. En esta secuencia proponemos a la clase de elaborar un modelo newtoniano. Esta construcción fue realizada de manera progresiva ajustando sucesivamente los modelos donde el campo experimental es cada vez más amplio.

Palabras claves : *concepción, mecánica, modelo, modelización, situación-problema.*

1. PROBLÉMATIQUE

Si les résultats actuellement disponibles dans le domaine de la recherche en psychologie et en didactique nous apportent des informations précieuses sur le fonctionnement cognitif de l'enfant ou de l'adolescent lorsqu'il est confronté à l'acquisition d'un savoir scientifique, plus rares sont les travaux concernant les situations d'enseignement proprement dites. Nous présentons ici une séquence d'enseignement de la mécanique au lycée. En élaborant cette séquence, notre principal objectif fut de nous attaquer à la conception d'impetus qui a été minutieusement étudiée et décrite, notamment en France par Laurence Viennot et Édith Saltiel, aux États-Unis par Michael McCloskey (1983), Ibrahim Abou Halloun et David Hestenes (1983). Ces travaux, et bien d'autres encore, ont montré que ces conceptions et les modes de raisonnement qui leur sont bien souvent associés constituent, vis-à-vis de la construction des connaissances de mécanique, une source importante de difficultés en raison de leur forte résistance à l'enseignement traditionnel (Viennot, 1979 ; Saltiel, 1986).

La conception d'impetus modélise des raisonnements naïfs qui, en mécanique, reposent sur l'idée erronée d'une séparation absolue des concepts de mouvement et de repos et d'un principe faisant de la «force» la cause du mouvement. De plus, selon ces raisonnements, la «force» constituerait un capital interne à l'objet en mouvement qui lui aurait été communiqué lors du lancement et qui s'épuiserait ensuite progressivement. Voici par exemple comment un étudiant cité par McCloskey explique le mouvement d'un boulet de canon tiré verticalement : «*À mesure que le boulet s'élève, la force engendrée par le canon s'épuise et la gravité prend de l'importance : alors le boulet ralentit. À l'altitude maximale la force du canon et la gravité sont sensiblement égales ; c'est le point de renversement où la force du canon devient inférieure à la gravité, laquelle devient alors la force prédominante.*» (McCloskey, 1983)

Nous avons fait du dépassement de ces obstacles notre objectif prioritaire ; ainsi notre problématique fut la suivante. **Compte tenu de la présence fortement répandue de la conception d'impetus chez les élèves qui entrent au lycée, et sachant la très grande résistance de cette conception, comment agir sur elle ? Comment obtenir des élèves le changement conceptuel attendu, c'est-à-dire l'abandon du mode de raisonnement erroné au profit du modèle scientifique ?** De notre point de vue, la réponse à cette question, si tant est qu'il y en ait une, supposait la prise en compte de deux hypothèses didactiques.

1. La transformation attendue se produira d'autant mieux que nous aurons privilégié une entrée par la dynamique (la mécanique des mouvements) sur une entrée, plus traditionnelle, par la statique (la mécanique du repos). En effet, une entrée par la statique favorise à l'évidence la conception de sens commun puisque cette entrée consiste à établir que **si un corps est au repos, alors la somme des forces qui lui sont appliquées est toujours nulle**. Il y a donc un risque important que cette règle soit traduite par les élèves sous la forme erronée suivante : **si la somme des forces est nulle alors le corps est au repos**.

2. Le changement conceptuel attendu aura d'autant plus de chances de se produire que l'enseignement sera organisé suivant une méthode de résolution de problèmes, conformément à une démarche constructiviste d'apprentissage.

2. DÉROULEMENT DE LA SÉQUENCE

Cet enseignement de mécanique a débuté par une étude préliminaire, avec les élèves, du concept de masse (masse inerte). À cet effet, nous nous sommes appuyés sur l'observation de situations de collisions entre des wagonnets identiques ou différents. Une réflexion sur l'attraction terrestre a permis de différencier la masse M (grandeur qui mesure l'inertie d'un corps) et la force d'attraction universelle F^1 (poids) qu'un astre – Terre, Lune, Soleil – exerce sur ce corps. Après ce travail, les élèves semblaient prêts à aborder la première partie de notre séquence. Ceux-ci ayant été répartis en petits groupes, nous leur avons soumis la situation suivante sous forme d'une proposition d'expérience (non réalisée).

SITUATION-PROBLÈME N°1 : On abandonne simultanément une boule de pétanque et une balle de tennis depuis le sommet d'un mur d'environ 5 m de hauteur. Laquelle arrivera la première au sol ? Où se trouvera la seconde à l'instant où la première touchera le sol ?

1 La notation vectorielle n'a volontairement été introduite, pour F et V , que lorsqu'elle est devenue nécessaire (à la fin de la situation-problème n°2).

Nous avons construit cet énoncé dans l'intention de mettre les conceptions des élèves à l'épreuve des faits. En les faisant anticiper sur le résultat d'une expérience à réaliser, nous nous attendons *a priori* à ce que les élèves prévoient que l'objet le plus lourd arrivera nettement en premier. Les données numériques (les masses et la hauteur de chute) sont fournies afin de permettre à ceux qui le souhaitent de s'engager dans une procédure de calcul.

Que s'est-il passé en classe ?

Nous avons demandé, dans un premier temps, une recherche et des réponses individuelles par écrit. Nous avons pu constater que les élèves s'investissaient pratiquement tous dans la recherche d'un pronostic. Une grande majorité d'élèves prévoit que la boule (800 g) arrivera bien avant la balle (60 g). Mais tous ne sont pas d'accord sur la distance qui doit les séparer à l'arrivée. Des discussions en petits groupes les conduisent à comparer et à expliciter leurs points de vue. Une discussion en grand groupe révèle qu'il n'y a pas d'accord sur la distance qui sépare les deux objets à l'arrivée de la boule. Ce sont les élèves qui proposent alors de réaliser l'expérience. Ils préconisent eux-mêmes l'utilisation d'une prise de vue vidéo afin de garder en mémoire le résultat pour départager les points de vue. L'enseignant leur suggère de faire des propositions précises de protocole expérimental. Où faire l'expérience ? Comment opérer ? Comment enregistrer ? Comment obtenir un document sur lequel il sera possible d'effectuer des mesures de distance ? Après cette réflexion, l'expérience est alors mise en œuvre par les élèves dans la cour. Ils constatent très vite que les deux boules arrivent ensemble au sol, ce qui ne manque pas de les surprendre. Le recours à la bande vidéo confirme ce résultat. Il montre, de plus, que les deux objets tombent en restant ensemble et que leur vitesse augmente tout au long de la chute.

C'est à ce moment là que, devant la nécessité d'étudier quantitativement le problème, nous introduisons le concept de vitesse. C'est intentionnellement, et afin que les concepts de cinématique prennent leur sens au cours de la résolution du problème, que nous n'avons pas fait d'enseignement préalable de cinématique.

On propose alors aux élèves de construire un modèle qui permette non seulement de rendre compte de ces résultats, mais encore d'effectuer des calculs prévisionnels de la vitesse en fonction de la durée de la chute (la notion de modèle a déjà été rencontrée en chimie et en électricité). Le débat avec le classe est long et difficile. Quels paramètres, quelles variables faut-il prendre en compte ? Après débat, sont retenus les paramètres F et M et les variables vitesse V et temps t . Les élèves proposent finalement plusieurs relations arithmétiques liant F , M , V et t :

$$\begin{array}{ccccc}
 V+t=F \cdot M & V+t=F+M & V/t=F \cdot M & V/t=F \cdot M & V \cdot t=F \cdot M \\
 V \cdot F/M=t & F \cdot t=M \cdot V & F \cdot t=M/V & F \cdot V=M \cdot t & V \cdot F \cdot M=t
 \end{array}$$

Il s'agit alors de choisir entre ces différentes propositions. Résumant les résultats expérimentaux, l'enseignant demande aux groupes d'élèves d'éliminer les propositions visiblement non conformes. Deux propositions sont acceptables : $F \cdot V = M \cdot t$ et $F \cdot t = M \cdot V$. Elles sont gardées à titre d'hypothèses. Il convient donc de les confronter aux résultats expérimentaux c'est-à-dire aux mesures effectuées sur l'enregistrement vidéo. Les élèves apprennent ainsi à mesurer des vitesses sur les enregistrements vidéo à partir du repérage des positions obtenues par arrêt sur image. Ils mesurent différentes valeurs de V à différents moments.

F et M étant déduits de la pesée des objets, ils constatent que la relation $M \cdot V = F \cdot t$ semble convenir tandis que l'autre hypothèse doit être abandonnée. L'enseignant propose alors aux groupes de vérifier la validité de la relation précédente sur d'autres enregistrements de chute libre. Les élèves constatent que $M \cdot V = F \cdot t$ ne convient pas dans tous les cas. Faut-il donc abandonner ? Comment se fait-il que cette relation ait marché lors de la première chute étudiée ? À ce stade du débat, c'est l'enseignant qui doit apporter la réponse, les élèves s'avérant incapables de la trouver. Finalement, il propose (et les élèves acceptent) de relier deux états quelconques 1 et 2 du système par la relation : $M \cdot V_1 + F \cdot t_{12} = M \cdot V_2$ qui semble bien vérifiée sur tous les enregistrements réalisés. L'enseignant institue alors le modèle de la chute libre sous la forme suivante :

MODÈLE DE LA CHUTE LIBRE

Champ expérimental de référence :

Objets abandonnés à l'action de la pesanteur sans vitesse initiale (effet de l'air négligé)

Notions de base :

masse M en kilogramme : grandeur qui mesure l'inertie
 vitesse V en mètre par seconde
 temps t en seconde
 force d'attraction terrestre : le poids F en newton

Relation :

mouvement de chute libre : $M \cdot V_1 + F \cdot t_{12} = M \cdot V_2$
 (1 et 2 représentant deux états du système)

Après avoir élaboré avec les élèves ce modèle de la chute libre, on propose alors à la classe une deuxième situation-problème. L'intention est ici de modifier ce modèle de façon à élargir son champ expérimental de référence.

SITUATION-PROBLÈME N° 2 : On lance une balle verticalement vers le haut. Quelle(s) action(s) s'exerce(nt) sur la balle durant la montée ? Si tu envisages que plusieurs actions s'exercent simultanément, quelle est, selon toi, la plus forte ? Agit-elle tout le temps ? Reste-t-elle constante ?

Tous les élèves pensent qu'une «poussée» dirigée vers le haut et qui diminue au cours de la montée agit sur la balle. La plupart y ajoutent l'action de la Terre, constante et dirigée vers le bas. La première sera représentée par une force F' et la seconde par F . Sans chercher à dissuader les élèves de recourir à la «force de lancement F' », l'enseignant leur demande alors de transformer la relation valable pour la chute libre en une nouvelle relation arithmétique rendant compte de la montée. Plusieurs hypothèses sont alors rapidement formulées :

$$M \cdot V_1 - (F + F') \cdot t_{12} = M \cdot V_2$$

$$M \cdot V_1 - (F - F') \cdot t_{12} = M \cdot V_2$$

$$M \cdot V_1 - (F' - F) \cdot t_{12} = M \cdot V_2$$

Le débat et les vérifications expérimentales conduisent les élèves à retenir le résultat suivant : $M \cdot V_1 - F \cdot t_{12} = M \cdot V_2$. Mais retenir cette relation revient à admettre que la «force de poussée» F' est inopérante. Les élèves semblent très déstabilisés par l'obligation qui leur est faite, par l'expérience, d'abandonner la force F' . C'est ce moment que choisit l'enseignant pour proposer une représentation de l'«élan» en introduisant la notion de **quantité de mouvement** $p = M \cdot V$. La relation précédente s'écrit alors :

$$p_1 - \bar{F} \cdot t_{12} = p_2$$

Les travaux suivants font appel à la même démarche ; ils conduisent les élèves à rendre compte à la fois de la montée de la balle et de la descente qui suit celle-ci par une même relation. Après discussion, on vérifie que la relation cherchée peut être écrite sous forme vectorielle et qu'elle s'écrit alors : $\vec{p}_1 + \vec{F} \cdot t_{12} = \vec{p}_2$.

La troisième situation-problème proposée est la suivante.

SITUATION-PROBLÈME N°3 : La balle est maintenant lancée dans une direction oblique. Quelle(s) action(s) vont intervenir pendant le mouvement ? Peut-on, dans ce cas écrire encore une relation ? Si oui laquelle ?

Une démarche similaire conduit à la validation du modèle suivant.

MODÈLE DES SITUATIONS DE BALISTIQUE

Champ expérimental de référence :

Objets éventuellement lancés puis abandonnés à l'action de la pesanteur (effet de l'air négligé)

Notions de base :

masse M en kilogramme : grandeur qui mesure l'inertie

vecteur vitesse \vec{V} (V en mètre par seconde)

temps t en seconde

force d'attraction terrestre : le poids \vec{F} (F en newton)

Relations :

définition du vecteur quantité de mouvement $\vec{p} = M \cdot \vec{V}$

mouvement du centre de gravité $\vec{p}_1 + \vec{F} \cdot t_{12} = \vec{p}_2$

(1 et 2 représentant deux états du système)

La situation suivante a encore pour but l'élargissement du modèle à des situations nouvelles. On propose aux élèves de débattre et de résoudre le problème suivant.

SITUATION-PROBLÈME N°4 : Un skieur dévale en ligne droite une pente très glissante assimilable pratiquement à un plan incliné (comme c'est le cas dans les épreuves de ski à grande vitesse). À quelle(s) action(s) se trouve soumis le skieur ? Peut-on modifier le modèle précédent de manière à le rendre applicable à cette nouvelle situation ?

Les débats et la résolution de ce problème conduisent l'enseignant à une nouvelle formulation du modèle que nous donnons ci-dessous.

MODÈLE PERMETTANT L'ÉTUDE DU MOUVEMENT D'UN SOLIDE SOUMIS À DES ACTIONS CONSTANTES

Champ expérimental de référence :

Objets simultanément soumis à des actions que l'on peut considérer comme constantes

Notions de base :

masse M en kilogramme : grandeur qui mesure l'inertie

vecteur vitesse \vec{V} (V en mètre par seconde)

temps t en seconde

vecteur force \vec{F} (F en newton)

Relations :

définition du vecteur quantité de mouvement $\dot{\vec{p}} = M \cdot \dot{\vec{V}}$

mouvement du centre de gravité $\vec{p}_1 + \vec{F} \cdot t_{12} = \vec{p}_2$

(1 et 2 représentant deux états du système)

principe de superposition : si un corps est soumis simultanément à plusieurs actions représentées par les forces $\vec{F}_a, \vec{F}_b, \vec{F}_c \dots$, il évolue comme s'il n'était soumis qu'à une seule action représentée par une force \vec{F} appelée résultante et donnée par la relation vectorielle :

$$\vec{F} = \vec{F}_a + \vec{F}_b + \vec{F}_c + \dots$$

À la suite de cette séquence, dont l'enseignement a pris près de deux mois, le travail a consisté à examiner des situations pour lesquelles la force résultante \vec{F} est nulle. La classe a ainsi étudié des situations inertielles et vérifié la première loi de Newton (principe de l'inertie). De plus, le programme de la classe prévoyant l'étude des conditions d'équilibre d'un solide soumis à trois actions, ces situations d'immobilité ont été étudiées comme des cas particuliers de situations inertielles.

3. ÉVALUATION

Nous avons conçu cette séquence autour d'un objectif de changement conceptuel : il était important que les élèves abandonnent leurs conceptions intuitives et qu'ils prennent l'habitude de recourir de manière plus

systématique à l'utilisation d'un modèle newtonien. Nous avons évalué le degré d'atteinte de ce changement à l'aide d'une méthode d'évaluation interne doublée d'une évaluation comparative des conceptions.

Évaluation interne. En élaborant notre dispositif d'enseignement, nous avons effectué une analyse *a priori* des compétences et savoir-faire attendus. Nous avons ensuite proposé aux élèves de résoudre différents exercices, de répondre à des questions ou de commenter des textes scientifiques, ceci à différentes reprises et notamment plusieurs semaines après cet enseignement. Leurs réponses ont été analysées en référence aux éléments de l'analyse *a priori*. Les résultats semblent montrer une bonne acquisition des savoir-faire pour la majorité d'entre eux (55 à 86 %), et la mise en œuvre d'un raisonnement newtonien lors des activités de résolution de problèmes, et ce pour plus de la moitié environ.

Évaluation comparative des conceptions. Nous avons fait passer aux élèves, avant enseignement puis plusieurs semaines après avoir terminé, un test construit d'après un questionnaire élaboré par Halloun et Hestenes (1985). Les résultats obtenus par ces deux méthodes témoignent de progrès très importants : la conception d'impetus présente au départ neuf fois sur dix ne s'est retrouvée, après enseignement, que deux fois sur dix. Tous les élèves sans exception progressent dans leurs réponses. Ce progrès peut être qualifié de très important pour 30% d'entre eux. Nous pensons qu'il y a tout lieu d'être attentif à ce résultat, compte tenu de ce que la recherche en didactique nous apprend sur la très grande résistance de ces conceptions.

4. ANALYSE DE LA TRANSPOSITION DIDACTIQUE RÉALISÉE

La conception de cette séquence a nécessité des choix qu'il nous paraît utile de justifier et qui concernent, pour l'essentiel, d'une part le modèle enseigné, et d'autre part la logique de construction de ce modèle avec la classe.

4.1. Légitimité du modèle enseigné

Le modèle s'appuie sur le concept newtonien de force : \vec{F} modifie \vec{v} c'est-à-dire accélère, freine ou dévie le corps auquel elle est appliquée. En privilégiant cette définition, nous avons choisi de ne pas nous appuyer sur le rôle des forces dans les déformations ou les équilibres, contrairement à

l'habitude. Nous avons fait intervenir la quantité de mouvement comme capital de mouvement tel que le définit Galilée, c'est-à-dire en mettant l'accent sur les deux aspects antagonistes de ce concept : mouvement par la vitesse et résistance au mouvement par la masse. Halbwachs souligne, en effet, l'intérêt qu'il peut y avoir à fonder un modèle newtonien sur le concept de quantité de mouvement que l'élève désigne spontanément par le mot d'«élan». « *Il est intéressant de noter que l'élan de l'enfant au stade opératoire concret désigne la même notion et joue le même rôle dans la compréhension partielle de la dynamique que le mot d'impetus dans la mécanique pré-galiléenne* » (Halbwachs, 1974).

Nous avons donc choisi de privilégier dans la quantité de mouvement le concept de capital, interne au corps en mouvement, et modifié par l'action d'une force. Ce faisant nous nous sommes écarté volontairement de la démarche habituelle qui réduit l'emploi de la quantité de mouvement aux problèmes de chocs. Dans la démarche de modélisation que nous avons entreprise, nous aurions pu réduire l'articulation entre les deux concepts fondamentaux de la mécanique - force et quantité de mouvement - à des considérations qualitatives comme c'est habituellement le cas au début de l'enseignement. Tel ne fut pas notre choix ; nous avons choisi, au contraire de développer un modèle quantitatif. Un argument essentiel qui milite en faveur de l'approche quantitative a été donné par Piaget (Piaget, 1973) puis repris par Halbwachs (Halbwachs, 1974). Selon les travaux de ces derniers, l'existence d'une relation liant les concepts de force et de quantité de mouvement contribue à mieux les distinguer. Ils ont montré que le simple discours sur les effets des forces ne suffisait pas à bousculer les conceptions initiales et qu'il était nécessaire, d'une part d'avoir recours à l'établissement d'une relation liant les deux concepts de force et de quantité de mouvement et, d'autre part, d'entraîner les élèves à utiliser cette relation. Dans la recherche d'une relation simple, nous nous sommes appuyé sur les travaux d'épistémologie génétique de Piaget relatifs à la pensée opératoire causale. Piaget montre en effet que les opérations les plus accessibles à un sujet privilégiant la pensée opératoire causale (ce qui est le cas chez l'adolescent), supposent une distinction tranchée entre «états» et «transformations» opérant sur ces états ; «*dans tous les cas, la compréhension des transformations est nécessaire à celle des états et réciproquement*». Halbwachs montre que cette non-séparation des états et des transformations, particulièrement prononcée dans la loi $F = d(mV)/dt$, explique la difficulté rencontrée dans l'enseignement de cette loi (Halbwachs, 1974). Nous avons donc choisi de limiter le champ empirique de notre étude à des situations ne comportant que des forces que l'on peut raisonnablement considérer comme constantes. Dans ce cas, en effet, la relation de la dynamique, deuxième loi de Newton, peut s'écrire : $\vec{p}_1 + \vec{F} \cdot t_{12} = \vec{p}_2$

4.2. Les étapes de la modélisation

Nous avons voulu que les élèves participent le plus possible à l'activité de modélisation. Cependant, le modèle étant trop compliqué pour pouvoir être construit par eux en une seule opération, nous avons décidé de le construire en plusieurs étapes en procédant à des élaborations successives de modèles de plus en plus perfectionnés, chacun d'eux correspondant à une situation-problème, et chacun emboîtant les précédents. Nous avons arrêté le choix des situations en fonction du niveau de complexité du modèle à construire. L'objectif de chaque nouvelle situation était de faire apparaître l'inadaptation du modèle précédemment construit, et la nécessité de le perfectionner si l'on voulait pouvoir interpréter la situation nouvelle en même temps que les situations antérieures. De plus, les situations devaient être motivantes, suffisamment simples et toujours très ancrées dans la réalité quotidienne des élèves afin de faciliter le processus de dévolution. On pouvait craindre que la redondance méthodologique qui apparaît au fil des situations engendre un phénomène de lassitude chez les élèves. Il n'en fut rien. Bien au contraire, nous avons pu constater que les similitudes de méthodologie employées lors des activités de modélisation ont eu, semble-t-il, un effet bénéfique, et qu'elles ont contribué favorablement à la dévolution des problèmes.

Comme on le voit, la logique des situations est celle des modèles et non une logique d'exposition. Nous avons privilégié une organisation du curriculum respectant un *principe de nécessité* lié à la résolution des problèmes. Les notions et concepts du cours sont donc intervenus en tant qu'outils nécessaires à la résolution, c'est-à-dire en privilégiant le statut opératoire des connaissances par rapport à leur aspect déclaratif. C'est ainsi que la séquence ne fut précédée d'aucun enseignement de cinématique et que, par exemple, les notions de trajectoire ou de vitesse ne furent introduites et travaillées que lorsqu'elles furent rendues nécessaires par la situation. L'ordre dans lequel les notions ont été introduites a donc été très différent de celui qu'on observe généralement dans une démarche traditionnelle. Il s'agissait en effet de permettre la construction des connaissances à la lumière des situations, sans se laisser imposer une chronogenèse fondée sur une autre logique que celle de la résolution du problème (Chevallard, 1985).

En choisissant ainsi d'inscrire l'enseignement des sciences physiques dans des activités de résolution de problème et de modélisation, nous avons fait en sorte que l'élève appréhende le plus justement possible la démarche de la physique telle qu'elle est actuellement reconnue par la grande majorité des physiciens et, en veillant toujours à bien différencier la réalité du modèle, qu'il s'approprie le rapport dialectique qui les lie. Notre

souci fut toujours qu'il comprenne bien que c'est au niveau de l'articulation modèle/réalité que se situe la validation des connaissances scientifiques.

4.3. Prise en compte des conceptions des élèves

Nous avons déjà mentionné la grande résistance des conceptions auxquelles nous avons dû nous attaquer dans cet enseignement. Loin de minimiser leur importance dans le travail effectué avec la classe, nous les avons mises à l'épreuve en nous efforçant de les rattacher aux théories préscientifiques d'impetus que nous n'avons pas hésité à enseigner. L'aspect le plus caractéristique de notre démarche fut sans doute le parti que nous avons pris de faire fonctionner les représentations des élèves comme pré-modèles (Johsua, 1989). Ainsi, plutôt que de chercher à détruire systématiquement les conceptions en tentant de montrer aux élèves leurs erreurs et de les dissuader dans leur démarche, nous les avons au contraire encouragés à les faire fonctionner afin qu'ils soient convaincus de la nécessité de recourir à des concepts plus performants. Par exemple, dans l'étude du mouvement d'une balle lancée, nous n'avons pas cherché à montrer que la «*force de lancement*» n'avait pas de raison d'être. Nous avons au contraire progressivement amené les élèves à décider qu'il était préférable de ne pas ranger dans la même catégorie, d'une part l'action mécanique de la Terre, et d'autre part l'élan, compris comme capital interne communiqué par la main du lanceur à la balle. C'est ainsi qu'ils ont été conduits à différencier les concepts de force et de quantité de mouvement. Il nous semble que cette démarche nous a permis en quelque sorte de «détourner» la conception d'impetus vers la notion de quantité de mouvement.

4.4. Le statut de l'expérimental

Le respect de nos hypothèses d'apprentissage nous a conduit à inscrire l'expérimental de cet enseignement dans une démarche de preuve. Nous avons largement fait appel à l'expérience de pensée comme source d'hypothèses et à l'élaboration d'expériences-tests dans le but de les confirmer. Quant à l'expérience proprement dite, nous l'avons essentiellement utilisée comme élément de validation, sans toutefois trop laisser entendre aux élèves qu'une expérience, si précise soit-elle, pouvait suffire à valider une théorie. Les recherches sur les conceptions nous enseignent qu'une expérience ne peut, à elle seule, suffire à renverser les conceptions de l'élève. Dans cet enseignement, nous n'avons donc pas cherché à concevoir chaque expérience avec l'objectif de prouver rapidement

la validité d'une loi ; nous avons plutôt entrepris d'attaquer, d'ébranler de plus en plus les raisonnements pseudo-aristotéliens tout au long du dispositif que nous avons mis en œuvre. Enfin, le choix du matériel expérimental a toujours été guidé par le souci de faire appel à des objets très familiers de l'élève et aussi peu sophistiqués que possible.

5. STRUCTURE DES SITUATIONS-PROBLÈMES

Dans la conception et la conduite des situations-problèmes, nous avons fait appel à une mise en œuvre constructiviste fondée sur l'apprentissage par résolution de problèmes selon une logique qui s'inspire, en l'adaptant, de la théorie des situations didactiques de Guy Brousseau. Lors d'une telle situation, les élèves construisent des connaissances en résolvant le problème qui leur est posé tandis que l'enseignant gère la situation en se tenant volontairement, et autant que faire se peut, à l'écart, évitant ainsi le plus possible d'apporter les éléments de la réponse attendue. Pour reprendre une image de Daniel Gil Perez, le rôle de l'enseignant consiste à guider l'activité de la classe en suivant une méthodologie proche de celle d'un directeur de recherches vis-à-vis des chercheurs novices de son laboratoire (Gil Perez, 1991).

Toutes nos situations ont été construites selon des architectures voisines comprenant une phase d'anticipation suivie d'une phase de modélisation.

La **phase d'anticipation** commence par la proposition d'une expérience à réaliser correspondant à une situation problématique concrète, toujours très simple et bien inscrite dans la réalité quotidienne de l'élève. Celui-ci se trouve alors conduit à faire un pronostic sur le résultat et surtout à s'engager dans une argumentation mettant en jeu ses conceptions. À ce stade, ces dernières constituent bien souvent le seul référent théorique dont il dispose pour faire des anticipations sur le résultat de l'expérience. Le rôle de cette phase d'anticipation est de créer les conditions d'un conflit qu'on espère voir apparaître lors de la phase d'expérimentation qui suivra. Elle doit normalement conduire les élèves à rechercher les conditions d'une vérification expérimentale de leurs conjectures. Nous avons en effet toujours vérifié à ce stade une très grande activité des élèves dans la recherche et l'élaboration du dispositif expérimental de contrôle. Or, l'expérimentation entreprise à ce niveau permet généralement de conclure à l'inefficacité des conceptions comme modèles explicatifs pour la situation étudiée, ce qui ne manque pas d'interroger les élèves. Incontestablement, l'anticipation semble jouer un rôle très important dans la dévolution du problème à l'élève et la déstabilisation momentanée des conceptions.

La **phase de modélisation** consiste soit à faire élaborer par les élèves, réunis en petits groupes de quatre ou cinq, un modèle théorique de la situation étudiée expérimentalement, soit à améliorer un modèle élaboré précédemment. Elle commence par une recherche de modèles plausibles qui sont formulés par les élèves à titre d'hypothèses. Elle se poursuit par l'élaboration et la mise en œuvre par les élèves d'une ou de plusieurs expériences tests. Les résultats des mesures expérimentales contribuent à la validation du modèle qui sera retenu. Dans notre cas, la modélisation a nécessité à plusieurs reprises l'intervention de l'enseignant, même si une partie importante du travail fut le fait des groupes d'élèves. Elle était d'ailleurs inévitable dès lors que le modèle requérait l'usage de concepts mathématiques jusque là peu coutumiers des élèves comme, par exemple, les vecteurs. Cependant, dès lors que le modèle fut construit, les élèves n'eurent aucune difficulté à vérifier expérimentalement sa capacité à rendre compte de la situation étudiée et ils le firent bien volontiers.

Ce travail, ainsi que d'autres recherches antérieures (Robardet, 1990), nous a permis de faire le point sur le concept de situation-problème en physique. La séquence que nous venons de présenter montre qu'un tel dispositif peut permettre la construction de connaissances en proposant à l'élève un apprentissage par adaptations progressives et par résolution de problèmes successifs. Ainsi, une situation-problème semble avoir pour fonction essentielle d'associer la construction du sens à celle des connaissances. Ce faisant, elle a pour objectif le franchissement d'un obstacle épistémologique ou didactique souvent fondé sur la présence d'une ou plusieurs conceptions. Cependant, en raison de la très grande résistance de ces conceptions, l'obstacle ne peut généralement pas être franchi rapidement. **Plusieurs situations-problèmes sont le plus souvent nécessaires** pour ébranler une conception et contribuer ainsi au développement conceptuel de l'élève. Ainsi, une situation-problème doit être pensée à l'intérieur d'un dispositif plus large de situations, chacune apportant sa contribution particulière. Enfin, il apparaît à la lumière de ce travail qu'un ensemble cohérent de situations-problèmes peut servir de cadre à une démarche de modélisation par emboîtement successif.

BIBLIOGRAPHIE

- ARSAC G., DEVELAY M. & TIBERGHEN A. (1989). *La transposition didactique en mathématiques, en physique, en biologie*. Lyon, IREM, LIRDIS.
- BROUSSEAU G. (1986). Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol. 7, n° 2, pp. 33-115.
- BROUSSEAU G. (1988). Le contrat didactique : le milieu. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, vol. 9, n°3, pp. 309-336.

- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée Sauvage.
- GIL PEREZ D. (1987). La résolution de problèmes comme activité de recherche : un instrument de changement conceptuel et méthodologique. *Petit X*, n° 14-15, pp. 25-38. Grenoble, IREM.
- GIL PEREZ D. (1991). Contre les stratégies orientées à la production de changements conceptuels. In *Actes du premier séminaire national de recherches en didactique des sciences physiques*. Grenoble, IFM Université Joseph Fourier, pp. 113-125.
- HALBWACHS F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel, Delachaux et Niestlé.
- HALLOUN I.A. & HESTENES D. (1985). Common sense concepts about motion. *American Journal of Physics*, vol. 53, n° 11, pp. 1056-1065.
- JOHSUA S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : Le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne, Peter Lang.
- MC CLOSKEY M. (1983). L'intuition en physique. *Pour la science*, n° 68, pp. 68-76.
- PIAGET J. (1973). *Introduction à l'épistémologie génétique. Vol 2 : La pensée physique*. Paris, PUF.
- ROBARDET G. (1990). Utiliser des situations-problèmes pour enseigner les sciences physiques. *Petit X*, n° 23, pp. 61-70. Grenoble, IREM.
- SALTIEL É. (1986). Raisonnements spontanés des élèves et modèles physiques passés ou actuels. *Groupe physique IREM*, Tome 1, n° 87, pp. 5-18. Rouen, IREM.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.