

Une exploration des difficultés des étudiants en cinématique et mécanique du point matériel

par D. BAHIER, M. COUCHOURON, P.-Y. GAL, M.-P. GORZA
I.F.R.E.D., Université Paris-Nord
Avenue J.-B. Clément, 93430 Villetaneuse
A. TEXIER
C.N.D.P., 29, rue d'Ulm, 75005 Paris
et C. BARDIN
École Normale de Seine Saint-Denis
45, avenue J. Zay, 93190 Livry-Gargan

RÉSUMÉ

Ce travail s'appuie sur des questionnaires à choix multiples posés à diverses reprises à des étudiants de premier cycle universitaire, suivis ou non d'entretiens avec eux, visant à révéler quelques écueils typiques sur lesquels ils butent.

Pour remédier aux incompréhensions rencontrées, dans une section de remise à niveau, une action pédagogique a été entreprise, fondée sur l'utilisation de la simulation sur ordinateur de mouvements de mobiles ponctuels.

Les premières conclusions de ce début d'expérimentation sont présentées et quelques questions restent posées.

1. BUT GÉNÉRAL DE L'ENTREPRISE

Dans ce travail exploratoire, mené en Octobre 1986, Juin et Octobre 1987, nous avons cherché à mettre en évidence quelques erreurs et confusions caractéristiques souvent commises par les étudiants de première année du D.E.U.G. S.S.M.

Cette première mise en évidence devrait nous conduire à d'autres enquêtes mieux circonscrites et plus détaillées, en vue de remonter aux sources des erreurs les plus habituelles dans l'esprit des étudiants et de nous aider à suggérer quelques remèdes pour améliorer l'efficacité de notre enseignement de la Physique. Sur ce dernier point, une tentative a déjà été faite en complément de l'enseignement habituel, auprès des étudiants de la section de Remise à Niveau en 1987.

Dans le champ de la Cinématique et de la Dynamique du point matériel, qui constituent actuellement le programme de Physique du premier trimestre de D.E.U.G. I (Tronc Commun), nous avons en vue dès le départ un certain nombre d'écueils typiques sur lesquels butent les étudiants et que signale l'expérience de tout enseignant de première année [1] :

- un manque d'autonomie de réflexion dans des situations nouvelles pour eux,
- une attention insuffisante portée à la terminologie (nécessité de termes scientifiques précis au lieu des mots de tous les jours),
- un défaut de rigueur logique (confusion entre le possible et le nécessaire),
- un conflit non dominé entre le raisonnement scientifique et l'intuition tirée du vécu.

A titre d'illustration des écueils précédents, citons :

- la facile confusion entre un vecteur et sa norme,
- la confusion entre un mouvement et sa trajectoire,
- une mauvaise maîtrise de la notion de dérivée,
- la difficulté d'admettre le Principe de Relativité galiléenne.

2. MODALITÉS DES EXPÉRIENCES

1 - A la fin d'Octobre 1986, à l'issue du cours de Cinématique du point matériel, mais avant le début du cours de Dynamique, le questionnaire n° 1 à choix multiples (ci-annexé) a été posé individuellement et par écrit, en 30 minutes, à l'ensemble des étudiants de première année du C.S.P. présents aux cours de Physique des 30 et 31 Octobre (302 étudiants).

2 - En section de Remise à Niveau [2], en plus de l'enseignement classique par cours, travaux dirigés et pratiques, les étudiants en difficulté ont bénéficié d'une nouvelle présentation de la Cinématique et de la Dynamique du point utilisant la visualisation de trajectoires élaborées à partir de calculs effectués pas à pas sur micro-ordinateurs (et non par résolution d'équations différentielles).

3 - A la suite de cet enseignement, le questionnaire n° 1 a été posé à nouveau à 23 étudiants de Remise à Niveau au mois de Mai 1987. Les réponses ont été comparées à celles fournies par les mêmes étudiants en Octobre 1986.

4 - Le questionnaire n° 2, élaboré par réajustement du questionnaire n° 1 à la lumière des réponses obtenues, a été posé le 13 Octobre 1987 à 9 étudiants volontaires issus de deux groupes de travaux dirigés. A ce moment de l'année, les changements de référentiel n'avaient pas été abordés au cours de Cinématique.

A la suite de leurs réponses écrites, les étudiants interrogés se sont prêtés avec nous à une analyse détaillée des réflexions qui les ont conduits à leurs réponses.

3. BILAN DE L'EXPÉRIENCE 1

Les résultats du questionnaire n° 1, posé à la fin d'Octobre 1986 à 302 étudiants de première année (nombre et pourcentage d'étudiants pour chacune des réponses choisies), sont indiqués sur le questionnaire lui-même.

On constate les traits généraux suivants :

a) Questions I à IV et XIV. Ces questions relient la trajectoire d'un point à des caractéristiques simples de sa vitesse ou de son accélération. Lorsque ces caractéristiques sont données (I à IV), la question est bien assimilée par la majorité des étudiants puisque de 76 % à 95 % d'entre eux répondent correctement sur la trajectoire. Par contre, lorsque celle-ci est donnée (XIV), on observe 72 % d'erreurs, attestant d'une généralisation abusive de l'exemple connu de la chute des corps : «vecteur accélération constant» équivaut à «trajectoire parabolique».

b) Questions V, VI et VII. Il s'agit chaque fois de la dérivation d'une fonction vectorielle d'une variable scalaire. Cette notion est fort mal dominée car 56 % des étudiants pensent : «dérivée de la norme d'un vecteur = norme de sa dérivée» (V) ; 64 % croient qu'une fonction nulle à l'instant t a sa dérivée nulle au même instant (VI) ; 45 % jugent que la vitesse d'un projectile s'annule toujours au moment où son altitude est maximum (VII).

c) Questions VIII, IX et X. Elles ont trait à la loi de la Relativité galiléenne et mettent en évidence le conflit entre l'expérience vécue (ou imaginée par l'intuition) et la notion abstraite de référentiel galiléen. La façon de trancher entre les deux peut varier selon la question posée : alors que 49 % des étudiants pensent que leurs clés lâchées alors qu'ils sont sur un tapis roulant à vitesse constante tomberont sur le tapis en arrière de leurs pieds, 78 % choisissent, lorsqu'ils marchent à vitesse constante, de lancer une balle en l'air, vers l'avant, pour pouvoir la rattraper. Cette variation est-elle due à la différence «tapis roulant - marche» ou à la différence «laisser tomber - jeter en l'air» ?

Les réactions sont un peu différentes lorsqu'il s'agit, pour un observateur immobile sur un quai de gare, de regarder la trajectoire d'une bouteille lâchée par un voyageur d'un train en mouvement : 46 % pensent observer un mouvement vers l'arrière du train. En fait, tout se passe pour la plupart des étudiants comme si les trajectoires étaient absolues alors qu'elles dépendent du référentiel d'observation.

d) Question XI. Ici, l'expérience vécue (en fait, vue à la télévision) l'emporte à bon droit (53 % de réponses exactes), alors qu'on peut se demander combien d'étudiants sauraient justifier rigoureusement leur réponses (23 % se sont laissé tenter par l'invocation de la force centrifuge).

e) Questions XII et XIII. La première, purement formelle (nature scalaire ou vectorielle de certaines grandeurs), nous paraît de peu d'intérêt et les 67 % de réponses correctes semblent attester d'un simple psittacisme.

Quant à la seconde, qui s'attaquait à la notion de conditions initiales, elle nous a paru après coup un peu difficile sous cette forme. 46 % des interrogés semblent penser que c'est la force de lancement d'une balle qui détermine seule son mouvement.

f) Question XV. Il s'agit en fait de plusieurs questions touchant à la distinction entre masse et poids. Il faut remarquer qu'on obtient presque toujours moins de 12 % d'erreurs. Un seul cas a posé problème : c'est celui d'un mouvement horizontal sans frottement (44 % d'erreurs), vraisemblablement à cause d'une méconnaissance des forces de réaction.

g) Question XVI. A diverses questions de Dynamique posées à propos d'une masse pesante en mouvement accrochée à un ressort, les étudiants ont répondu avec un bonheur variable. Le trait le plus saillant, alors que tous connaissent à coup sûr le Principe Fondamental de la Dynamique, est que, pour une même masse, 54 % d'entre eux trouvent que deux accélérations différentes correspondent à deux forces totales égales ou l'inverse !

4. COMPTE-RENDU DE L'ACTION MENÉE EN REMISE A NIVEAU

L'expérience pédagogique menée spécifiquement avec les étudiants de Remise à Niveau a consisté en l'utilisation de microordinateurs (APPLE II) pour la recherche graphique de solutions à des exercices classiques de D.E.U.G. S.S.M. 1^{ère} année [3].

Le langage utilisé, LOGO, langage structuré, présente une souplesse bien supérieure à celle du BASIC car il permet de définir des sous-ensembles fonctionnels correspondant aux différentes étapes de l'analyse du problème physique proposé. L'aisance de son utilisation graphique le rend même plus adapté que le PASCAL à l'usage qui en est fait ici.

La connaissance minimale de ce langage nécessaire à l'utilisation recherchée s'obtient en moins de dix heures de pratique. Les étudiants progressent ensuite de façon autonome, à leur rythme propre, aussi bien dans la maîtrise du langage que dans la compréhension et la modélisation des phénomènes étudiés.

Partant de la connaissance de la loi définissant l'accélération subie par un mobile ponctuel et des conditions initiales de son mouvement, l'étudiant écrit les procédures permettant de calculer, à l'aide des quatre opérations simples, l'accélération puis la vitesse et enfin la position de ce mobile.

Afin de familiariser les étudiants avec la technique utilisée, nous avons commencé par l'étude des mouvements très simples à une dimension (rectiligne uniforme et uniformément accéléré), puis à deux dimensions, avec simulation des mouvements sous l'effet de la pesanteur (en prenant $g = \text{cste}$). Les étudiants peuvent ainsi voir les modifications de trajectoires dues aux conditions initiales (angle et vitesse de lancement d'un projectile par exemple), en changeant de façon extrêmement simple les paramètres de départ.

Nous leur avons ensuite proposé la simulation de mouvements à une dimension sous l'action d'une force du type frottement visqueux ($a = -kv$). Les étudiants connaissaient a priori la solution de l'équation du mouvement. Confondant cette solution avec l'équation de la trajectoire, certains ont eu la surprise de constater que cette trajectoire était rectiligne quand il n'y avait pas d'autre force en présence.

Quelques étudiants ont eu l'idée de visualiser le problème d'un mouvement à deux dimensions dans le champ de pesanteur ($g = \text{cste}$) en tenant compte d'un frottement visqueux. Ils ont ainsi pu observer la modification de la trajectoire due au frottement, qui tend alors vers une asymptote verticale, ainsi que l'existence d'une vitesse limite de chute, les traces ponctuelles laissées par le mobile sur l'écran devenant équidistantes.

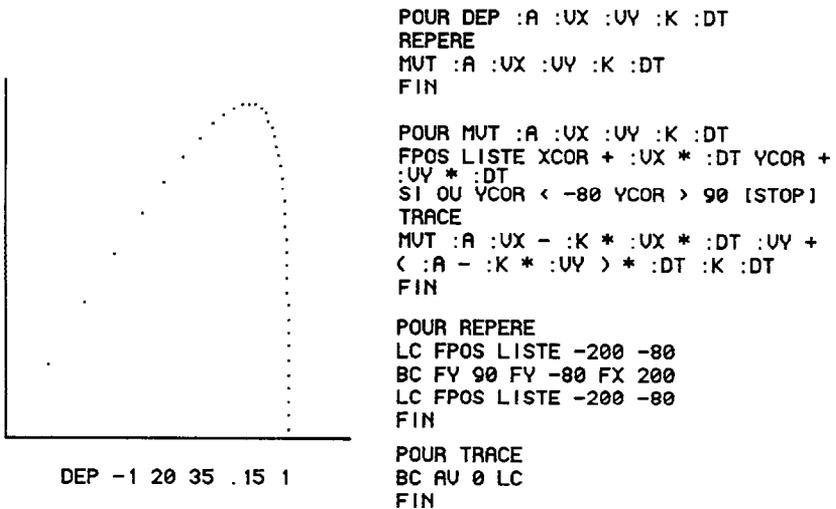
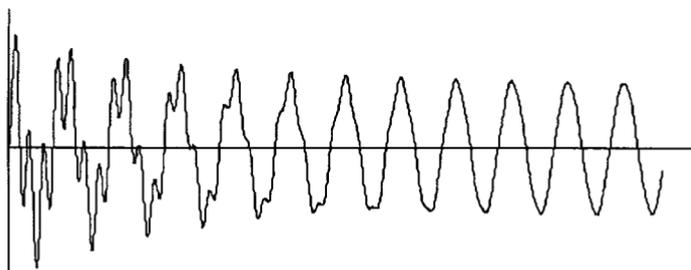


Figure 1 : pesanteur et frottement visqueux.

Les problèmes de composition de vitesses ont également été abordés sous la forme classique du bateau devant traverser une rivière en maintenant son cap constant ou en visant un point fixe sur la rive opposée. La souplesse du langage LOGO nous a permis de traiter, très simplement, différents types de distribution de vitesse du courant de la rivière et d'observer l'effet produit sur la trajectoire par ces différentes distributions.

En employant la même méthode, nous avons proposé l'étude de l'oscillateur harmonique, d'abord en l'absence de tout frottement puis en faisant intervenir des frottements visqueux. Là encore la confusion entre loi de mouvement et trajectoire a créé des surprises pour beaucoup d'étudiants : le mobile ne décrivait pas une sinusoïde (en l'absence de frottement) sur l'écran.

Quelques étudiants ont proposé d'introduire la variable temps sous la forme d'un déplacement à vitesse constante perpendiculairement à la trajectoire afin de visualiser la position en fonction du temps.



DEP 2 .04 20 40 .2

```
POUR DEP :K :F :OMEGA :V0 :DT
FENETRE
LC FX -200 BC
DONNE "U 0 DONNE "VE 0 DONNE "T 0
OSC :U :K :F :OMEGA :V0 :VE :DT
FIN
```

```
POUR EXCIT :OMEGA :V0 :DT
DONNE "VE :V0 * COS ( :OMEGA * :T )
DONNE "T :T + :DT
FIN
```

```
POUR OSC :U :K :F :OMEGA :V0 :VE :DT
EXCIT :OMEGA :V0 :DT
DONNE "Y YCOR + :U * :DT
DONNE "X XCOR + 2 * :DT
FPOS LISTE :X :Y
DONNE "A -1 * ( :K * ( YCOR - :VE ) + :F * :U )
OSC :U + :A * :DT :K :F :OMEGA :V0 :VE :DT
FIN
```

Figure 2 : oscillateur harmonique amorti entretenu.

Pour aborder le problème de l'oscillateur entretenu, il ne restait qu'à ajouter un terme d'accélération sinusoïdale en fonction du temps, de fréquence et d'amplitude constantes. Une nouvelle fois, les étudiants ont été surpris de constater que la variation de la position en fonction du temps n'était pas exactement celle qu'ils attendaient. Ils ont ainsi pu découvrir les régimes transitoires dont l'existence est en principe connue, mais dont l'étude est toujours négligée en D.E.U.G.

Les mouvements dans des champs de forces de type coulombien ont enfin été étudiés. Les étudiants ont ainsi pu visualiser les trajectoires de mobiles dans de tels champs, que ceux-ci soient attractifs (gravitation) ou répulsifs (diffusion d'une particule par un noyau lourd).

La démarche de modélisation utilisée présente quatre caractéristiques essentielles à nos yeux et d'un grand intérêt pour la pédagogie de la Physique :

- l'allègement du formalisme mathématique,
- l'utilisation d'un support visuel,
- l'apprentissage par auto-correction,
- la modification aisée des paramètres utilisés.

En effet :

- le fait de pouvoir se dispenser de la résolution d'équations différentielles en première année de D.E.U.G. permet à l'étudiant de ne pas se noyer dans des calculs qu'il domine souvent mal et de s'intéresser plus facilement à l'aspect physique du problème traité ;
- la visualisation du mouvement renforce l'appréhension du phénomène étudié ;
- le dialogue avec l'ordinateur révèle à l'étudiant ses erreurs : il lève, par exemple, les confusions répandues entre solution de l'équation différentielle du mouvement et trajectoire, entre la variable temps et les variables d'espace ;
- l'étudiant, en modifiant le jeu de paramètres du mouvement prend rapidement conscience de l'influence de chacun d'entre eux et peut répéter cette opération autant de fois qu'il le désire, ce qu'il ne pourrait faire aisément ni dans des calculs complets ni dans des expériences pratiques.

L'expérience menée nous est apparue positive. Nous pensons que cette méthode pédagogique pourrait être utilisée de façon complémentaire à l'enseignement traditionnellement dispensé à l'université, voire au lycée et contribuer à une meilleure efficacité de celui-ci.

5. SONDAGE APRÈS L'INTERVENTION EN REMISE À NIVEAU

Nous avons comparé les réponses du questionnaire n° 1, posé à 23 étudiants de Remise à Niveau, aux réponses obtenues sept mois auparavant par les mêmes étudiants d'une part, par l'ensemble des étudiants d'autre part.

Sur les sujets reliant vitesse, accélération et trajectoire, il y a une amélioration légère aux questions I à IV, déjà bien dominées en Octobre, et nette aux questions VI et VII, mal réussies en Octobre (vitesse ou accélération en un point particulier) : lorsqu'il s'agit de norme, il n'y a pas d'amélioration (questions V et XIV), ce qui semble indiquer des difficultés en calcul vectoriel.

Les questions de changement de référentiel font apparaître un progrès en VIII et IX (chute des clés sur un tapis roulant, balle lancée en marchant), mais pas en X (bouteille lâchée d'un train) : les étudiants comprennent mieux la transformation des vitesses que celle des trajectoires dans les changements de référentiel.

Rien à signaler sur la question XII, très formelle (nature scalaire ou vectorielle de certaines grandeurs).

La Relation Fondamentale de la Dynamique paraît mieux maîtrisée aux questions XI (pièce se détachant d'un satellite), XIII (obtention des conditions initiales d'un lancer) et XV (distinction entre masse et poids), mais guère à la question XVI : le nombre de réponses faisant état de deux accélérations différentes correspondant à deux forces totales identiques ou de l'inverse s'améliore, passant de 13 en Octobre à 11 en Mai, mais le nombre de réponses exactes diminue.

Une forte amélioration sur l'égalité des énergies potentielles à une même altitude, pour cette masse pesante suspendue à un ressort, est sujette à caution : les étudiants ont-ils pensé à ajouter à l'énergie potentielle de pesanteur celle de la force élastique ?

Les exercices sur ordinateur ont principalement porté sur la Cinématique, où l'on observe effectivement une amélioration. Il resterait à savoir si elle est due à cette pratique ou aux autres formes de l'enseignement dispensé en Remise à Niveau, en poursuivant l'expérience grâce à des exercices plus précisément appropriés à la résolution des difficultés avec l'aide de l'ordinateur.

Les étudiants de Remise à Niveau testés en Mai avaient, au mois d'Octobre précédent, donné des réponses en moyenne moins exactes que l'ensemble de leurs camarades. Ils ont rattrapé ces derniers sur l'ensemble des questions à l'exception de XII (grandeurs scalaires ou vectorielles), XIV (dérivée de la norme et norme de la dérivée) et de la dernière question de XV (corps lancé vers le haut sur la Lune). Ils les ont même dépassés aux questions VI (vitesse d'un mobile ponctuel nulle à un instant), VIII et IX (changements de référentiel), XI (pièce se détachant d'un satellite).

6. BILAN DE L'EXPÉRIENCE 4

Les résultats du questionnaire 2, posé le 13 Octobre 1987 à neuf étudiants volontaires de première année, et suivi d'une réflexion menée avec eux, sont indiqués sur le questionnaire lui-même.

a) Conditions de l'expérience

En remaniant le questionnaire 1, nous avons voulu :

- enlever 4 questions, l'une trop formelle (XII), les autres faisant intervenir trop d'éléments différents (XI, XIII et XV) ;
- ajouter une question sur les conditions initiales (nouvelle question IX) ;
- attirer l'attention sur la distinction entre le nécessaire et le possible (en soulignant les mots «peut» et «forcément») ;
- homogénéiser et préciser les questions de changement de repère (anciens numéros VIII et IX) : les deux sont relatives au même tapis roulant (cf. interrogation posée ci-dessus au § 3, c).

Rappelons qu'à cette date, la Cinématique était à peine amorcée en cours (trajectoire, vecteurs vitesse et accélération), alors que la Dynamique et la notion de référentiel galiléen n'ont été vues qu'en Terminale (ou par les redoublants). Quant aux travaux dirigés, ils n'avaient porté que sur les vecteurs et leur dérivation. Au contraire le questionnaire 1 avait été posé après la fin du cours de Cinématique. Parmi les neuf étudiants se trouvaient trois redoublants.

b) Comparaison avec le questionnaire 1

Une comparaison avec les résultats du questionnaire 1 n'aurait guère de signification statistique et n'était d'ailleurs pas visée. Notons cependant, sans calculer de pourcentages, qu'à chaque ques-

tions, ce sont toujours les mêmes réponses (bonnes ou mauvaises) qui recueillent le plus de voix.

Cela semble révéler des réflexes typés et des automatismes de raisonnement qu'il sera bon d'analyser.

Seule différence notable à cet égard : à la question XIII, 7 étudiants sur 9 pensent que l'énergie potentielle d'une masse pesante accrochée à un ressort ne dépend que de son altitude, alors que 47 % seulement des interrogés de 1986 le pensaient. N'est-ce pas seulement le réflexe énergie potentielle = mgh (oubliant celle provenant du ressort) qui a joué ?

Réponse exacte ne veut pas forcément dire question bien comprise...

c) L'entretien après test

Les étudiants testés n'ont pas manifesté le désir de passer plus d'une demi-heure sur le questionnaire. Il se sont très volontiers prêtés à un échange de vues sur leurs mécanismes de pensée et leurs difficultés.

Celles-ci peuvent être toutes regroupées autour de la liaison entre la Physique et ses «formules».

Ainsi tel étudiant dit qu'il «n'avait plus les formules en tête pour répondre à la question» et qu'«avec une formule sûre il obtiendrait une réponse sûre», alors qu'il ressent souvent un «conflit entre une formule incertaine et son intuition». Ce conflit est souvent cité par les étudiants. Un autre choisit une réponse (éventuellement fausse) qui «lui rappelle une formule connue». Un troisième explique qu'«avec les formules on n'a qu'à faire les calculs».

Les «formules» revêtent à leurs yeux un caractère presque magique, alors qu'ils n'en connaissent pas toujours les conditions d'utilisation ni même parfois le contenu, ce qui les empêche de s'en servir dans des situations nouvelles. Pour comble de malheur ils ferment souvent le tiroir «Mathématiques» de leur esprit, ce qui les laisse commettre des erreurs, au lieu de leur faire tirer bénéfice de la formalisation qui leur a pourtant paru si salutaire !

A titre d'exemples d'intuitions trompeuses, en l'absence de toute formule ou en conflit avec l'une d'elles, citons :

- la vitesse d'un mobile changeant de sens lorsque son accélération change de sens ;
- des vitesses différentes (d'une même masse) impliquant des forces différentes : à allongement égal, la tension d'un ressort est plus grande lorsqu'il est en train de s'allonger que lorsqu'il est en train de se

raccourcir ;

– des clés, lâchées par le passager d'un tapis roulant «perdant leur vitesse initiale» (par rapport au sol) «dès qu'on les a lâchées».

Voici à présent des cas de faillite de l'utilisation mathématique des formules :

- confusion entre un vecteur et sa norme, entre la dérivée de sa norme et la norme de sa dérivée ;
- nullité de la vitesse à un instant entraînant la nullité de l'accélération à cet instant ;
- confusion entre le maximum d'une seule coordonnée d'un mobile et l'annulation de sa vitesse ; faillite plus générale de la logique par confusion entre «A implique B» et «B implique A» (généralisation abusive d'un cas particulier), manque de vigilance qui ne se produirait sans doute pas aussi souvent en Mathématiques.

Cependant la discussion a mis en valeur des réactions très positives de la part des étudiants. Par discussion entre eux, même sans notre intervention, ils dépitent assez facilement leurs erreurs : ainsi, après avoir compris la chute des clés sur le tapis roulant, ils rectifient leur bévue au sujet de la balle lancée en l'air depuis le même tapis. Des contre-exemples, souvent concrets (une voiture sur une route par exemple), trouvés par eux ou proposés par nous, remettent leur intuition dans le droit chemin. Enfin, lorsqu'on les oblige à ouvrir le tiroir Mathématiques de leur esprit, ils retrouvent la vigilance qui leur a fait défaut en Physique : ainsi, tous savent bien que la nullité d'une fonction en un point n'entraîne pas celle de sa dérivée en ce point, ce qui leur évite de croire l'accélération nulle quand la vitesse l'est.

Signalons pour terminer l'effet bénéfique que peut avoir une émission de télévision, qui peut tenir lieu d'observation : tel étudiant, qui avait regardé une émission sur Galilée (la fameuse chute d'un objet du haut du mât d'un navire en mouvement), à déclaré ne plus pouvoir en oublier la conclusion.

Toutes ces observations se relient bien aux différents écueils que nous souhaitons étudier. Nous allons essayer d'en tirer des conclusions au paragraphe suivant.

7. QUELLES CONCLUSIONS ?

Les questionnaires posés ont bien révélé les difficultés de compréhension auxquelles nous nous attendions et autour desquelles ils avaient d'ailleurs été conçus. L'entretien après test (§ 6, c ci-dessus) a particulièrement permis de mettre le doigt sur la relation que les étudiants entretiennent avec la Physique : un mélange paradoxal entre la réduction de cette science à un formulaire mathématique et le refus d'avoir recours à la rigueur logique que devrait permettre cette mathématisation, rigueur qu'ils reconnaissent pourtant nécessaire en Mathématiques. Ce refus n'est pas compensé par l'appel à l'observation : leur intuition les trompe dans les cas difficiles ; quant aux expériences les plus simples, qu'ils imagineraient sans risque d'erreur et qui éclaireraient leur pensée, ils n'y songent même pas !

Le recours à la visualisation de mouvements sur ordinateur apporte une expérimentation simulée sur laquelle ils peuvent agir, ce qui les oblige à analyser leurs propres conceptions des notions et relations utilisées et à prendre conscience de leurs confusions. Elle présente l'immense avantage de dispenser l'étudiant des calculs mathématiques qui lui masquent souvent l'aspect physique des problèmes.

Le présent travail, nous l'avons dit, est une première exploration dont il faut bien voir les limites et qui ouvre un grand nombre d'interrogations.

Dans un questionnaire à choix multiples demandant des réponses rapides, quelle interprétation donner aux réponses ? une réponse correcte est-elle le fruit d'un automatisme aveugle ? d'un raisonnement exact et rapide ? d'une bonne intuition ? ou d'un pur hasard ? Inversement une question non résolue peut provenir d'une réflexion qui n'a pu être menée à son terme, ce qui est somme toute préférable à une réponse exacte par automatisme. Nous ne prétendons pas juger des aptitudes en Physique, mais démontrer des mécanismes de pensée.

Quant à la simulation sur ordinateur, qui ne consiste surtout pas en l'utilisation de logiciels pré-établis, elle n'est qu'un outil parmi d'autres et ne dispense certes pas d'une confrontation entre les modèles utilisés et l'expérience.

Dès ce premier stade cependant, on peut avancer quelques suggestions et poser plusieurs questions.

A côté des exercices traditionnels, qui font appel pour une grande part au calcul, il serait bon d'introduire des questionnaires du type utilisé ici, et de les faire suivre d'une discussion critique avec les étudiants.

On ne dira jamais assez la vertu des exemples concrets les plus simples : comment confondre mouvement et trajectoire lorsqu'on a pris conscience que sur une même route on peut faire bien des voyages différents ? Lorsqu'un étudiant avance une proposition hasardeuse, l'enseignant et les autres étudiants devraient aussitôt rechercher avec lui divers exemples et contre-exemples simples jusqu'à ce que l'assertion exacte s'impose à tous : nous avons pu observer à quel point une discussion entre les étudiants, sans même notre intervention, pouvait les remettre sur le droit chemin.

La même fonction critique est exercée par le face à face entre l'étudiant et l'ordinateur : rappelons l'étonnement devant un mouvement rectiligne sinusoïdal, visualisé par le déplacement vertical d'un spot, pour qui s'attendait à voir une sinusoïde.

Pourrait-on combattre la réduction de la Physique à des formules magiques :

- par l'utilisation et la comparaison critique de modèles différents pour représenter un même phénomène ?
- par une exigence accrue touchant les termes scientifiques et la syntaxe, par exemple en faisant rédiger des énoncés d'exercices ?

Comment éviter le cloisonnement des esprits en différents domaines étanches, particulièrement entre Mathématiques et Physique ? Le manque de rigueur logique que nous reprochons aux étudiants n'est-il pas induit par nos alternances de démonstrations rigoureuses dans le cadre d'un modèle formel et de faits admis tels quels lorsqu'une démonstration serait trop difficile ? Faut-il opposer formalisme mathématique et description physique ? Ce que nous appelons raisonnement physique n'est-il pas un raisonnement mathématique que nous faisons en raccourci sur un modèle connu auquel nous nous sommes raccrochés ?

En outre, le fait que bien des outils mathématiques sont utilisés dans notre enseignement de la physique avant d'avoir été abordés en Mathématiques nuit à l'image de la rigueur que se font en physique les étudiants. A cet égard, l'ordre des programmes que nous suivons habituellement à l'université (Cinématique, Mécanique, Électrostatique, etc...) est-il le mieux adapté ?

Comment faire pour que la Physique, science expérimentale, ne se réduise pas, pour les étudiants, à des Mathématiques mal faites ?

Faut-il dire que nous n'avons aucune réponse toute faite à ces questions et que ce travail nous a surtout permis de dégager quelques pistes de recherche ?

- [1] Des recherches dans le même domaine ont déjà été menées de manière approfondie par diverses équipes. Nous avons notamment consulté la thèse de Doctorat d'État de Sciences Physiques soutenue en 1978 par Édith Saltiel à l'Université Paris VII (*Concepts cinématiques et raisonnements naturels*), diffusée par l'I.R.E.M. de Paris-Sud, et *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*, ouvrage de Laurence Viennot édité en 1979 chez Hermann (Paris).
- [2] A l'issue des examens partiels de la fin du premier trimestre de première année, les étudiants les plus faibles (note moyenne inférieure à 5/20) sont orientés en section de Remise à Niveau, où un programme moins étendu et moins approfondi que celui de première année leur permet de conforter les connaissances antérieures à ce programme.
- [3] On trouvera des exemples de simulation de mouvements dans *Des ailes pour la tortue*, ouvrage d'Alain Texier Publié au C.N.D.P. (Paris).

Annexe

QUESTIONNAIRE POSÉ EN OCTOBRE 1986

Les pourcentages obtenus par les différentes réponses figurent en caractères gras

I - Un mobile ponctuel possède un vecteur vitesse \mathbf{V} constant,

94 % 1 - Sa trajectoire est forcément rectiligne

01 % 2 - Sa trajectoire est forcément circulaire

00 % 3 - Sa trajectoire est forcément parabolique

04 % 4 - Sa trajectoire peut être quelconque

II - Un mobile ponctuel possède une vitesse de norme V constante,

- 03 %** 1 - Sa trajectoire est forcément rectiligne
06 % 2 - Sa trajectoire est forcément circulaire
00 % 3 - Sa trajectoire est forcément parabolique
89 % 4 - Sa trajectoire peut être quelconque

III - Un mobile ponctuel, initialement au repos, possède un vecteur accélération \mathbf{a} constant,

- 73 %** 1 - Sa trajectoire est forcément rectiligne
02 % 2 - Sa trajectoire est forcément circulaire
10 % 3 - Sa trajectoire est forcément parabolique
14 % 4 - Sa trajectoire peut être quelconque

IV - Un mobile ponctuel, initialement au repos, possède une accélération de norme a constante,

- 05 %** 1 - Sa trajectoire est forcément rectiligne
06 % 2 - Sa trajectoire est forcément circulaire
05 % 3 - Sa trajectoire est forcément parabolique
83 % 4 - Sa trajectoire peut être quelconque

V - Un mobile ponctuel possède une accélération de norme a constante > 0 ,

- 03 %** 1 - Sa vitesse \mathbf{V} peut être constante
11 % 2 - Sa vitesse peut être de norme V constante
26 % 3 - Sa vitesse a forcément la forme $\mathbf{V} = \mathbf{at} + \mathbf{b}$
56 % 4 - La norme de sa vitesse a forcément la forme $V = at + b$

VI - A l'instant $t = 0$, la vitesse d'un mobile ponctuel est $\mathbf{V} = \mathbf{0}$.

- 64 %** 1 - Son accélération \mathbf{a} au même instant est nécessairement nulle
07 % 2 - Son accélération \mathbf{a} est forcément dans le sens du mouvement
04 % 3 - Son accélération \mathbf{a} est forcément dans le sens opposé au mouvement
24 % 4 - Son accélération \mathbf{a} peut être quelconque

VII - Vous lancez une balle de façon qu'elle parte obliquement par rapport à la verticale devant vous et vers le haut. Elle monte de plus en plus haut puis redescend et tombe à terre. A sa position la plus haute :

- 45 %** 1 - Sa vitesse est forcément nulle
50 % 2 - Sa vitesse est forcément horizontale
01 % 3 - Sa vitesse est forcément verticale et orientée vers le bas
02 % La force qu'elle subit est forcément nulle

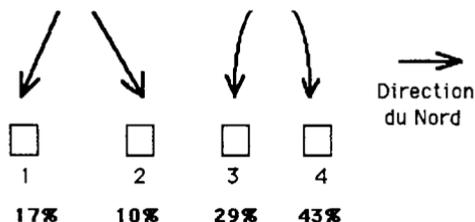
VIII - Vous êtes sur un tapis roulant horizontal qui avance par rapport au sol vers le Nord à vitesse constante. Vous laissez tomber vos clés que vous teniez dans votre main. Elle atteindront le tapis :

- 47 %** 1 - A vos pieds
03 % 2 - Au Nord de vos pieds (vers l'avant)
49 % 3 - Au Sud de vos pieds (vers l'arrière)

IX - Vous jouez à lancer en l'air une balle et à la rattraper tout en marchant à une vitesse à peu près constante. Pour rattraper la balle, vous devez la lancer :

- 78 %** 1 - Vers l'avant
21 % 2 - Suivant la verticale
00 % 3 - Vers l'arrière

X - Un train traverse une gare sans s'y arrêter, à vitesse constante, vers le nord. Un voyageur du train laisse tomber une bouteille par la fenêtre du train (l'imprudent !). Un second voyageur, immobile sur le quai de la gare, observe la trajectoire de la bouteille. Marquez d'une croix la case située sous le dessin représentant cette trajectoire :



XI - Un satellite artificiel tourne autour de la terre. Une petite pièce située à la surface du satellite, étant mal fixée, finit par se détacher. Dès lors :

- 08 %** 1 - Elle tombe sur la terre
23 % 2 - Elle s'écarte du satellite et de la terre sous l'effet de la force centrifuge
13 % 3 - Elle est laissée en arrière du satellite qui s'éloigne rapidement d'elle
53 % 4 - Elle suit le satellite dans son mouvement

XII - Indiquez d'une croix dans la case qui convient si les grandeurs suivantes sont :

Scalaire		Vectorielle	
97%	<input checked="" type="checkbox"/>		Masse
	<input checked="" type="checkbox"/>	94%	Vitesse
95%	<input checked="" type="checkbox"/>		Energie cinétique
	<input type="checkbox"/>	96%	Accélération
	<input type="checkbox"/>	91%	Quantité de mouvement
85%	<input checked="" type="checkbox"/>		Travail
95%	<input checked="" type="checkbox"/>		Energie potentielle

XIII - On lance une balle en l'air en lui faisant subir une force verticale dirigée vers le haut, d'intensité F , pendant la durée t . La hauteur maximale atteinte par la balle dépend uniquement de :

- 46 % 1 - L'intensité F de la force
 02 % 2 - La durée t
 38 % 3 - Le produit $F \times t$
 12 % 4 - Le rapport F / t

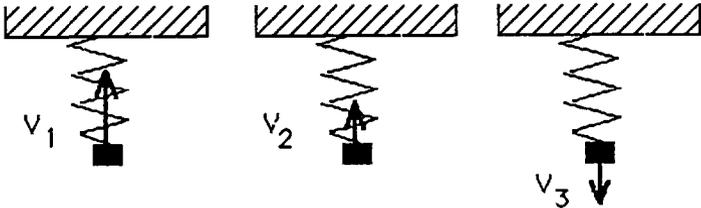
XIV - Un objet ponctuel en mouvement a une trajectoire parabolique d'axe vertical,

- 31 % 1 - Son vecteur accélération \mathbf{a} est forcément constant
 20 % 2 - La norme a de son vecteur accélération est forcément constante
 20 % 3 - La composante horizontale V_h de sa vitesse est forcément constante
 02 % 4 - Son vecteur vitesse \mathbf{V} peut être constant
 18 % 5 - La norme V de son vecteur vitesse peut être constante

XV - Un corps solide, initialement sur la terre, est transporté sur la lune. Cochez d'une croix dans la case qui convient ce qui est :

Identique		Différent	
<input type="checkbox"/>	94%	<input checked="" type="checkbox"/>	L'allongement d'un même ressort auquel on suspend le corps
<input checked="" type="checkbox"/>	56%	<input type="checkbox"/>	L'intensité de la force à exercer pour lui communiquer une même accélération sur un plan horizontal sans frottement
<input type="checkbox"/>	96%	<input checked="" type="checkbox"/>	Le temps de sa chute verticale depuis une même hauteur
<input type="checkbox"/>	88%	<input checked="" type="checkbox"/>	La pression qu'il exerce sur le sol
<input type="checkbox"/>	94%	<input checked="" type="checkbox"/>	La vitesse initiale dirigée vers le haut qu'il faut lui donner pour qu'il atteigne une hauteur donnée.

XVI - Une masse pesante est suspendue à un ressort. Voici trois photographies prises au cours de trois mouvements différents de cette masse : les trois positions sont identiques mais les trois vitesses sont différentes.



Cochez d'une croix ce qui est :

Identique		Différent		
60%	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Force totale subie par la masse
17%	<input checked="" type="checkbox"/>	87%	<input checked="" type="checkbox"/>	Energie cinétique de la masse
47%	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>	Accélération de la masse
	<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	Energie potentielle de la masse
	<input type="checkbox"/>	36%	<input checked="" type="checkbox"/>	Energie totale de la masse

Note : nous avons dépouillé 302 questionnaires. La somme des pourcentages n'est pas toujours égale à 100, soit à cause des erreurs d'arrondi, soit parce que des étudiants n'ont donné aucune réponse à certaines questions.