

Enseignement et apprentissage d'un concept par les élèves : la quantité de mouvement en classe de seconde

par Gérard LEMEIGNAN

Maître-Assistant en Sciences Physiques, Université Paris 6

Annick WEIL-BARAIS

Maître de Conférence en Psychologie, Université Paris 8

Laboratoire Interuniversitaire de Recherches
sur l'Enseignement de la Physique et de la Technologie,
Université Paris 7, C.N.R.S., U.A. 663

avec la participation de

Monique GOFFARD

Professeur de Sciences Physiques, Lycée Henri V, Paris

Francine CHAVY

Professeur de Sciences Physiques, Lycée Maurice Ravel, Paris

(Les recherches auxquelles il est fait référence dans cet article ont bénéficié de l'aide de l'I.N.R.P. au titre de la Recherche Coopérative sur Programme «Résolution de problèmes en mathématique et en Physique» sur le thème : «Construction inductive d'un modèle en mécanique et résolution de problèmes» (rapport de fin de contrat, 1987) et de l'aide du M.I.R. - M.E.N., au titre de l'Action Concertée «Recherche en éducation et formation», sur le thème : «Enseignement et apprentissage de la modélisation»).

L'enseignement de la physique au lycée est source de nombreuses préoccupations, et plus particulièrement celles qui concernent les difficultés rencontrées par les élèves des classes de seconde (dite «indifférenciées»). Ces difficultés se traduisent par des redoublements ou des orientations dans des filières où les sciences physiques ont moins d'importance et sont enseignées différemment avec d'autres objectifs. Tant que le système éducatif pouvait se contenter de sélectionner la faible proportion d'élèves destinés à des carrières scientifiques, ces phénomènes anciens n'avaient rien de problématique. Ils le sont devenus du fait de l'importance accrue des besoins de la société en matière de formation et de culture scientifique.

Comment faire pour que davantage d'élèves réussissent en sciences physiques et s'y intéressent ? Les réponses à une telle question ne sont pas simples. Si elles l'étaient, en effet, il serait incompréhensible que la situation de l'enseignement de la physique n'ait guère évolué ces dernières années malgré les discours allant dans ce sens, à moins de taxer la majorité du corps enseignant d'incompétence professionnelle ou de mauvaises intentions et d'attribuer à la majorité des élèves une inaptitude aux activités scientifiques. (L'incompétence à l'abstraction et au maniement des mathématiques est alors souvent évoquée pour expliquer les échecs des élèves en sciences physiques). Du point de vue de la recherche en didactique, plusieurs «*détours*» sont possibles pour aborder une telle question. Nous en avons emprunté trois, à propos d'une étude relative à l'introduction de la quantité de mouvement en classe de seconde, grandeur physique jugée par les professeurs comme étant difficile «à faire passer» auprès des élèves.

Le premier détour consiste à s'interroger sur le concept lui-même, sur son mode d'élaboration et son mode d'utilisation. Ceci conduit à repérer les difficultés relatives à la nature du concept.

Le second détour consiste à examiner les conditions actuelles de l'enseignement, les effets qu'il produit sur les élèves, les programmes et les manuels. Ceci conduit à diagnostiquer les difficultés imputables à l'enseignement lui-même.

Le troisième détour consiste à étudier les activités des élèves en situation d'apprentissage où les conditions permettant la formation des connaissances sont contrôlées. Dans une recherche de ce genre, les situations sont conçues de telle sorte qu'elles favorisent la formation des connaissances chez les élèves, en fonction d'un corps d'hypothèses relatives aux processus d'apprentissage ; un dispositif d'observation est mis en place de façon à avoir des renseignements sur les activités développées par les élèves et sur les effets produits par les interventions didactiques effectuées. La conception des situations et des dispositifs d'observation nécessaires à la mise en œuvre de la recherche ne sont pas à reproduire dans les pratiques scolaires. Celle-ci constitue un moyen permettant d'obtenir des informations précises sur les éléments déterminants des apprentissages possibles par les élèves, ce qui permet de faire des choix plus rationnels pour l'enseignement.

Ces divers détours reviennent à considérer que ce qui fait problème fondamentalement dans l'enseignement de la physique, c'est la physique elle-même, en tant que domaine de connaissances imposant des ruptures dans les modes de pensée des élèves, et l'enseignement lui-même, dans la mesure où il ne prendrait pas suffisamment en charge les conditions nécessaires à la formation des concepts, des modèles et des démarches.

Aussi considérons-nous qu'il revient à la didactique de mettre à l'étude les conditions de leur apprentissage par le plus grand nombre d'élèves. Le pré-supposé qui est le nôtre, en effet, est que la grande majorité des élèves qui arrivent, déjà sélectionnés, en classe de seconde, devraient pouvoir accéder aux concepts et aux modèles de la physique, à condition de fixer des objectifs raisonnables et à condition de prendre en charge l'accompagnement des changements à opérer dans les modes de pensée. «Changement», ne veut pas dire ici «substitution». Il s'agit seulement d'apprendre à l'élève de nouveaux modes de pensée qui s'avèrent très efficaces dans de nombreux domaines. Si de tels objectifs pouvaient être atteints, l'orientation des élèves devrait pouvoir se faire, non plus sur la base d'une sélection par la réussite ou l'échec en sciences physiques et en mathématiques, mais sur la base de leurs projets de formation ou de leurs motivations personnelles et professionnelles. Les sciences physiques pourraient alors acquérir un statut de discipline formatrice auquel elles prétendent à juste titre.

Utopie, diront les sceptiques, «de la physique douce», nous ont dit des lycéens ayant participé à notre recherche. Afin de dépasser ce qui n'est jusqu'ici que discours d'opinion, examinons comment les trois détours que nous avons empruntés dans le cadre d'une recherche font avancer les questionnements sur l'enseignement de la physique au lycée.

1. PREMIER DÉTOUR : DU CÔTÉ DES CONCEPTS DE LA PHYSIQUE

La physique comme les mathématiques enseignées actuellement au lycée se caractérisent par l'usage prépondérant que ces disciplines font des concepts «formels» (l'expression est reprise de Cassirer, 1910, ainsi que les termes entre guillemets de ce paragraphe). Contrairement aux concepts de type catégoriel que les élèves ont construit dans leur vie pratique ou rencontré dans d'autres disciplines, comme par exemple le concept de «mammifère» qui se rapporte à des objets naturels (des animaux) ou le concept d'«adjectif» qui réfère à des objets symboliques (les mots de la langue) dont l'élaboration peut être «dérivée» de traitements sur les objets eux mêmes (extraction de régularités, mise en relation, comparaison de classes, ordonnancement...), les concepts formels sont «présumés», c'est-à-dire qu'ils sont posés, par hypothèse.

Cette différence de nature entre concepts catégoriels et concepts formels introduit des différences fondamentales dans les processus de construction de ceux-ci. Dans l'analyse qu'en a fait Piaget, les premiers concepts relèvent de l'«abstraction empirique» alors que les seconds relèvent de l'«abstraction réfléchissante». La différence de nature profonde entre ces deux types d'abstraction réfère à la nature des «objets» sur

lesquels opèrent les processus d'abstraction : des objets matériels ou symboliques dans un cas, des opérations de pensée dans l'autre. Si l'on suit une telle analyse, les concepts formels ne pourraient se construire que par un effort de réflexion de la pensée sur elle-même, ce qui n'est pas sans conséquence pédagogique.

Après ce bref aperçu théorique, revenons au concept de quantité de mouvement. Du fait de sa nature de concept formel, l'enseignant ne peut pas fournir aux élèves d'exemples (ni bien sûr de contre-exemples) du concept. Il ne peut pas non plus espérer que l'élève construise le concept par un processus de comparaison et de mise en relation d'objets, de situations ou d'événements. Il ne peut pas non plus s'appuyer sur des activités de désignation. (Il peut dire, «ça c'est un mammifère», «ça c'est un triangle», «ça c'est de la prose ; mais il ne peut pas dire «ça c'est de la quantité de mouvement»). L'association signifié (le sens du concept) / signifiant (c'est-à-dire ce qui sert d'«étiquette» du concept : le mot, le symbole littéral, le symbole géométrique...) ne peut procéder d'une procédure de désignation. Par ailleurs, pour un élève de seconde ce que décrit la quantité du mouvement est également à construire. En effet, la quantité de mouvement décrit l'état d'un système et un transfert entre systèmes d'une quantité immatérielle, concepts que les élèves rencontrent souvent pour la première fois. Aussi la construction de la quantité de mouvement pour les élèves ne peut-elle s'effectuer que *corrélativement* à un apprentissage des concepts de «système», d'«interaction entre systèmes», d'«état», de «variation d'états» et de «transfert» (corrélativement, puisque le concept de système ne peut prendre de sens que si l'élève dispose des grandeurs nécessaires et suffisantes pour le décrire, compte tenu des questions posées).

Le fait que les moyens habituels de construction des concepts catégoriels ne puissent pas opérer pour l'apprentissage de la quantité de mouvement, constitue une première rupture importante pour les élèves. Il est assez normal qu'en classe de seconde, ceux-ci aient tendance à emprunter leurs modes de fonctionnement développés à propos de la formation des concepts catégoriels (les plus familiers) pour appréhender les concepts formels. L'enseignement devait avoir pour fonction de leur proposer d'autres démarches.

Une autre rupture tout aussi décisive que la précédente concerne la manière dont sont analysées en sciences physiques les expériences elles-mêmes. De nombreuses études ont montré que les explications du monde développées par les élèves dans leur vie pratique consistent à mettre en relation des événements avec des actions, des propriétés ou des fonctions des objets. Ainsi, dans une situation de type «accrochage» proposée aux

élèves dans notre étude (un wagon mobile lancé rencontre un wagon immobile, puis ils s'accrochent et se déplacent ensemble), la majorité des élèves expliquent que le premier wagon a la fonction de pousser le second wagon, ce dernier jouant le rôle d'obstacle. Ils expliquent que la vitesse de l'ensemble est fonction de la poussée et, par ailleurs que plus l'obstacle est important plus la vitesse de l'ensemble diminue. Quand on leur présente d'autres situations, ils font appel à d'autres fonctions. Dans certains cas (mais pas dans tous, et c'est ce qui fait problème) les explications élaborées par les élèves sont associées à des prédictions satisfaisantes, ce qui contribue à asseoir leur validité. La conceptualisation des expériences proposées aux élèves dans l'enseignement est d'une toute autre nature. Il s'agit d'opérer un *bilan* des quantités de mouvement d'un système «avant» et «après» une interaction entre sous-systèmes. Un tel bilan nécessite :

— d'opérer un *découpage temporel particulier* conduisant à déterminer les états à considérer dans le bilan (il s'agit de privilégier l'«avant» et l'«après» au détriment du «pendant» à propos duquel les élèves sont enclins à s'interroger quand des événements se déroulent pendant une durée non négligeable par rapport à celle de l'expérience) ;

— d'identifier et de sélectionner les interactions mécaniques en jeu dans la situation, de décider, après une étude de l'importance de ces interactions par rapport à l'interaction choc considérée, s'il est légitime ou non d'utiliser le principe de conservation ;

— de regrouper les objets en systèmes et de déterminer l'ensemble des grandeurs physiques descriptives des états des systèmes ;

— de traduire littéralement les relations entre les grandeurs et de procéder à des calculs sur des expressions mathématiques ;

— d'utiliser les résultats des calculs pour répondre aux questions portant sur la situation physique.

Ce type de démarche est mis en œuvre indépendamment de la nature des objets en jeu dans les situations, qu'ils se déforment ou non pendant l'interaction et indépendamment des types d'interaction (à distance, magnétique, gravitationnelle) considérés. L'analyse porte sur des systèmes (et non pas des objets) et des interactions décrites elles-mêmes à l'aide de grandeurs physiques (et non pas par une mise en relation causale action-effet). Ceci impose un détachement des aspects directement sensibles des objets et donc une distanciation importante par rapport aux modes habituels d'appréhension du monde.

Une troisième rupture que nous relèverons concerne les modes de contrôles des activités intellectuelles des élèves. Nous évoquons ici les

moyens que la pensée se donne pour contrôler son activité. Ces contrôles s'exercent sur des représentations formelles résultant du processus de conceptualisation des situations et non pas directement sur le réel lui-même. Ainsi les élèves doivent-ils développer jusqu'au bout leur tentative d'analyse des situations pour pouvoir évaluer son aboutissement. Ceci est d'autant moins acceptable par les élèves qu'ils maîtrisent encore mal les concepts physiques et les règles de transformation des expressions littérales. Pour évaluer le résultat de leur analyse, les élèves peuvent être tentés de le comparer à leurs intuitions du monde ; nous avons vu ainsi faire des élèves de seconde observés à l'issue d'une séquence d'enseignement relative à la quantité de mouvement. Or précisément, cette intuition est dans certains cas bien trompeuse. De fait, tant que l'élève n'a pas une maîtrise suffisante des concepts, l'auto-contrôle de son activité sur des bases strictement conceptuelles est impossible. **Les «erreurs» que les élèves commettent sont ainsi constitutives du processus de construction de la connaissance lui-même.**

2. DEUXIÈME DÉTOUR : DU CÔTÉ DE L'ENSEIGNEMENT

Nous avons étudié l'enseignement de deux manières :

- les effets qu'il produit sur les élèves ;
- les documents sur lesquels peuvent s'appuyer les élèves et les enseignants (les instructions officielles et les manuels scolaires).

2.1. Les effets produits par l'enseignement ont été étudiés au moyen d'un questionnaire auquel a répondu un échantillon d'élèves de 1ère S (deux lycées de la Région parisienne). Les résultats de cette étude (Lemeignan & Weil-Barais, 1984) font apparaître que pour la majorité des élèves interrogés la quantité de mouvement n'a pas acquis le statut de grandeur physique. La quantité de mouvement est associée d'une part à des propriétés que peuvent avoir les objets envisagés (s'ils ont fonction de se déplacer, ils peuvent avoir de la quantité de mouvement ; autrement, ils ne peuvent pas en avoir). La quantité de mouvement est étroitement associée à une «formule» ($\vec{P} = \vec{m}v$), sans que pour autant les élèves fassent jouer à la masse et à la vitesse un rôle équivalent. (Pour augmenter la quantité de mouvement d'un mobile, ils proposent plus volontiers d'augmenter la vitesse que la masse). Par ailleurs, la grandeur est liée à l'utilisation de la table à coussin d'air («Un objet a de la quantité de mouvement quand il se déplace sur une table à coussin d'air»). Elle est également fortement associée à une autre expression : «si le système est pseudo-isolé», sans que ceci apparaisse comme une condition d'utilisation du principe de conservation. Enfin, la considération d'un référentiel pour spécifier la quantité de mouvement est rare.

Les élèves peuvent ainsi réussir à faire des calculs en utilisant des «formules» sans pour autant maîtriser les concepts de la physique. De tels résultats interrogent sur le statut de «mathématiques appliquées» que semble avoir acquis la physique au lycée.

2.2. Nous avons étudié les instructions officielles et les manuels scolaires afin de repérer comment est introduit le concept de quantité de mouvement. Les questions que nous nous sommes posées sont les suivantes :

— Quelles sont les *situations expérimentales* et les *questions posées* à leur propos qui peuvent justifier sa construction et son utilisation ?

— Comment sont introduites *les propriétés et les relations* constitutives du concept ?

— Comment sont explicitées *les procédures* associées à l'utilisation du concept (découpage temporel, regroupement des objets en système, identification et sélection des événements, hiérarchisation des effets...).

Faisant l'hypothèse que la construction d'un concept résulte de *l'articulation de ces différents éléments*, nous avons également examiné les modalités d'articulation envisagées dans ces textes.

Dans le cadre de cet article, nous nous contenterons de quelques constats assez généraux, relatifs à quelques points mentionnés précédemment, en nous appuyant essentiellement sur les instructions officielles, les ouvrages scolaires les suivant généralement d'assez près. Ces constats visent à attirer l'attention sur la non prise en charge effective des difficultés des élèves dans la construction d'un concept tel que la quantité de mouvement.

A aucun moment, les textes n'attirent l'attention sur les ruptures à opérer dans les modes de pensée pour appréhender la grandeur. Tout au contraire, ils suggèrent une continuité entre l'expérience courante et la physique : «L'approche souhaitée doit donc rester *simple et concrète*, étayée par des exemples variés empruntés autant que possible à l'expérience courante» (B.O. n° spécial 3-9 juillet 1987).

La quantité de mouvement est *introduite par une seule expérience* («éclatement d'un système isolé de deux solides») avec pour objectif de «faire apparaître la grandeur conservative». Il est préconisé ensuite de généraliser cette loi sans que soient spécifiées les limites du champ expérimental explorable par cette loi, ni que soit avancée la nécessité d'étudier la manière dont peut être mis en œuvre un principe.

La grandeur est définie essentiellement par une relation ($\vec{P} = m\vec{v}$).

Les propriétés de la grandeur, ne sont pas présentées comme éléments de définition. La propriété de la quantité de mouvement d'être transférable (en tout ou partie) d'un système à un autre n'est évoquée que pour suggérer l'équivalence entre le principe des actions réciproques $\vec{F}_{A/B} = -\vec{F}_{B/A}$ et la conservation de \vec{P} exprimée en terme de transfert ($\Delta\vec{P}_A = -\Delta\vec{P}_B$). La nature de ce que décrit \vec{P} n'est pas non plus spécifiée clairement. Consécutivement, il est écrit : «vecteur quantité de mouvement d'un solide»... «conservation de la quantité de mouvement d'un système isolé» (paragraphe 3.2.). Ainsi la question de la construction d'une représentation des situations expérimentales sur laquelle opère la pensée n'est pas abordée de front. Et pourtant ceci est essentiel à la compréhension de ce que sont les démarches en sciences expérimentales. En effet, bien que le référent dont traite la physique soit le domaine des expériences, la construction de représentations de l'expérience se substitue à l'expérience sensible elle-même. La distinction état, variation d'état, transfert n'est pas non plus posée comme fondamentale. L'opération de découpage temporel que nous avons signalée comme étant constitutive du concept n'est pas non plus mise en relief. Elle apparaît au détour d'écriture d'expressions littérales (à droite et à gauche du signal égalité) ; mais il faut être déjà bien averti pour la repérer.

Concernant l'usage des symbolismes, et notamment des symbolismes littéraux, les instructions ne sont pas explicites. Les difficultés afférentes à l'utilisation des symbolismes mathématiques sont cependant nombreuses. Très souvent les ouvrages proposent d'établir des relations par transformations d'expressions. Les élèves doivent-ils en conclure que toutes les transformations des expressions ont un sens physique à condition qu'elles respectent les règles de transformation de l'algèbre ? Quel sens physique peut avoir l'écriture $m = \vec{P} / \vec{V}$?

En comparant les données de notre modeste sondage auprès des élèves aux conditions de l'enseignement spécifiées dans les instructions officielles, une certaine cohérence se dégage. La situation de choc sur table à coussin d'air sert aux élèves de prototype, à tel point que pour certains élèves celle-ci devient un attribut de la quantité de mouvement. («Un objet ne peut avoir de la quantité de mouvement que s'il peut participer à un choc»). Le même phénomène peut se repérer à propos de l'expression «système pseudo-isolé» qui pour certains élèves devient élément de définition du concept. Peut-il en être autrement si la définition du concept se réduit à l'énoncé d'une formule ? L'usage quasi exclusif dans l'enseignement des problèmes «papier-crayon» (l'énoncé de situations expérimentales remplaçant le rapport direct à l'expérience) ou l'étude d'enregistrements graphiques obtenus par le professeur ne contribuent-ils pas à réduire considérablement le travail d'élaboration conceptuel à accomplir ?

3. TROISIÈME DÉTOUR : DU CÔTÉ DE L'APPRENTISSAGE DU CONCEPT

Délibérément nous avons proposé aux élèves un début d'apprentissage prenant appui sur un ensemble de situations expérimentales effectuées sur table, explorables et modifiables par les élèves eux-mêmes.

3.1. Les situations expérimentales

Elles utilisent un matériel composé de petits wagonnets. Les élèves peuvent se déplacer aisément sur des rails rectilignes et horizontaux (longueur ≈ 2 m). Ces wagonnets sont munis à leurs extrémités de deux petits aimants. Selon l'orientation de ceux-ci, les wagons s'attirent ou se repoussent. Les élèves peuvent ainsi réaliser à volonté divers événements :

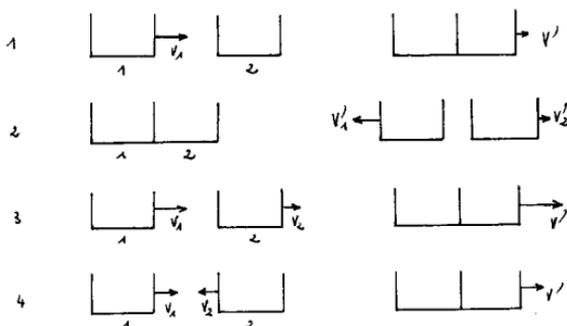
a) des accrochages : les wagons sont lancés l'un contre l'autre, les wagons s'accrochent et se déplacent ensemble ;

b) des éclatements : les wagons maintenus en contact se séparent lorsque l'élève les lâche ;

c) des chocs élastiques : les wagons sont lancés l'un vers l'autre et sans entrer en contact, repartent séparément l'un de l'autre.

Les élèves disposent de pièces de plomb ayant des masses de valeurs différentes ; ils les utilisent à leur gré pour lester plus ou moins les wagons.

Les quatre situations analysées en début d'apprentissage sont les suivantes :



Ces quatre situations ont pour les élèves des statuts très différents en début d'apprentissage. Ils s'en font, en effet, des représentations différentes. Un concept n'est pas construit pour rendre compte d'une seule situation mais de tout un ensemble très vaste d'objets, d'événements et de questions afférentes (ensemble limité cependant). Dès le départ, sont donc en jeu plusieurs situations qui, pour les élèves, ne sont pas gérables par le même concept, celui précisément qui est à construire.

Les situations ne comportent que des objets familiers. Les événements sont aisés à décrire en termes quotidiens. Ces caractéristiques n'en font pas pour autant des situations «simples». Se constituer une représentation c'est, entre autre, passer d'une analyse en termes d'objets (wagons, aimants, rails..) et d'événements (lancer, déplacement, choc, frottement...) à une analyse en terme de systèmes et d'interactions. Ce changement dans les modes de représentation est ici facilitée par le fait que les élèves se représentent assez aisément les systèmes décrits par masse et vitesse, au détriment d'autres caractéristiques de ces objets (la forme par exemple). Le regroupement des objets en systèmes posera cependant un problème délicat aux élèves ultérieurement. Par ailleurs, les événements étant suffisamment divers, intriqués (frottement et déplacement) ou bien séparés (le lancer et le choc), certaines activités mentales à mettre en œuvre dans la construction du concept sont d'emblée sollicitées : la séparation des événements, la hiérarchisation des événements, le découpage temporel.

Les situations expérimentales sur table, **analysées dans un but de construction de concepts et non de vérification de lois** présentent un autre avantage. Interrogés à propos de co-variations ou de contra-variations entre, d'une part la vitesse des wagons «après» le choc, et, d'autre part, la masse et la vitesse des wagons «avant» le choc, les élèves fournissent tous des prédictions et des justifications. Les constats à vue portant sur les vitesses, sans opération de mesurage, permettent aux élèves de s'interroger d'entrée de jeu sur leur manière de se représenter les situations.

3.2. La stratégie d'enseignement

Elle repose essentiellement sur un présupposé concernant l'apprentissage : **partir du connu** - ici les grandeurs masse et vitesse - **pour construire l'inconnu** - ici la constitution d'un ensemble nouveau de propriétés - qui rend l'élève capable de prévoir, calculer, modifier dans un sens déterminé un grand nombre de situations expérimentales qui au départ lui apparaissent différentes. Cet ensemble de propriétés porte un nom : la quantité de mouvement ; il est la définition même de la quantité de mouvement. Ce passage du connu à l'inconnu ne peut se faire pour les élèves que par un certain nombre de ruptures, évoquées ci-dessus, dans leurs modes de pensée.

La séquence d'enseignement que nous avons élaborée a pour objectif de mieux comprendre les modalités possibles d'apprentissage du concept. Cette séquence s'est organisée autour des activités suivantes, présentées ici dans l'ordre où elles ont été proposées aux élèves :

- prédictions sur les vitesses et justifications ;
- constats expérimentaux sur le sens de variation des masses et des vitesses ;

- formulation d'hypothèses relationnelles concernant ces deux grandeurs ;
- établissement des relations elles-mêmes à partir des résultats de mesure ;
- émergence d'un invariant - le produit masse-vitesse dont les propriétés sont répertoriées ;
- proposition d'un principe de conservation pour explorer un large domaine de situations expérimentales et de questions afférentes.

a) *Prédictions et justifications*

Leur rôle est de faire révéler aux élèves les représentations qu'ils se font des objets et des événements. Notre questionnement porte sur les grandeurs connues masse et vitesse. Il est du type : si $m_1 \nearrow$ (toutes grandeurs inchangées par ailleurs) alors $v' \nearrow, \searrow$, ou \equiv ? La réponse exprime une relation variationnelle entre grandeurs physiques sans exiger d'emblée une relation d'égalité.

L'analyse des justifications produites par les élèves montrent que ceux-ci mettent en avant :

— La fonction des objets dans les situations d'accrochage : avoir de la poussée pour le wagon lancé, être un obstacle pour le wagon immobile. Ceci permet aux élèves de faire des prédictions correctes pour les situations 1 et 3 mais souvent incorrectes pour la situation 4 qui pour eux présente un mélange des fonctions obstacle et poussée.

— Le rôle de la force dans la situation d'éclatement. Lorsque la masse d'un wagon varie, la force de l'un sur l'autre étant considérée par les élèves comme inchangée, les prédictions effectuées sont incorrectes.

b) *Les constats expérimentaux*

Leur rôle est double :

— Mettre en évidence l'insuffisance des représentations proposées antérieurement. Chaque élève est, en effet, amené à faire des prévisions dont certaines sont correctes et d'autres incorrectes. Ceci est exploité pour montrer qu'il manque «quelque chose» pour maîtriser l'ensemble des situations, et ceci annonce la construction conceptuelle dans laquelle les élèves sont invités à s'engager. Les représentations initiales elles-mêmes ne font l'objet que d'une exploitation ultérieure au moment où les propriétés du concept sont instaurées à partir de traitement des relations fonctionnelles établies pour chaque situation (cf ci-dessous).

— Faire mettre en œuvre les procédures mentales impliquées dans la construction d'une nouvelle représentation (plus efficace).

Certains élèves déclarent : si $m_1 \nearrow$ alors $v' \searrow$, prédiction justifiée par la difficulté de lancer une masse plus importante. C'est la **séparation des événements** lancer-choc qui est en cause. Un geste ample d'accompagnement du bras jusqu'à quelques centimètres du wagon immobile permet de donner au wagon lancé la vitesse désirée quelle que soit sa masse. Ce simple geste semble favoriser la déconnection de l'événement «lancer» et de l'événement «choc».

Les frottements, modifiables par lubrification, ont un effet visible : la vitesse des wagons diminue légèrement au cours du déplacement. Que signifie alors «la» vitesse d'un wagon ? Sont en cause le **découpage temporel** et la **hiérarchie des événements** (procédures mises en œuvre systématiquement pour l'application ultérieure du principe de conservation mais ainsi présentes dès le début de l'apprentissage). La considération de la vitesse «juste avant» (et/ou «juste après») le choc semble lever la difficulté de la définition de la vitesse tout en mettant l'accent sur le découpage temporel des événements. Les frottements ne sont pas annihilés mais raisonnablement leur effet peut être considéré comme négligeable lorsque le wagon mobile parcourt les quelques centimètres qui le séparent du wagon immobile. Certains événements inattendus interrogent les élèves : le glissement des morceaux de plomb sur les wagons «pendant» le choc par exemple. L'analyse d'un tel événement met en évidence à nouveau la procédure de découpage temporel. L'exemple cité montre le cas d'un «pendant» complexe à l'intérieur duquel se déroule un événement, le glissement des pièces de plomb. Mais précisément, une des spécificités de la quantité de mouvement est de permettre l'établissement d'un bilan entre l'avant et l'après, quel que soit le pendant aussi complexe soit-il, pourvu qu'il intéresse le système global des deux wagons sans établir d'interaction nouvelle avec un autre système. (Dans la séquence, on a demandé aux élèves de bloquer les pièces de plomb ; l'examen des glissements n'a été envisagé qu'en fin de séquence).

c) *Hypothèses relationnelles et établissement de relations*

A partir des constats de sens de variation (du type $v' \nearrow$ si $m_1 \nearrow$, $v' \nearrow$ si $v_1 \nearrow$, $v' \searrow$ si $m_2 \nearrow$ dans la situation 1) les élèves sont invités à émettre des hypothèses sur la structure de la relation qui, dans chaque situation, relie les masses et les vitesses des wagons. Nous avons pu constater que les élèves sont capables de développer des stratégies de recherche d'hypothèses efficaces, lorsque le traitement des tableaux de mesures est relié à une étude préalable des sens de variation. (Quand des élèves de même niveau scolaire sont directement confrontés aux mesures, nous avons pu observer que les stratégies qu'ils développent n'aboutissent pas).

A l'issue d'un travail de recherche personnel à l'occasion d'une séance

de travaux pratiques, nous leur avons proposé une démarche générale, mettant en avant :

— un *principe d'économie* : commencer par les structures les plus simples

$$v' = k v_1 \quad v' = \lambda m_1 + \mu$$

$$v' = \frac{\alpha}{m_2} + \beta$$

$$v' = \frac{x m_1 + y}{z m_2 + t} \text{ etc}$$

($\lambda, \mu, \alpha, \beta, x, y, z, t$ étant dimensionnés).

— la *validation ou l'infirmité des hypothèses émises* à partir d'un tableau de résultats de mesures.

— l'*analyse des cas extrêmes* (m_1 ou $m_2 \rightarrow \infty$, $v_1 \rightarrow \infty$) ou de cas particuliers ($m_1 = m_2$). Le tableau de mesures ne peut pas en effet permettre à lui seul un test économique des hypothèses. Nous avons donc proposé aux élèves de systématiser une procédure qu'ils se sont avérés capables de mobiliser par eux-mêmes : le prolongement asymptotique du tableau de mesures obtenu par le jeu de la continuité. Ainsi, dans la situation 1, la forme relationnelle $v' = k v_1$ est la seule à retenir avec une dépendance de k en fonction des masses, de structure :

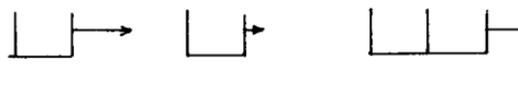
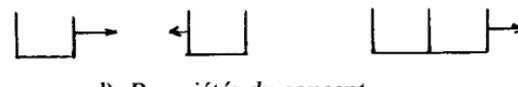
$$k = \frac{am_1 + bm_2}{cm_1 + dm_2}$$

(a, b, c, d : coefficients sans dimension). Le calcul des coefficients peut être fait de manière très économique par la mise en relation d'événements « asymptotiques » (par exemple dans la situation 1, $m_2 \rightarrow \infty$ alors $v' \rightarrow 0$) avec la valeur de k (ici $k \rightarrow 0$), d'où, par continuité, la valeur de b ($b = 0$). Cette procédure d'analyse des cas extrêmes jointe à la mise en relation des événements et de l'écriture algébrique a nécessité de notre part un guidage puisqu'il s'agissait pour les élèves d'une première rencontre avec de telles procédures.

Il est ainsi possible de conduire les élèves à élaborer une relation fonctionnelle entre masse et vitesse pour chacune des quatre situations expérimentales explorées. L'ensemble des relations est le suivant :

(Il convient de remarquer que les relations sont exprimées arithmétique-

quement par les élèves, ce qui est tout à fait suffisant ici pour entreprendre une recherche de l'existence d'une nouvelle grandeur et de ses propriétés).

1.  $v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1$
2.  $\frac{v'_1}{v'_2} = \frac{m_2}{m_1}$
3.  $v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2$
4.  $v' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 - \frac{m_2}{m_1 + m_2} v_2$

d) Propriétés du concept

Les relations obtenues en réponse à la question première (v' ? en fonction des masses et des vitesses) ne permettent pas, telles quelles, de dégager les propriétés d'un invariant. Ceci n'a pu se faire qu'en réponse à des questionnements de la part du professeur :

1. Prise en compte du caractère algébrique de la vitesse (une seule direction). Ce traitement conduit à ne considérer que deux relations décrivant chacune une classe de situation :

A : Accrochage

$$\bar{v}' = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \bar{v}_1 + \frac{m_2}{m_1 + m_2} \bar{v}_2$$

B : Éclatement

$$\frac{\bar{v}'_1}{\bar{v}'_2} = - \frac{m_2}{m_1}$$

2. Est-il possible de regrouper les grandeurs physiques décrivant chaque wagon ? Cela conduit à une réduction des expressions au même dénominateur :

$$A : (m_1 + m_2) \bar{v}' = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2$$

$$B : m_1 \bar{v}'_1 = - m_2 \bar{v}'_2$$

Les formes relationnelles obtenues mettent en évidence le groupement «masse.vitesse» spécifique de chaque wagon sans mélange du type $m_1 \bar{v}_2$; Cette combinaison multiplicative de masse et de vitesse caractérisant bi-univoquement les objets est mise en relation avec une idée préalablement exprimée par les élèves : les wagons possèdent «quelque chose» (poussée), «élan», «impulsion», «énergie») qui augmente si m_1 ou si v_1 augmentent séparément. Cette idée première peut être ainsi traduite en terme de grandeurs physiques : les wagons possèdent du « $m\bar{v}$ ».

3. Quelle est l'histoire de chaque wagon entre l'avant et l'après choc ? La réponse est obtenue par un changement de membre des groupements $m\bar{v}$.

$$A : m_1 \bar{v}' - m_1 \bar{v}_1 = m_2 \bar{v}_2 - m_2 \bar{v}'_2$$

$$B : m_1 \bar{v}'_1 - 0 = 0 - m_2 \bar{v}'_2$$

$$\text{ou pour l'ensemble : } \Delta (m\bar{v})_1 = - \Delta (m\bar{v})_2$$

Cette propriété est mise en relation avec une proposition avancée préalablement par les élèves : «le wagon en mouvement donne quelque chose au wagon immobile». Cette proposition est maintenant traduite en termes de grandeurs physiques : la quantité de mv donnée par l'un des wagons est reçue intégralement par l'autre. Il semble justifié de mettre en avant cette propriété de mv d'être **transférable** puisqu'elle correspond à une idée première des élèves, ce qui n'est pas le cas de la conservation. Notons toutefois que si cette idée de transfert apparaît dans le cas «wagon mobile - wagon immobile», il n'en est pas de même dans les autres situations. Dans le cas de l'éclatement, penser «transfert» suppose de penser au système global des deux wagons qui, accolés, donne à chacun d'eux de la quantité de mouvement dont la somme reste nulle pour le système global, composé alors de deux wagons séparés ! La procédure de partition en système est ici en cause et celle-ci n'est pas encore disponible par les élèves. C'est la question suivante qui permettra d'entreprendre la mise en œuvre de cette procédure fondamentale.

4. Quelle est l'histoire de l'ensemble des wagons entre l'avant et l'après choc ? La réponse est obtenue par un nouveau changement de membre des groupements mv .

$$A : m_1 \bar{v}' + m_2 \bar{v}' = m_1 \bar{v}_1 + m_2 \bar{v}_2$$

$$B : m_1 \bar{v}'_1 + m_2 \bar{v}'_2 = 0$$

La conservation de « $m\bar{v}$ » se trouve ainsi dégagée. Cette propriété ne correspond à aucune des propositions spontanées des élèves. Nous avons

vu en effet que ceux-ci ne disposent pas au départ de la procédure de **partition en systèmes** ni de l'ensemble des grandeurs nécessaires et suffisantes pour les décrire. Lorsque les wagons sont accolés, le système global décrit par Σ_m et v est envisagé par les élèves. Par contre, ils ne l'envisagent plus lorsque les wagons sont séparés ; en effet, le système global n'est plus descriptible par Σ_m et une combinaison de vitesse (*) mais par Σ_m et P . Les élèves sont ici confrontés à un bel exemple de mise en œuvre de la procédure de partition en système par changement de partition (un objet — un système, plusieurs objets — un système) accompagnée d'une redescription des systèmes (de \bar{v} à \bar{p}).

L'ensemble de propriétés ainsi dégagées peut recevoir une dénomination particulière, la quantité de mouvement et une représentation symbolique spécifique, P . Cet ensemble de propriétés constitue la définition la plus signifiante de la grandeur.

5. Que faire des propriétés de la quantité de mouvement dans l'exploration de situations nouvelles ?

La réponse intéresse la gestion de tout **principe** en sciences physiques. Dans l'exploration de nouvelles situations l'accent a donc été mis sur :

a) La mise en œuvre des procédures répertoriées dans l'apprentissage : séparation des événements, découpage temporel, hiérarchisation des événements et partition en système en liaison avec leur description et leur redescription éventuelle.

b) L'utilisation de l'ensemble des propriétés du concept (en demandant aux élèves de s'assurer de la validité de son utilisation), tout ceci, à titre d'hypothèse temporaire, validée ou infirmée par la comparaison des résultats prévus et des constats expérimentaux.

Retour aux questions initiales

Nous avons procédé pour chacune des activités décrites précédemment à une analyse des conduites des élèves et des guidages qui leur ont été proposés par l'enseignant ou par nous mêmes (observateurs et parfois participants). Les données analysées sont multiples : entretiens avec des élèves, enregistrement de discussions en classe à propos de la résolution de problèmes, réponses individuelles écrites à des questionnaires... Ces analyses ont permis de cerner les opérations intellectuelles impliquées dans la construction et l'utilisation du concept qui, pour les élèves du niveau scolaire considéré, constituent de réelles difficultés.

(*) Bien entendu, il l'est encore, mais en ayant recours au concept de centre d'inertie qui dans notre séquence a été introduit postérieurement à la quantité de mouvement.

Les deux difficultés majeures qui persistent à l'issue de la séquence d'enseignement sont relatives d'une part, à l'opération de découpage temporel et, d'autre part, au contrôle de la construction de la représentation nécessaire pour répondre aux questions posées. En ce qui concerne la première difficulté, ceci se traduit par le fait que lorsque dans les expériences décrites ou réalisées le «pendant» du choc est complexe (il se passe quelque chose entre «l'avant» et «l'après»), les élèves ont du mal à déterminer les états à considérer. La prise en considération des actions et des événements peut faire ainsi obstacle à la mise en œuvre d'une procédure qu'ils ont pourtant appris à pratiquer.

La seconde difficulté est liée d'une certaine manière à la première puisque les élèves ont tendance à contrôler les représentations formelles qu'ils construisent par les connaissances intuitives qu'ils ont du monde. Ainsi, s'ils s'attendent à ce que des mobiles se déplacent dans un sens donné à l'issue d'un choc, ils sont assez nombreux à distordre leur analyse formelle, pourtant correcte, afin qu'elle «colle» à leur intuition. Nous avons montré précédemment qu'une telle difficulté était à ce niveau d'enseignement incontournable. En effet, leurs connaissances physiques sont insuffisantes. Par exemple, en l'absence du concept de force, l'analyse des interactions est nécessairement insuffisante. Par ailleurs, même si les situations que nous leur avons proposées peuvent s'analyser uniquement en terme de quantité de mouvement, les élèves ont tendance à penser à d'autres concepts, même s'ils ne les maîtrisent pas. (En particulier, ils ont évoqué l'énergie et la force). Ces deux types de difficultés qui se traduisent nécessairement par des réponses erronées aux problèmes, proposés aux élèves à des fins de contrôle de l'apprentissage, ne doivent pas conduire à sous-estimer les progrès conceptuels des élèves. Le fait que dans le contexte d'apprentissage que nous leur avons proposé, ils aient pu maîtriser un certain nombre des opérations (a priori transférables à d'autres concepts) en jeu dans la construction et l'utilisation d'un concept nous semble extrêmement positif. Les élèves, qui ont participé à notre expérience, n'ont manifesté aucune des difficultés observées habituellement concernant l'utilisation des «formules». On peut penser que l'approche expérimentale proposée contribue à donner du sens progressivement aux formalismes mathématiques utilisés en physique.

L'approche de construction du concept qui a été expérimentée dans la recherche a fait largement appel à l'induction (induction de relations fonctionnelles, induction de propriétés de la grandeur). Ce sont les caractéristiques de la quantité de mouvement qui ont permis une telle approche. En effet, celle-ci peut être construite à partir de l'étude des relations entre masse et vitesse, grandeurs connues des élèves. Pour d'autres grandeurs à propos desquelles nous conduisons actuellement des recherches (force et énergie), d'autres stratégies d'apprentissage doivent être envisagées.

La prise en compte de la spécificité des concepts à acquérir par les élèves conduit ainsi à concevoir des stratégies d'apprentissage adaptées, d'une part aux difficultés inhérentes à la construction et à l'utilisation de ceux-ci et, d'autre part au niveau des élèves. En ce qui concerne la quantité de mouvement, première grandeur de la mécanique introduite en classe de seconde, nous avons pris le parti de mettre l'accent sur la maîtrise d'un certain nombre d'opérations intellectuelles importantes (telles que le découpage temporel, la partition en système, la construction des relations fonctionnelles entre grandeurs, l'utilisation d'un principe) au détriment de ce qui se fait habituellement (mesure de vitesse et composition vectorielle). Ces opérations intellectuelles nous semblent en effet fondamentales pour que les élèves parviennent à maîtriser les démarches en sciences physiques. Nous avons vu que ces opérations sont complexes et qu'il est possible de proposer aux élèves des activités (sous forme de situations-problèmes expérimentaux) susceptibles de les aider à les maîtriser. Il ne faut cependant pas minimiser le temps nécessaire aux élèves pour qu'ils parviennent à exercer un auto-contrôle sur ces activités (condition nécessaire à un fonctionnement autonome), Bien que nous nous soyons imposé, pour la recherche, de respecter les contraintes horaires habituelles (le temps total consacré à la quantité de mouvement a été équivalent au temps habituel qu'y consacrent les professeurs ayant participé à la recherche), nous sommes cependant parvenus à ce que les élèves mettent en jeu, de manière explicite, les procédures nécessaires à la construction d'un concept.

BIBLIOGRAPHIE

- CASSIRER E. (1910). Substance et fonction ; éléments pour une théorie du concept. Edition française, traduit de l'allemand par P. Caussat, les Editions de Minuit, 1977.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1984), Le raisonnement inductif en physique, LIREPT, INRP, octobre 1984, rapport interne 11 pages.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1987), «Construction inductive d'un modèle en mécanique et résolution de problèmes». In : J. COLOMB & J.F. RICHARD (Eds), Résolution de problèmes en mathématique et physique, I.N.R.P., Collection Rapports de Recherche, n° 12, 145-198.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1988). Etude de quelques activités de modélisation. In : G. VERGNAUD, G. BROUSSEAU & M. HULIN (Eds) : Didactique et acquisition de connaissances scientifiques, La pensée Sauvage, 229-244.
- LEMEIGNAN G. & WEIL-BARAIS A. (1988). Gestion d'activité de modélisation en classe. Aster, 7, 1988, 121-141.
- PIAGET J. (1974). La prise de conscience. P.U.F.
- PIAGET J. (1977). Recherches sur l'abstraction réfléchissante. P.U.F.
- PIAGET J. & GARCIA R. (1983). Psycho-genèse et histoire des sciences. Flammarion.