

# **Bilans de forces et loi des actions réciproques**

## **Analyse des difficultés des élèves et enjeux didactiques**

par L. VIENNOT

L.D.P.E.S.

Université Paris VII

---

La mécanique est l'un des tout premiers domaines de la physique pour lesquels on s'est inquiété de connaître les raisonnements «spontanés» ou «naturels» des élèves et des étudiants. Secteur clé de la physique, il se présente traditionnellement comme une charnière entre enseignement secondaire, où il marque l'une des pierres d'achoppement des classes terminales, et l'enseignement supérieur, où il fournit les premières occasions de consternation aux enseignants en charge des nouveaux arrivants à l'université. De plus, on y manipule des concepts très imbriqués, au moins par leurs dénominations, avec des notions souvent évoquées, voire ressenties, dans la vie courante : «vitesse», «force», «énergie», «élan», «l'emporter sur»... Cela, joint à l'étonnante résistance de certaines erreurs à l'enseignement, suggérait assez fortement l'existence d'un ensemble d'idées propres à l'élève, d'origine non scolaire, non nécessairement explicites, en tout cas peu affectées par l'enseignement actuel. De nombreuses études ont, depuis lors, confirmé et complété les premiers résultats (1). On se limitera ici à évoquer certains de ces résultats pour montrer la nature des informations obtenues et ce qu'on peut en faire.

### **1. UNE DESCRIPTION ORGANISÉE**

A des degrés divers, les didacticiens se sont efforcés d'éviter l'établissement d'un simple catalogue d'erreurs, éventuellement assorties chacune d'une interprétation plus ou moins «ad hoc». Ainsi la seule observation de vitesses obstinément invariantes par changement de référentiels, ou de forces déclarées nulles au sommet de trajectoires verticales, n'apporterait-elle pas grand chose à l'enseignant expérimenté qui a déjà vu cela.

Prenons ce dernier exemple pour voir dans quel ensemble de résultats il s'insère maintenant [2, 3].

#### **1.1. Une typologie de réponses**

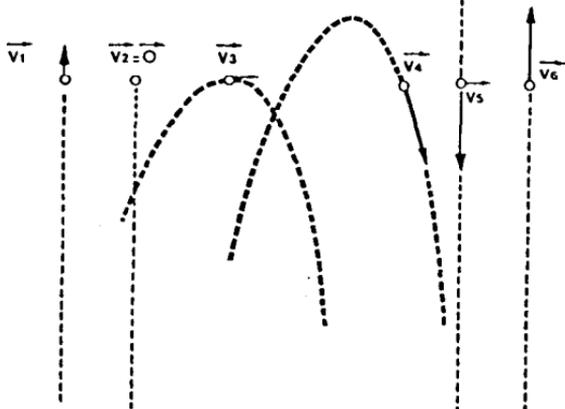
Les deux questions évoquées dans l'encadré 1 suscitent massivement cette erreur. Mais plus : elles font apparaître un ensemble de caractères de réponses :

(1) Une revue de la question au plan international, publiée en 1985, [1], signale l'essentiel des acquis de la recherche dans ce domaine.

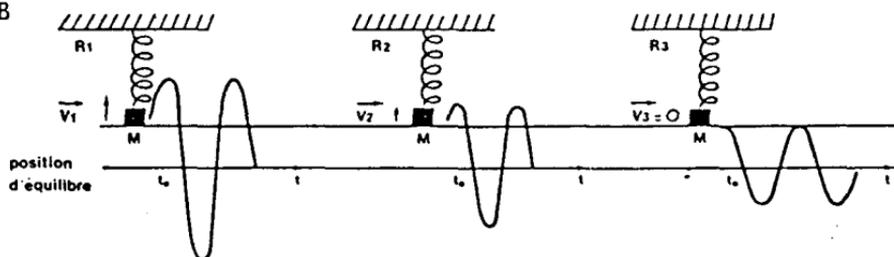
— Adhérence entre les notions de force et de vitesse (plus largement : d'élan, de mouvement, d'énergie, d'impulsion,...) :

«Les forces agissant sur les balles sont différentes puisque les mouvements le sont.»

A



B



— Deux séries de systèmes identiques ne différant entre eux que par leur mouvement.

QUESTION:

Pour chacune des situations présentées ci-dessus...

A balles d'un jongleur toutes identiques et à la même altitude à l'instant considéré  $t_0$

B masses oscillantes toutes identiques suspendues à des ressorts identiques de même longueur à l'instant considéré  $t_0$

...dites si les forces agissant sur les différents mobiles en jeu à l'instant  $t_0$

(balles en A, masses oscillantes en B) sont toutes égales entre elles ou non (on néglige la résistance de l'air). Justifiez votre réponse.

**Encadré 1 : Deux questions pour la même difficulté.**

*«Force nulle puisque vitesse nulle»*

— Flou dans la localisation temporelle des grandeurs :

*«En haut de la trajectoire, il y a la pesanteur et la force du geste du lanceur (qui agissent sur la balle)»*

— Indifférenciation entre force, énergie, élan, impulsion... (le plus souvent verbale, cette indifférenciation peut aller jusqu'à l'écriture de relations inhomogènes pour des questions voisines de celles-ci mais suggérant davantage l'idée de bilan (2))

— Attribution de la force à l'objet :

*«La force de la masse vers le haut»*

*«La masse a de la force vers le haut, sans ça comment tiendrait-elle en l'air en haut de la trajectoire ?»*

— Idée de capitalisation : la cause du mouvement, stockée dans l'objet sous forme d'un capital dynamique indifférencié (voir ci-dessus), joue le rôle d'une provision susceptible de s'épuiser.

L'ensemble de ces caractères définit une typologie de réponses. Ceux-ci n'apparaissent pas nécessairement explicitement tous ensemble, mais ils sont souvent associés au moins deux à deux. Cela autorise une présomption : une adhérence manifeste entre force et vitesse (voir l'une quelconque des réponses déjà citées) pourrait bien comporter, de manière sous jacente, une vision des choses comportant certains autres des caractères énumérés plus haut.

Cette vision des choses se manifeste de façon massive (pour les résultats chiffrés voir [2] ou [3]) chez des populations de fin d'enseignement secondaire ou de début d'enseignement supérieur, de culture, nationalité, et style d'enseignement reçu très différents (France, Grande-Bretagne, Belgique, Italie, Brésil,...), ainsi que dans les ouvrages de vulgarisation... Mais il est au moins un paramètre déterminant dans sa fréquence d'apparition : le type de question.

## 1.2. Une typologie de questions

On aura noté ce qui, par delà la différence de contexte, réunit les deux questionnaires résumés en encadré 1 :

— Accessibilité de la situation présentée à l'imagination. On peut se représenter, au sens habituel du terme, les mouvements, les dispositifs. La question n'est pas présentée sous forme purement analytique.

(2) Ainsi chez des étudiants préparant le concours de P.C.E.M., et interrogés sur la condition de décollage d'une masse simplement posée sur un ressort après compression de l'ensemble, enregistre-t-on un pourcentage important (19% sur 63 réponses exprimées) de réponses inhomogènes du type :  $\frac{1}{2} k(1-l_0)^2 > mg$ .

Situation	Données cinématiques	Résultante correcte	Schemas intuitifs
P <sub>1</sub>			
P <sub>2</sub>			
P <sub>3</sub>			
P <sub>4</sub>			

Encadré 2 : Variations sur un pendule.

N = 60	"F-V"	Forces réelles dessinées	Tension retournée	Force centrifuge
P <sub>1</sub>	12%	78%	0%	0%
P <sub>3</sub>	26%	70%	0%	10%
P <sub>2</sub>	28%	58%	0%	2%
P <sub>4</sub>	37%	25%	12%	18%

Encadré 2 bis : Forces inventées et forces réelles dans les réponses estudiantines.

— les mouvements présentés semblent incompatibles avec les forces au sens où ils ne sont pas de même direction et sens et ils ne s'annulent pas en même temps que ces dernières.

L'absence d'un de ces aspects fait considérablement chuter les pourcentages d'erreurs. On observe en particulier, sur une gamme donnée de situations (voir encadrés 2 et 2 bis), que plus les forces d'interaction effectives sont acceptées et donc volontiers mentionnées par les étudiants, plus rares sont les réponses du type précédent, qui «inventent» des forces calquées sur la vitesse (voir colonne «F.V» en encadré 2 bis) : tout se passe comme si celles-ci répondaient à une sorte d'invraisemblance de l'action des forces réelles.

### 1.3. Des raisonnements non classables par concept de la physique

Il n'est donc pas possible de dire : «pour les étudiants, la notion de force, c'est ceci ou cela», ni même : «la loi fondamentale de la dynamique est remplacée, dans le raisonnement naturel, par une relation linéaire entre force et vitesse». Ce dernier énoncé est à la fois réducteur - on n'y voit pas l'attribution d'un capital dynamique à l'objet - et faux, pour toutes les situations - telle une chute libre vers le bas - où les étudiants voient très bien qu'une force constante - telle le poids, vers le bas lui aussi - peut produire une accélération.

### 1.4. Des rapprochements avec l'histoire des sciences

Une centration exclusive sur l'expression formelle d'une relation entre force et vitesse pour rendre compte des idées estudiantines a eu pour conséquence, chez beaucoup d'auteurs [4], de conduire à un rapprochement hâtif avec celles d'Aristote. Sans s'attarder ici, (pour plus de détail, voir [3]), il faut, malgré tout, bien signaler que ce rapprochement là est inapproprié, en particulier pour les raisons que l'on vient d'évoquer : pour Aristote, la force n'a jamais résidé dans l'objet lui-même, et nulle situation ne correspond, comme pour nos étudiants, à une analyse quasi newtonnienne.

En revanche, les théories pré-galiléennes de l'impetus introduisent des caractères étonnamment proches de ceux résumés ci dessus [3] : adhérence force-vitesse, certes, mais aussi délocalisation temporelle, attribution de l'«impetus» à l'objet, et même introduction d'une «capacité impetussique».

### 1.5. Des rapprochements transversaux par rapport aux chapitres de la physique

En matière de rapprochements, il semble que les plus fructueux soient ceux que l'on peut établir entre les difficultés observées sur des terrains classiquement considérés comme distincts, voire très différents. Si la

Pendule simple, schéma de forces dans le cas d'un tour complet vertical, position d'altitude maximum.

Schéma observé

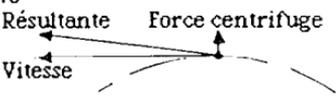
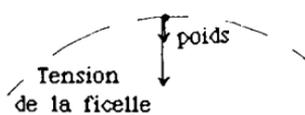
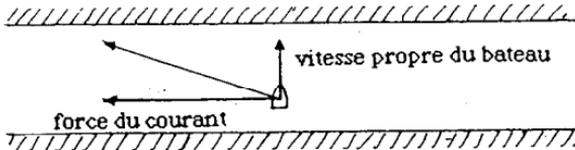


Schéma correct



Changement de référentiel, un bateau traverse une rivière, schéma de composition de vitesses.

Schéma observé :



Dans les deux cas, trait du raisonnement à noter : "composition" d'une "force" et d'une vitesse.

**Encadré 3** (réf. [3] et [5]) : rapprochement entre raisonnements concernant le mouvement d'un objet dans un seul référentiel et un changement de référentiel.

\* (RAPPEL) :

Mouvement d'un projectile (encadré. 1)  
 "Il y a une force dans le direction du mouvement"



\* Propagation d'un signal mécanique sur une corde

- Commentaire courant (et erroné)  
 "Si l'on secoue la main plus fort, la bosse ira plus vite", ou :  
 "La bosse la plus haute ira plus vite, elle a plus de force".



- Traits du raisonnement à noter :  
 Association "force" - vitesse, amalgame fréquent "force" - hauteur.  
 Attribution de la "force" au signal en déplacement.

**Encadré 4** (réf. [6]) : rapprochement entre raisonnements concernant le mouvement d'un projectile et le déplacement d'un signal.

description des tendances naturelles du raisonnement amène à subdiviser un domaine conceptuel, par exemple celui des forces en fonction des types de questions posées, elle conduit aussi à d'autres regroupements. C'est là un point suffisamment important pour qu'on l'illustre ici de plusieurs exemples.

## 2. EXEMPLES DE RAPPROCHEMENTS ENTRE DIFFICULTÉS OBSERVÉES DANS DES DOMAINES DIFFÉRENTS DE LA PHYSIQUE

Commençons par la cinématique des changements de référentiels, où comme son nom l'indique, les forces n'ont rien à faire. L'étude très détaillée d'E. Saltiel [5] auprès d'étudiants en début d'enseignement universitaire a pourtant fait apparaître toute l'importance, dans ce domaine, des raisonnements naturels à très forte composante dynamique. Bornons nous ici à donner un exemple, schématisé dans l'encadré 3 : on ne saurait mieux signifier l'absence de frontière entre les concepts de force et de vitesse qu'en composant les vecteurs qui les représentent. L'idée de vitesse intrinsèque (non transformable par changement de référentiel), attachée à celle de moteur propre de l'objet, est, elle aussi, très ancrée dans une adhérence paralysante entre une vision causale (force, moteur propre, cause stockée ou non dans l'objet) et une problématique de description (vitesse par rapport à tel ou tel référentiel).

Autre exemple (encadré 4) : dans le domaine de la propagation des signaux mécaniques, L. Maurines [6] a relevé chez des élèves de fin d'enseignement secondaire ou de début d'enseignement universitaire, en particulier, une forte tendance à faire un traitement dynamique du signal (une «bosse» sur une corde) analogue à celui d'un objet matériel. Le signal «stockerait» en quelque sorte la cause initiale - la secousse de l'expérimentateur - et irait notamment d'autant plus vite que celle-ci serait violente. Comme pour un objet soumis à des frottements, le capital initial s'épuiserait progressivement. Avoir répété comme tant d'autres que la vitesse de propagation était «une constante pour un milieu donné» n'a nullement suffi à éradiquer un mode de raisonnement étonnamment proche de celui décrit plus haut à propos de projectiles.

Dernier exemple ici : celui de la troisième loi de Newton, dite des actions réciproques. Sans doute n'est-il pas inutile de rappeler en quoi ce domaine d'analyse se distingue de celui de l'analyse des mouvements (tout en étant très utile pour celui-ci). La troisième loi en effet met en jeu **deux** entités physiques A et B («particules», puis aussi bien objets, déformables ou non, autrement dit «systèmes»), établissant pour les forces résultantes mutuelles la fameuse relation :

$$\vec{F}_{A \text{ sur } B} \text{ (à un instant donné)} = - \vec{F}_{B \text{ sur } A} \text{ (au même instant)}$$

assortie d'une précision sur la droite d'action des forces qui importe peu dans cette discussion.

Cette loi, dans le cadre des problèmes usuellement abordés, est totalement in affectée par les mouvements éventuels de A et B. La seule limitation, liée à l'échelle de temps caractéristique de la propagation des interactions comparée à celle de l'analyse des mouvements, est hors du champ de la mécanique classique.

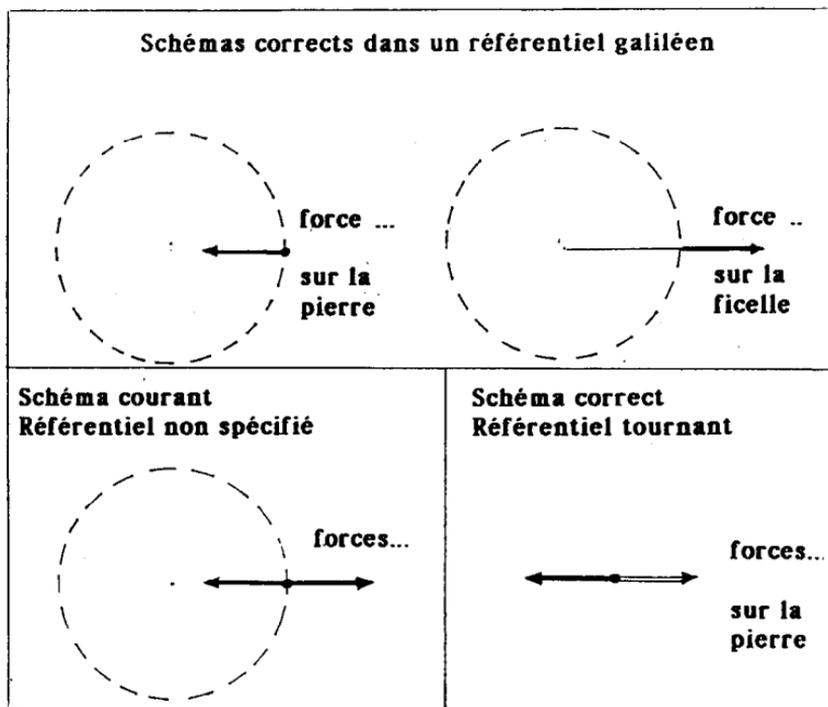
Mise en jeu de deux objets (nous garderons ce terme banal), indifférence au mouvement : voilà ce qui distingue la problématique des interactions de celle qui constitue encore, une fois les hommages nécessaires rendus à la loi de conservation de la quantité de mouvement, la colonne vertébrale de nos programmes de mécanique de fin d'études secondaires et de premier cycle universitaire : la dynamique du point matériel. Là, on ne considère plus qu'un objet et le bilan des forces exercées sur cet objet (puis l'énergie potentielle de cet objet - dans un champ -, l'énergie mécanique totale...). Et bien sûr, la deuxième loi couple totalement force et accélération.

On peut facilement prévoir les difficultés.

La première, si tant est qu'on puisse les découpler, porte sur l'«objet d'application» (3) des forces. On l'a vu, la force exercée **sur** «la masse» devient facilement, dans la dénomination estudiantine, celle **de** la masse. Mais la force exercée par la masse sur autre chose, c'est encore la force **de** la masse. Tout est en place pour une confusion importante sur les objets d'application des forces. Celle-ci contribue à brouiller même les discussions d'enseignants, par exemple sur la force centrifuge et l'intérêt qu'il y a, ou non, à introduire les forces fictives. «Centrifuge» y devient souvent synonyme de «fictive», comme si une force centrifuge parfaitement réelle n'existait pas dans un référentiel parfaitement galiléen : la force exercée par l'objet en mouvement circulaire sur ce qui le contraint à ce mouvement (la ficelle de la fronde, la paroi de l'essoreuse, la portière de la voiture...) (voir l'encadré 5).

(3) On peut très bien, dans un premier niveau d'analyse où l'on ne s'intéresse qu'aux mouvements des centres de masse de A et B, se limiter à la spécification des «objets» d'application des forces. Bien entendu, cela suppose qu'on ne s'intéresse pas encore à la rotation des objets sur eux-mêmes, ni à leur déformation.

Un élément graphique s'ajoute à ces aspects verbaux pour brouiller l'analyse : la pierre qui tourne au bout d'une ficelle est en contact avec cette ficelle, et, dans la schématisation habituelle, surtout si la pierre est quasi «ponctuelle», toutes les forces sont «attachées» au même endroit, le point de contact. Qui peut dire alors si la force centrifuge que l'on y voit souvent est fictive (exercée sur la pierre) ou réelle (exercée sur le fil) ?



**Encadré 5 :** Schémas de forces pour une pierre qui tourne au bout d'une ficelle (en toute rigueur, mobile auto-porteur sur table horizontale). On n'a pas représenté l'ensemble des forces agissant sur la ficelle.

La seconde difficulté tient à une vision anthropomorphique de la dynamique ; les objets «ont» de la force (et indifféremment, de l'énergie, on l'a dit). La loi des actions réciproques devient celle de conflits dynamiques plus ou moins équilibrés, et la relation force-vitesse la traduction de la victoire (le sens de la vitesse) attribuée au plus fort : d'où la tentation de faire le bilan de forces qui ne s'appliquent pas sur les mêmes objets - les forces «des» deux objets. C'est ainsi que l'on dira, à tort, qu'un conducteur qui pousse sa voiture en panne (en l'accéléralant) «la pousse plus fort qu'elle ne le repousse», ou qu'une valise qu'on hisse (en accéléralant) dans le filet d'un compartiment de train exerce sur la main une force («son poids», ce qui est faux) inférieure en module à celle qui est exercée sur elle-même par le voyageur, ou enfin que lorsqu'un clou s'enfonce, c'est que la réaction de la planche n'équilibre plus l'action du clou. Ces difficultés, ainsi qu'une revue partielle de livres sur ce point, ont été davantage détaillées dans un article précédent [7]. Elles nous ont servi ici d'abord à illustrer ce réseau de liens qui, par delà nos sous-chapitres, rassemble et «solidifie» les raisonnements erronés et les ambiguïtés, dont on aura compris qu'elles n'étaient pas simples négligences d'expression. Ce thème de la distinction entre deuxième et troisième loi de Newton sera repris plus loin pour montrer la façon dont des propositions pour l'enseignement s'articulent sur la recherche.

### 3. IMPLICATIONS POUR L'ENSEIGNEMENT

La question de ce qu'il est possible de faire maintenant pour «améliorer les choses» peut s'envisager à différents niveaux :

#### 3.1. Des questions pour repenser ce que l'on a appris

Le premier qui s'est présenté, tout naturellement, dans le cadre des enquêtes citées plus haut [2, 3, 5, 6], est celui de la sensibilisation et de la motivation des enseignants et des élèves sur certains thèmes. Les questions élaborées à fins d'enquête, en effet, ont été mises au point par approximations successives pour atteindre un caractère démonstratif aussi élevé que possible. Focalisées sur un point précis, qualitatives afin que les difficultés du traitement mathématique ne fassent pas écran à celle que l'on vise, se prêtant à un «corrigé» percutant par sa simplicité et l'appel incontournable à des lois fondamentales, ces questions ont toujours suscité chez nos partenaires volontaires (enseignants et élèves) ou involontaires (élèves, parfois) des réactions intéressées, voire passionnées. D'où l'idée d'en faire aussi des outils de travail. Des fascicules [8, 9] rassemblent ainsi, en particulier sur des thèmes de cinématique, de dynamique et de propagation, des questionnaires de travail regroupés autour d'une difficulté préalablement décrite, accompagnés d'une «réponse attendue», d'exemples

de réponses typiques d'élèves ou d'étudiants, et de suggestions pour le travail de discussion qui pourrait avec profit suivre la passation de tels questionnaires en classe. Par exemple, sur le thème «force-vitesse» pour dire vite, on a exploité les questions de l'encadré 1 assorties d'autres de la même famille, dont celle présentée dans l'encadré 2. Sous forme de fascicule ou non, ces questions ont beaucoup servi à diffuser les résultats évoqués plus haut : facilement transmissibles, plus vite lues qu'un article de recherche, elles permettent à l'enseignant et à l'élève de faire une bonne partie du constat eux-mêmes pour en exploiter aussitôt l'aspect motivant. Plus ou moins reprises, ou transposées dans des ouvrages d'enseignement ou des polycopiés, elles y introduisent un certain type de réflexion.

Cela dit, une telle perspective peut apparaître comme encore bien «en retrait» vis-à-vis de l'enseignement. En caricaturant : enseignons toujours de la même façon, prenons conscience et corrigeons les effets négatifs d'un enseignement qui néglige d'affronter explicitement les tendances de l'intuition. Caricature ou non, cette solution est à considérer sérieusement : après tout, l'important est d'aborder la physique par ses diverses entrées - formalisme et intuition, dogmatisme et inductivisme, etc... - et de travailler à leur conciliation. Et il faut prendre garde que le caractère déstabilisant de certains questionnaires puisse trouver, en contrepoids, une réponse formelle assez établie et assez incontournable pour que l'élève ne se retrouve pas globalement frustré (4).

### 3.2. Des propositions «à la source» : exemple des schémas éclatés

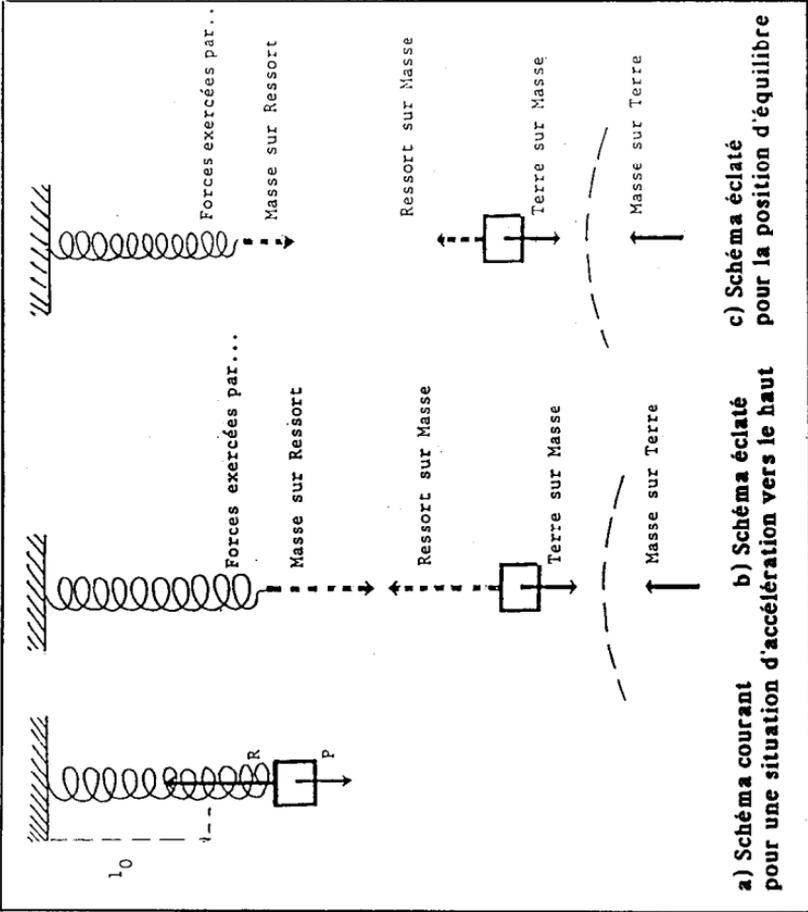
Un second niveau est celui des modifications envisageables dans la manière d'introduire les modèles, concepts et lois physiques, dans les accents mis au départ sur tel ou tel aspect, dans les techniques de représentation ou plus largement de résolution de problèmes (5).

C'est un exemple déjà introduit plus haut qui illustrera ce dernier point. On verra qu'une telle démarche contribue à poser la question d'une organisation du cours de mécanique assez différente de celle qui préside actuellement à la fin de l'enseignement secondaire.

Revenons donc au problème de conciliation entre une analyse d'interactions et l'établissement d'un bilan de forces. La proposition est

(4) Telle est la question qui se pose actuellement, par exemple, à l'issue des travaux de A. Benseghir sur l'articulation électrostatique-électrocinétique [10] : voir l'article de J.L. Closset.

(5) Sur ce dernier thème, on pourra consulter les travaux de S. Fauconnet [11], qui montrent au passage toute l'interdépendance, chez les élèves, des procédures de résolution de problème et de compréhension du contenu physique, ainsi que ceux de M. Caillot et A. Carré [12].



Encadré 6 : Schémas pour une masse pendue à un ressort.

la suivante : dissiper la «complicité» des schémas habituels et des raisonnements spontanés en éclatant les schémas de façon à représenter les objets séparés, même si, dans la réalité, ceux-ci sont en contact. L'encadré 6 met en parallèle les deux types de schémas pour un objet de masse  $M$ , pendu au bout d'un ressort et en accélération vers le haut. Le premier schéma (a) autorise parfaitement les amalgames déjà dénoncés :

«Poids de  $M$ »  $\Leftrightarrow$  «Force de  $M$ »  $\Leftrightarrow$  «Force de (exercée par)  $M$  sur le ressort»  $\Leftrightarrow$  «Action de  $M$ ».

puis :

«Poids de  $M$  < Force du ressort sur  $M$ »

«donc»

«Action... < Réaction»

et, pour conclure, ce commentaire nullement exceptionnel :

«La loi des actions réciproques ne s'applique plus».

Le schéma (b) présente les caractéristiques contraignantes suivantes :

— Plus de point de contact où les forces puissent aller cacher leur indécision : il faut choisir l'objet d'application (par exemple, le poids « $va$ » sur la masse et non sur le ressort). On note au passage que, de ce point de vue, il est plus simple d'introduire la troisième loi à propos des interactions à **distance**, puisqu'alors l'éclatement du schéma est déjà naturellement réalisé.

— Chaque interaction est figurée par des flèches de «couleur» (ou codage) donnée, une par interaction. La contrainte doit être sans appel : les flèches de même couleur doivent avoir même longueur... et surtout, il faut **deux** flèches par couleur. Cela oblige à apparier convenablement le poids avec une force appliquée à la terre (globalement, et non pas «le sol»). Ce poids, comme d'ailleurs la force d'Archimède, est une force traditionnellement veuve sur nos schémas classiques. Il va, de ce fait, chercher des partenaires n'importe où, sous prétexte qu'en situation statique, toutes les forces ont même intensité. Voilà pourquoi on parle de la «réaction du support au poids de la masse». Le schéma (c) montre ce qu'il en est fait : en situation statique, deux interactions (deux couleurs, sinon deux longueurs de flèches) sont encore bien en présence ; l'interaction gravitationnelle objet-terre et l'interaction de contact objet-ressort.

L'égalité de leurs intensités n'amène pas à les confondre : le ressort ne «réagit» pas au poids. La compréhension de la situation dynamique est à ce prix (6). Quant à la situation statique, qui autorise sans problème manifeste les confusions que l'on vient de dénoncer, on peut vraiment se demander de quel apprentissage elle est l'occasion (quelques refrains ?), si l'on ne s'est pas imposé un minimum de détour par le cas non statique (plus précisément : avec accélération).

— Enfin, pour décider ce qu'il advient d'un objet (ou système) donné, ou pour exploiter ce que l'on sait de son mouvement, on entoure cet objet (ou système) d'une «bulle» qui englobe toutes les forces qui s'exercent sur lui (toutes de couleurs différentes). On ne pourra pas faire un bilan pour tous les objets en cause tout en figurant toutes les interactions complètement (avec deux forces pour chacune) sans que la chaîne des interactions ne finisse par se boucler sur elle-même. Mais il n'est, en général, pas nécessaire d'effectuer ce bouclage : les objets en fin de chaîne restent alors incomplètement analysés du point de vue des forces qui s'exercent sur eux, ce qui est sans conséquence si l'on a pris ses marges. D'autre part, il sera en général sage de négliger certaines interactions vis-à-vis d'autres de beaucoup plus grande intensité.

Ces caractères des schémas éclatés (plus de point de contact, une couleur et deux forces par interaction, une bulle par objet ou système intéressant) de prime abord un peu élémentaires, sont en fait essentiels pour analyser sûrement la moindre situation de vie courante. Le lecteur est convié à en faire l'expérience sur les situations que nous proposons en annexe. Il pourra en particulier expérimenter, sur lui-même ou sur d'autres, que la contrainte verbale consistant à bien spécifier «force exercée par ... sur ...» dans chaque cas est utile, mais tout à fait insuffisante dans la pratique. L'étude de J. Ménigaux [11], l'expérimentation de cette technique par l'auteur lors d'une dizaine de stages de formation de professeurs des collèges ou de L.E.P., permettent d'affirmer qu'il est courant, chez les débutants en mécanique, de faire figurer sur l'objet A une force désignée par «force de A sur B».

(6) Remarquons que, dans la logique de ce qui vient d'être dit, les situations qui semblent les plus banales et sont présentées souvent comme les plus simples sont en fait les plus «opaques» : situations statiques avec contact, d'objet reposant sur un support - et que les seules forces dont on parle encore au collège sont les plus «veuves» : le poids et la force d'Archimède.

Remarquons aussi combien l'idée de transmission des forces est à resituer : cette idée renvoie à l'égalité, dans certaines conditions (statique, ou bien accélération avec masse des transmetteurs négligeable devant celles des autres mobiles), des intensités de certaines interactions, mais non à leur indistinction.

Voici donc une proposition de technique d'analyse, très articulée sur des résultats de recherche, éprouvée en formation des maîtres (en L.E.P. et Collège) et considérée comme positive pour eux-mêmes par la quasi totalité des stagiaires (environ 150 au total) (7).

Il n'est pas neutre que cette technique ait pu être mise à l'épreuve dans le cadre d'un enseignement de formation des maîtres et non, par exemple en fin de secondaire ou début de premier cycle universitaire. C'est qu'elle développe, précisément, une compréhension des phénomènes dont on peut penser se passer sans trop de dommages (scolaires) à ces niveaux où l'on se centre beaucoup sur la mécanique du point (ou du centre d'inertie d'un solide) et sur son traitement analytique. Le traitement analytique : voilà bien le point accentué actuellement, mais dont la seule maîtrise, à supposer qu'elle soit atteinte en grande partie, ne suffit pas pour l'accès à certaines idées essentielles et simples, et dont l'échec ne laisse à peu près **rien** sur place. Remarquons aussi que cette technique, aussi modeste soit-elle quand à l'arsenal mathématique utilisé, n'en introduit pas moins une authentique exigence formelle : il suffit de voir les premières difficultés de ses nouveaux adeptes soudain privés de toute possibilité d'ambiguïté.

Cette liberté d'aller à l'essentiel avec les moyens que l'on veut que donnent, de façon générale, les enseignements de type stages, recyclages... a permis (au moins à l'auteur) d'envisager et d'expérimenter (sans évaluation formelle) un enseignement de mécanique différent d'un cursus classique par les «accents» qui y sont mis (8), tout particulièrement, après l'énoncé des deuxième et troisième lois :

— Analyse des interactions en tout premier lieu avec, pour toute dynamique celle-ci : pour tout objet (ou système), il y a une accélération globale colinéaire à, et de même sens que, la force résultante exercée sur cet objet. La statique est donc introduite d'emblée en référence au cas non statique. On l'a dit plus haut : telle est la condition pour qu'elle n'apporte pas plus de confusions que d'éclaircissements. À ce niveau où, ni la rotation, ni la déformation de l'objet ne sont considérées, il suffit que la force soit appliquée au bon objet (ou système), peu importe le «point» d'application. Ceci est une occasion d'introduire une réflexion sur la démarche de modélisation et son principe d'économie : ne pas introduire

(7) La quasi suppression de la mécanique des forces des programmes des collèges a laissé peu de place pour des essais auprès des élèves. L'un de ces essais pourtant a amené l'enseignant expérimentateur à ce jugement : «les élèves moyens et bons comprennent enfin et à fond ; les faibles sont encore plus perdus, car le flou n'est plus permis».

(8) Un polycopié résumant une grande partie du cours et des activités proposées est disponible ([12], diffusé par l'I.R.E.M. et le L.D.P.E.S. Université Paris 7).

d'élément nouveau dans la représentation tant que cela n'est pas utile, et lorsqu'on le fait, préciser en quoi cela intervient.

— Rupture de l'adhérence force-vitesse, avec un travail de distinction entre vitesse (moyenne) et variation de vitesse (moyenne) sur des schémas de type stroboscopique.

— Travail sur la validité «instantanée» des deux lois, qui concernent des grandeurs physiques prises au même instant.

La cinématique, le retour sur la notion de particule et de système (et de centre de masse), et tant d'autres choses (l'énergie...) viennent ensuite. Le lieu n'est pas ici d'en faire le détail, mais d'illustrer qu'aux détours des analyses, des bonnes questions et de certaines propositions qui semblent s'articuler logiquement sur des résultats d'observation, c'est rapidement un problème de fond qui se présente : que voulons-nous que nos étudiants comprennent ?

#### 4. CONCLUSION

Les recherches rapidement évoquées dans ce qui précède illustrent un parcours qui n'est pas propre à ce domaine ; une problématique du constat -il s'agissait initialement de faire le point - jointe au désir de fournir des résultats maniables et donc organisés, conduit à des propositions dont certaines apparaissent comme de simple correction physique (ainsi éviter d'écrire dans un livre que «l'action ne peut plus équilibrer la réaction», [7]), mais dont d'autres, par les exigences de cohérence qu'elles comportent et aussi par le temps d'apprentissage qu'elles impliquent, amènent en fait à déplacer assez notablement les accents mis par l'enseignement sur le domaine considéré. Moins que jamais, il n'est possible de penser qu'un contenu donné, ainsi les deuxième et troisième loi de Newton, dicte quasi univoquement le type de savoir à transmettre. Choisir de développer une compréhension en profondeur sur tel ou tel point reste hors de la responsabilité propre de la didactique. A elle néanmoins de montrer, comme on a tenté de le faire ici sur un domaine limité, les conséquences du choix consistant à ignorer certaines difficultés, et les voies qui s'ouvrent si l'on décide d'en faire des terrains d'apprentissage explicites, dans une certaine cohérence entre les moyens utilisés et les buts visés.

**6. RÉFÉRENCES**

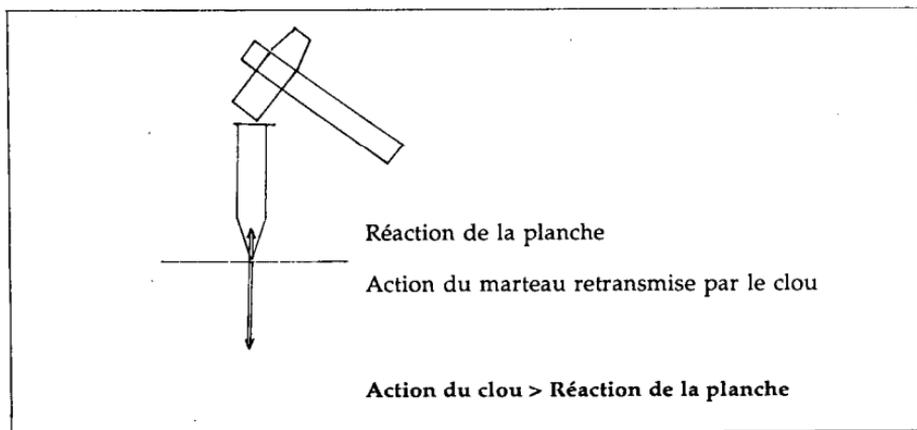
- [1] MAC DERMOTT L. 1984, Critical review of research in the domain of mechanics, in : Recherche en didactique de la physique : les actes du premier atelier international, La Londe 1983, éd. du C.N.R.S., pp. 137-182.
- [2] VIENNOT L. 1976, Intuition et formalisme en dynamique élémentaire, B.U.P. n° 587, pp. 49-84.
- [3] VIENNOT L. 1979, Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire, éd. Hermann, Paris.
- [4] WHITAKER R.J. 1983, Aristotle is not dead : student understanding of trajectory motion, American J. of Physics, 51, 4, pp. 352-357.
- [5] SALTIEL E., MALGRANGE J.L. 1979, Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire, B.U.P. n° 616, pp. 1325-1354.
- [6] MAURINES L., SALTIEL E. 1988, Mécanique spontanée du signal, B.U.P. n 707, pp. 1023-1041.
- [7] VIENNOT L. 1982, L'Action et la Réaction sont-elles bien (égales et) opposées ?, B.U.P. n° 640, pp. 479-488.
- [8] SALTIEL E., VIENNOT L. 1983, Questionnaires pour comprendre (mécanique, grandeurs alébriques), diffusion I.R.E.M. - L.D.P.E.S., Université Paris 7.
- [9] MAURINES L., SALTIEL E., Questionnaires de travail sur la propagation d'un signal L.D.P.E.S., Université Paris 7.
- [10] BENSEGHIR A. 1989, Transition électrostatique - électrocinétique : point de vue historique et analyse des difficultés des élèves, Thèse (nouveau régime), Université Paris.
- [11] MENIGAUX J. 1986, La schématisation des interactions en classe de troisième, B.U.P. n° 683, pp. 761-778.
- [12] VIENNOT L. 1986, Mécanique et énergie pour débutants, Diffusion I.R.E.M. et L.D.P.E.S., Université Paris 7.

## ANNEXE

## QUELQUES SITUATIONS ANALYSEES DU POINT DE VUE DES INTERACTIONS

## I Un clou s'enfonce

Schéma et commentaires couramment observés:

Analyse correcte

Interactions considérées:	Marteau-Clou (contact) Clou-Planche (contact)	Intensité a b	Codage → ⇒
Interactions concernant le clou négligées devant les précédentes:	Clou-Terre (gravitation) Air-Clou (poussée d'Archimède de l'air)		
Interaction non considérées	Autres interactions concernant le marteau et le sol		

Bilan concernant le clou  
lorsqu'il accélère:  $a > b$   
**La troisième loi s'applique toujours**

**II Force d'Archimède: une interaction?**

On considère la situation schématisée ci-contre.  
 Comparer l'indication du pèse-lettre à celle qu'on obtient en enlevant la boule de l'eau.

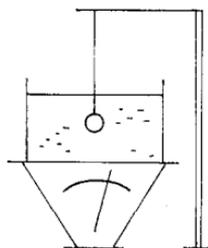


Schéma et commentaires couramment observés

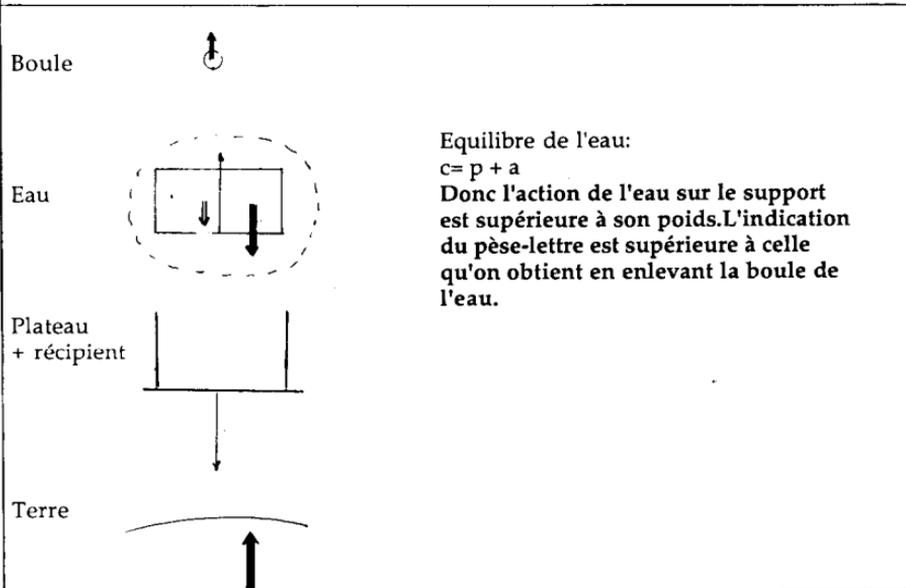
Perplexité

Action de l'eau sur le support: son poids

Pas de réciproque pour la force d'Archimède

Analyse correcte:

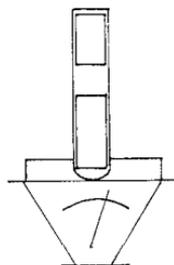
		Intensité	Codage
Interactions considérées:	Eau-Boule (Archimède)	a	⇨
	Eau-Terre (gravitation)	p	→
	Eau-Support (plateau+récipient) (contact)	c	→
Interactions concernant l'eau négligées devant les précédentes:	Ensemble (Eau-Récipient)-Air (Poussée d'Archimède de l'air)		
Interactions non considérées:	Autres interactions concernant la boule, le support, le pèse-lettre, le sol, la terre		



### III "Lévitation"...allègement?

Deux aimants se repoussent dans la situation schématisée ci-contre.

L'ensemble bouchon-tube à essai-aimants "pèse-t-il moins lourd" (au sens de l'indication du pèse lettre) que lorsque les aimants sont posés directement sur le plateau?

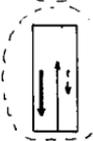
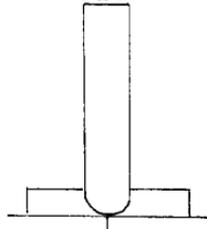
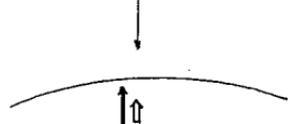


#### Schéma et commentaires couramment observés

Perplexité

"Le poids de l'aimant du haut se transmet-il?"

#### Analyse correcte

		Intensité	Codage
Interactions considérées:	Aimant A- Aimant B (répulsion)	r	-->
	Aimant B-Support (Plateau-bouchon-tube) (contact)	c	—>
	Aimant A-Terre (poids)	a	==>
	Aimant B-Terre (poids)	b	==>
Interaction concernant l'aimant B négligées devant les précédentes:	Poussée d'Archimède due à l'air		
Interactions non considérées:	Autres interactions concernant le reste du pèse lettre, le sol, la terre		
Aimant A		Equilibre de A: $a = r$	
Aimant B		Equilibre de B: $a + b = c$	
Support		Donc l'action de B sur le support a une intensité égale à la somme des poids des deux aimants: <b>pour le pèse-lettre, les deux situations proposées sont équivalentes</b>	
Terre			

**7.4. On pourra s'interroger de cette manière sur les questions suivantes :**

— Indications d'un pèse-personne lorsqu'on y monte muni d'un manche à balai et qu'on en appuie l'extrémité sur divers endroits : pèse personne, plafond, sol [12].

— Un flan retourné et qui ne tombe pas hors du moule : l'interaction flan-fond du moule est-elle attractive ou répulsive ? [12]

— On accroche une masse à un ressort qui pend au plafond, avec sa longueur à vide  $l_0$ . Au moment où on lâche la masse, (longueur du ressort :  $l$ ), quelle est l'intensité de l'interaction masse-ressort ? [12]

— Deux équipes tirent chacune une extrémité d'une corde et l'ensemble accélère (une équipe gagne) : les forces exercées par chaque équipe sur la corde sont-elles différentes ? Situer la réponse vis-à-vis de l'idée de «transmission des forces» par les fils et autres objets de «faible» masse [7, 12].