

ESSAI D'ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DIDACTIQUE

TROIS TENTATIVES POUR ENSEIGNER LA NOTION DE FORCE
NEWTONNIENNE À UN GROUPE D'ÉTUDIANTS EN FORMATION CONTINUE

Jérôme VIARD, L.E.M.D. CNRS
Collectif de recherche en didactique
des sciences physiques. IFM
Université Joseph Fourier, Grenoble

I - Introduction

Le contexte dans lequel s'est déroulé l'enseignement qui sert de support à l'objet de cette étude n'est pas celui d'un collège de l'enseignement secondaire. Cependant l'expérience a montré que la démarche qui était suivie pouvait intéresser des professeurs de collège, c'est la raison pour laquelle ce texte a été proposé à "Petit x".

I.1 Les niveaux d'analyse

Cette expérience peut se lire à trois niveaux, tout d'abord comme la description des modifications introduites dans un enseignement par la confrontation des résultats obtenus aux objectifs visés.

Mais elle peut se lire aussi comme un exemple "d'utilisation systématique et volontariste" des acquis théoriques et pratiques de la recherche en didactique pour construire et transformer un enseignement, en vue d'en améliorer l'efficacité. Il y a en effet, au départ de cette expérience un **projet** : celui d'enseigner la physique, (en l'occurrence la mécanique élémentaire mais ce pourrait être indifféremment ou presque, toute autre partie de la discipline), et une **conviction** fondée sur une longue expérience non pas d'enseignant mais d'étudiant : personne ne sait aujourd'hui enseigner la physique, l'enseignement de la physique est un problème ouvert et il vaut mieux se référer dans ce cas aux travaux de recherche sur le sujet plutôt qu'à l'expérience des enseignants.

Ce travail s'efforce enfin, bien que de façon limitée et ponctuelle, de traquer le fonctionnement concret du système de connaissance des étudiants, d'en reconnaître si possible les règles et d'en dévoiler la richesse. Il voudrait aussi illustrer à travers quelques exemples comment une telle réflexion épistémologique peut se révéler une aide précieuse pour la prise de décisions didactiques, comme l'a amplement montré Guy Brousseau. (Brousseau 1981).

I.2 Le contexte

Le contexte de l'expérimentation : elle se déroule d'Octobre 1986 à Juin 1989 dans le cadre de la formation continue des adultes (CNAM) en cours du soir, à raison de 3 heures hebdomadaires, pendant quatre mois. La population étudiante dont l'âge varie de 22 à 40 ans est très hétérogène, les étudiants ont cependant en commun une formation technique. L'enseignement s'adresse non pas délibérément mais de fait à de très petits effectifs : 11 étudiants la première année ; 4 étudiants la suivante ; 9 étudiants la dernière, ce qui oriente plus l'observation vers des études de cas que vers un traitement statistique.

II - La problématique et les moyens de cette expérimentation

II.1 Les données disponibles

Depuis ceux de Laurence Viennot (Viennot 1975), d'Edith Saltiel, Jean-Pierre Malgrange, (Saltiel, Malgrange 1979), l'enseignement de la mécanique élémentaire a fait l'objet d'un très grand nombre de travaux de recherche en didactique de la Physique, portant essentiellement sur les modes de raisonnement ou sur les conceptions de sens commun (Halloun-Hestenes 1985) qui font obstacle à cet enseignement. Les deux derniers auteurs cités font état d'une étude statistique réalisée au moyen de la procédure prétest-enseignement-post-test sur une population de plusieurs centaines d'étudiants. Cette étude montre que l'enseignement traditionnel, quelle que soit la personnalité des enseignants, n'a que peu d'effet sur les conceptions initiales des étudiants qui se retrouvent pratiquement intactes après enseignement. Les auteurs joignent leur questionnaire à leur article en suggérant aux lecteurs de l'utiliser à leur tour.

II.2 La question centrale

Au vu de cette littérature une question à l'ordre du jour est évidemment : que faire de ce savoir disponible sur les connaissances initiales et comment transformer ces connaissances initiales des étudiants, pour les rendre plus conformes au savoir de référence sur le mouvement ? C'est la question qui a été au centre de la démarche décrite ici que l'on pourrait formuler autrement en reprenant la terminologie de Thomas Khun (Khun 1970) : Comment effectuer ou favoriser au sein d'un groupe d'étudiants un changement de paradigme¹: le passage d'un paradigme de sens commun sur le mouvement au paradigme Newtonien ?

¹ Le terme de paradigme est difficile à définir en quelques mots puisqu'il résume à lui seul une grande partie de l'ouvrage cité en référence, il désigne l'ensemble des postulats, convictions d'un côté, outils conceptuels résolutoires de l'autre, auquel adhère un groupe social au sein d'une communauté scientifique ou autre et qui va déterminer l'approche d'un problème, sa formulation et son mode de résolution éventuelle. Le paradigme Newtonien du mouvement contient entre autre le principe Galiléen de relativité qui postule qu'il y a identité pure et simple entre mouvement uniforme (à vitesse constante) et repos. Le paradigme de sens commun postule au contraire que mouvement uniforme et repos sont des contraires.

II.3 Les implications de ce choix

Le choix de la question précédente n'est pas neutre. Il découle lui-même d'un autre choix qui consiste à décider (alors que d'autres options sont possibles) que l'objet essentiel de l'enseignement n'est pas la maîtrise d'un certain nombre de tâches ou l'acquisition d'un certain nombre d'informations mais la transformation du système de connaissance des étudiants. Par ailleurs, la transformation cognitive envisagée a une dimension collective, sociale : ce sont les bases du consensus établi au sein du groupe à un moment donné que l'on souhaite transformer, à tout le moins infléchir.

II.4 La procédure suivie

Elle a consisté à établir un état des connaissances des étudiants avant enseignement puis après enseignement, à effectuer ensuite en fonction des références théoriques disponibles une interprétation des résultats obtenus, enfin à tenter des transformations dans la pratique d'enseignement lors de la séquence suivante. Cette procédure a été reproduite quatre fois pendant les trois années qu'a duré l'expérimentation. La formulation précédente pourrait être trompeuse en présentant des données théoriques immuables face à une pratique évolutive. De fait, il y a eu interaction réciproque entre la pratique expérimentale et la connaissance disponible sur le savoir des étudiants et ses modes de fonctionnement. Si les données théoriques initiales ont permis de tenter des modifications dans l'enseignement, en revanche l'analyse des conséquences de ces modifications a modifié considérablement la vision première des connaissances initiales des étudiants sur le mouvement, que nous offre la littérature sur le sujet.

II.5 Les moyens d'évaluation : le questionnaire et sa grille de lecture, les productions des étudiants

Le premier moyen d'évaluation est évidemment la procédure prétest-post-test appliquée après chaque période d'enseignement pendant trois années consécutives au moyen du questionnaire mentionné plus haut. Ce questionnaire est présenté en annexe à la suite de cet article, ses traits principaux sont les suivants.

Il est axé essentiellement sur la relativité Galiléenne du mouvement et la conservation de la quantité de mouvement, la relation fondamentale de la dynamique, et plus accessoirement sur le principe de la conservation de l'énergie.

Pour une même notion, la situation et le champ d'application, en définitive la question elle-même, sont délibérément variés : ainsi plusieurs questions se rapportent au mouvement d'un objet dans la pesanteur, mouvement à une dimension : balle lancée verticalement ou à deux dimensions mouvement parabolique ou encore mouvement dû à la pesanteur : chariot entraîné par un poids ; d'autres se rapportent aux mouvements horizontaux d'objets sur des surfaces sans frottement : palet de hockey sur glace ; enfin d'autres questions se rapportent au mouvement d'un vaisseau spatial selon que ses moteurs sont allumés ou non.

La classification des questions : elles peuvent être regroupées autour de trois thèmes. Un premier groupe de questions a pour objet les concepts cinématiques : de position, distance, temps, vitesse, accélération, relatifs à la description du mouvement

et un second les concepts dynamiques d'inertie, force, résistance, pesanteur, qui rendent compte de l'origine de ce mouvement ou de sa modification, enfin un troisième thème regroupe toutes les questions qui se rapportent à la mise en relation entre les deux catégories de concepts précédents : comme par exemple la relation qui existe entre la force et l'état du mouvement (accélééré, uniforme, décélééré).

La grille de lecture retenue : pour interpréter l'évolution des conceptions, il était hors de question de prendre en compte l'ensemble des questions précédentes, le choix a été fait de ne considérer systématiquement que les réponses à trois ensembles de questions considérées comme les plus significatives : celles relatives à l'état de la vitesse (croissante, constante, décroissante) en l'absence de forces, celles relatives au recensement des forces qui rendent compte du mouvement, et celles relatives aux relations entre force et vitesse.

Un deuxième moyen d'évaluation est fourni par les productions verbales ou écrites des étudiants recueillies pendant toute la durée de l'enseignement.

III - La première tentative

L'objectif que s'est fixé l'enseignant au début de cette première tentative est l'acquisition par l'étudiant d'un certain nombre de concepts articulés autour d'un principe organisateur, qui constitue les "ingrédients" principaux du paradigme Newtonien du mouvement et que l'on peut présenter ainsi.

Pour le physicien, il n'y a aucune différence significative entre une situation de repos et de mouvement à vitesse constante, le repos n'est qu'un cas particulier d'un mouvement à vitesse constante mais nulle. De ce fait la distinction établie entre des états de vitesse constante nulle ou non nulle est toute relative, elle dépend uniquement de l'observateur. Ce principe de relativité énoncé dans un très beau texte de Galilée en 1632 (Galilée 1632), a pour corollaire un autre principe énoncé par Newton 55 ans plus tard, celui de la conservation de la quantité de mouvement : «tout corps reste dans un état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite excepté dans la mesure où des forces s'exerçant sur lui le contraignent à changer son état» (Newton 1687). La filiation entre les deux principes est attestée par la référence simultanée au repos et au mouvement uniforme car la "conservation du repos" était admise depuis longtemps. Plus précisément, c'est la quantité définie comme le produit de la masse de l'objet en mouvement par sa vitesse, la quantité de mouvement, qui se conserve tant que l'objet reste sans interaction avec son environnement. Si la masse de l'objet reste constante par ailleurs, la conservation de la quantité de mouvement se traduit simplement par la constance de la vitesse.

Une traduction plus subtile de ce principe est celle où un objet est soumis simultanément à deux ou plusieurs actions d'effet contraires qui se compensent strictement, par exemple une action motrice et une action de freinage dont le bilan global, la résultante, est nulle.

La réciproque de l'énoncé précédent est que toute action s'exerçant sur un objet en mouvement a pour effet non pas d'entretenir le mouvement mais au contraire de le perturber, c'est-à-dire d'acquiesce ou de diminuer la quantité de mouvement, la vitesse si la masse demeure constante, ou de modifier la direction de la vitesse.

Enfin un prolongement du dernier énoncé affirme que la mesure de la force exercée sera très précisément le degré de changement du mouvement, pour une durée déterminée d'application de cette force.

L'état final de connaissance visé étant ainsi défini, la première tâche que se fixe désormais l'enseignant est de déterminer le savoir initial des étudiants pour le comparer avec l'état final vers lequel il souhaite les conduire.

III.1 Les données disponibles sur le savoir initial des étudiants

Le test avant enseignement constitue une confirmation des attentes relatives aux conceptions des étudiants. Les résultats du prétest sont largement en accord avec les données fournies par les auteurs du questionnaire quant aux difficultés éprouvées par les étudiants à partager l'approche Newtonnienne du mouvement.

III.1.1 L'analyse des réponses erronées, trois difficultés essentielles

Voici les réponses erronées qui ont paru les plus significatives.

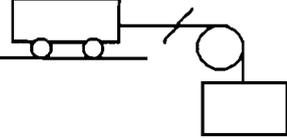
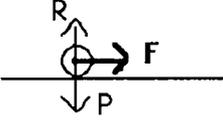
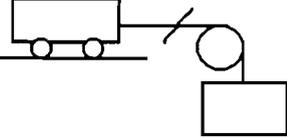
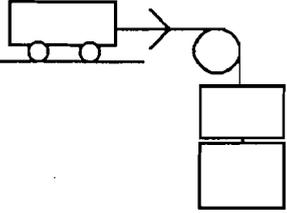
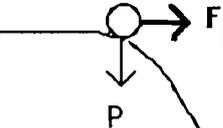
a	b	c
<p>11) Evolution de la vitesse d'un objet lancé sur une surface horizontale sans frottement ? Elle décroît !</p> <p>13) Même question, avec une piste horizontale précédée d'un plan incliné. Même réponse</p>	<p>3) Force agissant sur un objet lancé en l'air ? Le poids et une force vers le haut !</p>  <p>ascensionnelle</p>	<p>25) Force constante \Rightarrow vitesse constante !</p> <p>27) Moteur navette de régime constant \Rightarrow vitesse constante !</p>
<p>29) Evolution de la vitesse après arrêt des moteurs de la navette ? Elle décroît !</p>	<p>12) Forces agissant dans le mouvement de la question 11) Poids et réaction + une force dans la direction du mouvement !</p>	<p>33) Le chariot sans frottement entraîné par un poids se déplace à vitesse constante.</p>
<p>34) Un chariot sans frottement entraîné par un poids, la corde est coupée : le chariot ralentit !</p> 		<p>35) La vitesse est proportionnelle à la force !</p>
	<p>16) Forces agissant dans le mouvement parabolique, dans la pesanteur ? Le poids et une force horizontale !</p>	
		<p>La force de traction est doublée, la vitesse sera multipliée par deux !</p>

Tableau : en trois colonnes les réponses erronées révélant 3 principales difficultés rencontrées a) prédire l'évolution de la vitesse d'un objet livré à lui-même, b) connaissant un mouvement prédire les forces qui en rendent compte, c) connaissant les forces dire si la vitesse est : croissante, constante, décroissante. Prédire l'effet d'un doublement de la force. Les chiffres sont les numéros des questions en annexe.

La première difficulté (a) a trait à l'acceptation du principe de **conservation de la quantité de mouvement** : qui énonce que la vitesse d'un objet (de masse déterminée) reste constante quand il n'est soumis à aucune action de son environnement. Quatre questions dans des contextes différents (les questions 11, 13, 29, 34) se rapportent à cette notion. Une grande majorité d'étudiants a du mal à se faire à l'idée que la vitesse d'un objet puisse se conserver lorsque ce dernier a rompu tout contact avec l'agent qui l'a mis en mouvement c'est-à-dire en l'absence de force motrice même si rien ne vient contrarier le mouvement. Il faut tout de suite écarter une interprétation abusive qui consisterait à dire que c'est le poids de l'expérience - il n'y a pas de situation "réelle" sans frottements - qui interdit d'admettre une conservation hypothétique de la vitesse en l'absence de force motrice. L'idée qui soutient les raisonnements des étudiants est tout autre : ils estiment (du moins plusieurs d'entre eux [plus d'une dizaine d'interventions en ce sens] l'ont mentionné explicitement) que si la force motrice ne fait que compenser exactement les frottements alors, la vitesse ne peut se conserver car il n'y a plus de force motrice résultante, la somme des forces est nulle et par suite **il ne peut y avoir mouvement durable ou même existence du mouvement, car ce mouvement alors n'a pas de cause.** (Il ne s'agit pas d'une cause originelle mais d'une **cause permanente**).

La seconde difficulté (b) est relative au bilan des forces qui rendent compte d'un mouvement quelconque. Trois questions (3, 12, 16) dans des contextes variés sont relatives à ce bilan des forces. Cette deuxième difficulté n'est en fait que la réciproque de la première : **si le mouvement ne se conserve pas de lui-même alors il est nécessairement entretenu** lorsqu'il existe. Dans le premier cas le postulat de l'absence de force motrice entraînait comme conclusion des étudiants la disparition du mouvement. Ici on postule l'existence du mouvement et la conclusion sera qu'il existe une force accompagnatrice du mouvement c'est-à-dire dans le sens et la direction du mouvement alors même que cette nécessité ne s'impose pas pour le physicien Newtonien.

La troisième difficulté (c) est relative aux relations de dépendance qualitatives et quantitatives existant entre force et vitesse. Quatre questions (25, 27, 33, 35) s'y rapportent. Cette troisième difficulté n'est qu'une **conséquence logique** des deux premières, elle ne fait qu'explicitement une implication déjà contenue dans les premiers postulats : s'il existe un lien causal permanent entre une agent moteur et le mouvement alors **les relations de dépendances entre les attributs fondamentaux des deux termes de la relation causale que sont respectivement la force et la vitesse seront spécifiées par ce lien causal.** La dépendance qualitative traduit une relation d'identité : quand la force est constante, croissante ou décroissante, la vitesse est également respectivement constante, croissante ou décroissante. La dépendance quantitative traduit une relation de proportionnalité : quand on double la force qui s'exerce pendant un même trajet la vitesse sera doublée également. Cette troisième affirmation n'est aucunement obtenue par l'expérience mais **déduite** au moyen d'un autre postulat précisant les relations entre les effets et les causes : **les qualités des effets sont celles des causes, l'effet est proportionné à la cause.** Il est facile de remarquer que ce type de raisonnement est familier au physicien professionnel, toute la modélisation "linéaire" s'y réfère, on peut rappeler également l'énoncé de Pierre Curie sur la relation entre la symétrie des effets et celle des causes : «Lorsque certaines causes produisent certains effets, les éléments de symétrie des

causes doivent se retrouver dans les effets produits. Lorsque certains effets révèlent une certaine dissymétrie, cette dissymétrie doit se retrouver dans les causes qui lui ont donné naissance...» (Curie 1894).

III.1.2 Deux difficultés de nature épistémologique

• Une première difficulté liée à l'usage du principe de causalité

En conclusion toutes ces difficultés ne proviennent pas d'une insuffisance du raisonnement, la déduction est des plus rigoureuse, mais de **l'introduction "forcée" d'un principe de causalité là où il n'est pas nécessaire**, c'est-à-dire ici d'une relation hiérarchisée entre le mouvement et son absence qui s'oppose au principe Galiléen de relativité comme son adversaire le plus irrémédiable. Cette difficulté épistémologique liée au principe de causalité n'est pas nouvelle puisqu'on la trouve déjà chez Aristote comme l'ont fait remarquer de nombreux historiens des sciences (Chalmers 1981). Même si l'on ne peut qualifier les conceptions des étudiants d'aristotéliennes cela n'enlève rien à la proximité structurelle des approches du problème. Pour les étudiants comme pour Aristote le mouvement doit avoir une cause et pas seulement une cause originelle mais une cause efficiente permanente, car "l'état naturel des choses est le repos", "en l'absence de forces (causes) les objets restent au repos". Ces deux points sont mentionnés par Halloun et D. Hestenes. (Halloun, Hestenes 1985-2).

Cet exemple de difficulté produite par la causalité, n'est pas unique dans l'histoire de la physique : dans une lettre à la revue *Physics Today* un historien des sciences (Brown 1989) fait remarquer qu'une des hypothèses du trio Einstein, Podolsky, Rosen, dans son refus de l'interprétation proposée par la physique quantique est précisément "qu'une corrélation entre des résultats de mesure doit avoir une base causale". Il fait remarquer également que ce fait n'est pas dû au hasard : dans la pratique scientifique de l'interprétation il y a une longue tradition qui s'est révélée souvent féconde "qui demande que les corrélations soient expliquées (quand elles ne sont pas de pures coïncidences) par l'invocation d'une sorte de connection causale entre les événements corrélés". (idem).

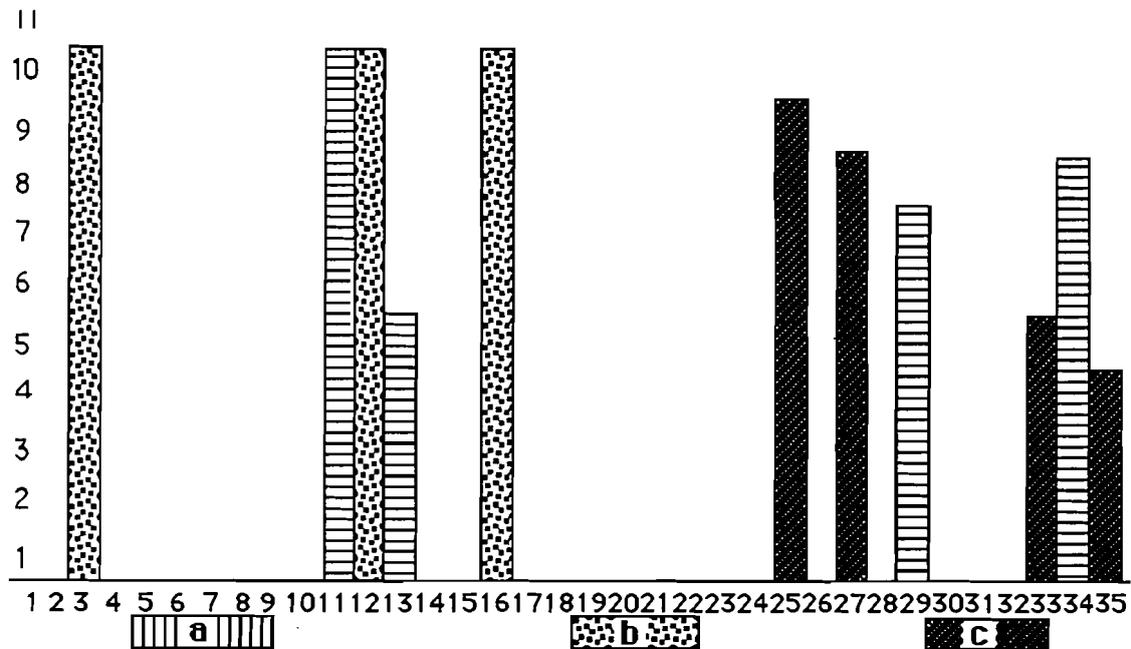
• Une deuxième difficulté plus fondamentale est liée à la complexité des relations entre la pensée scientifique et la pensée commune

Tantôt la pratique scientifique se réfère explicitement au principe de causalité, tantôt elle le récuse totalement, comment s'y retrouver ? Une première réponse peut être apportée en remarquant que la causalité invoquée dans la pensée commune et dans la pensée scientifique n'est pas la même. Dans notre exemple, la causalité invoquée par Aristote est une causalité extrinsèque, elle a sa source en dehors des objets eux-mêmes, de leurs propriétés ; à l'opposé, la causalité invoquée par Newton dans l'accélération gravitationnelle a sa source dans les propriétés physiques des objets : «La cohérence logique du système de concepts de Newton résidait en ceci que comme causes d'accélération des masses d'un système ne figurent que ces masses elles-mêmes» (Einstein, Infeld 1948). Néanmoins l'utilisation du même terme de cause atteste des emprunts fait par la pensée scientifique à la pensée commune. Cette

remarque illustre les relations paradoxales qu'entretient la pratique scientifique avec le sens commun et qui constituent peut-être l'obstacle le plus important au développement de cette pratique et à sa diffusion par l'enseignement traditionnel : la pensée (scientifique ou non) n'a pas d'existence sans référence et sans de nombreux emprunts au sens commun, "Il n'y a pas de pensée sans images" (Aristote), et cependant l'exercice de la pensée critique implique une distanciation, une mise en question voir dans certains cas une négation pure et simple du même sens commun. Ce paradoxe est celui de toute pensée vivante, féconde qui ne peut que s'enraciner dans la pensée commune, se nourrir de cette pensée si elle ne veut pas se réduire à la reproduction de schèmes ossifiés et stériles mais qui doit également en contre-partie assurer la régénérescence de cette pensée commune par le jugement critique, la distanciation, la mise en question de cette pensée par la recherche des contradictions internes, la confrontation avec une pratique sociale en constante évolution, à laquelle doit faire pendant une création continue du sens.

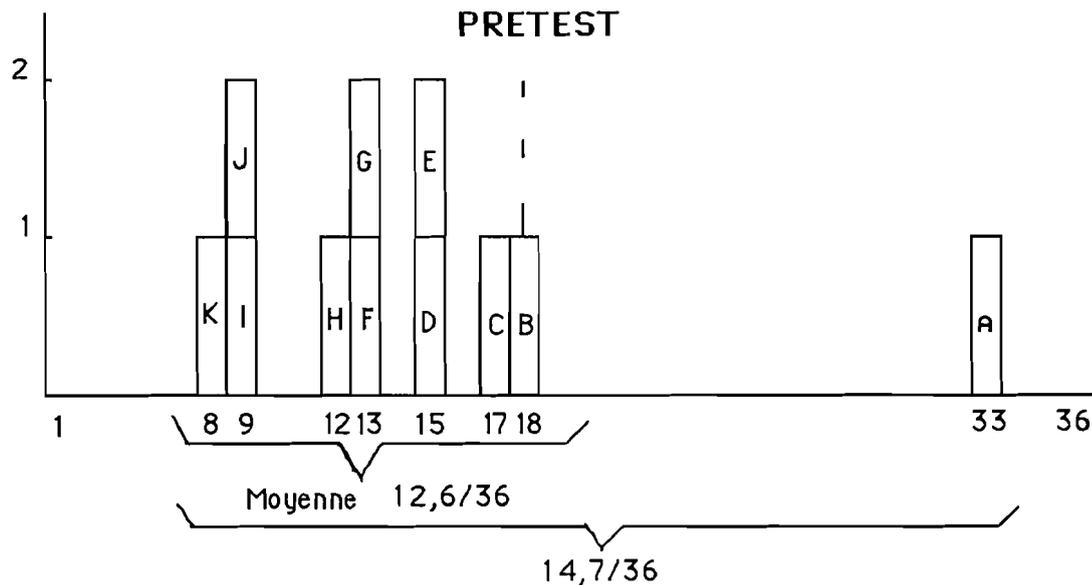
III.1.3 L'adhésion massive des étudiants à leurs conceptions initiales

On a rassemblé ici les réponses erronées illustrant trois difficultés principales du III.1.1. a) prédire le mouvement d'un objet livré à lui-même, b) connaissant un mouvement prédire les forces qui en rendent compte, c) connaissant les forces prédire leur effet sur la vitesse.



Réponses erronées des étudiants aux questions sensibles lors du prétest. En abscisse le numéro de la question, en ordonnée le nombre d'étudiants produisant une réponse erronée. Les textures indiquent le thème auquel appartient la question.

III.2 Réponses globales des étudiants à l'ensemble des questions du test



Histogramme des résultats obtenus au prétest par le groupe, en abscisse le nombre de réponses exactes, en ordonnée le nombre d'étudiants ayant réalisé ce score. Chaque étudiant est identifié par une lettre. L'ordre alphabétique correspond approximativement au score.

Cet histogramme fait apparaître un net clivage dans le groupe d'étudiants entre un étudiant qui réalise presque le score maximal et le reste du groupe. La moyenne des résultats se rapproche du score obtenu au Etats Unis par des étudiants de College Physics soit de première année d'université.

III.3 Hypothèse implicite au début de cette première tentative

Ce test réalisé avant enseignement ainsi que la littérature qui permet d'interpréter ses résultats constituent une masse de données non négligeable. L'hypothèse naïve induite par ce constat est que cela constitue un atout important pour l'enseignant comparativement à la situation de l'enseignant qui ignore tout des connaissances initiales de ses étudiants : on devrait donc s'attendre à une différence significative dans l'efficacité de l'enseignement dispensé en connaissance de cause relativement à celle de l'enseignement ignorant les conditions initiales.

III.4 L'enseignement dispensé

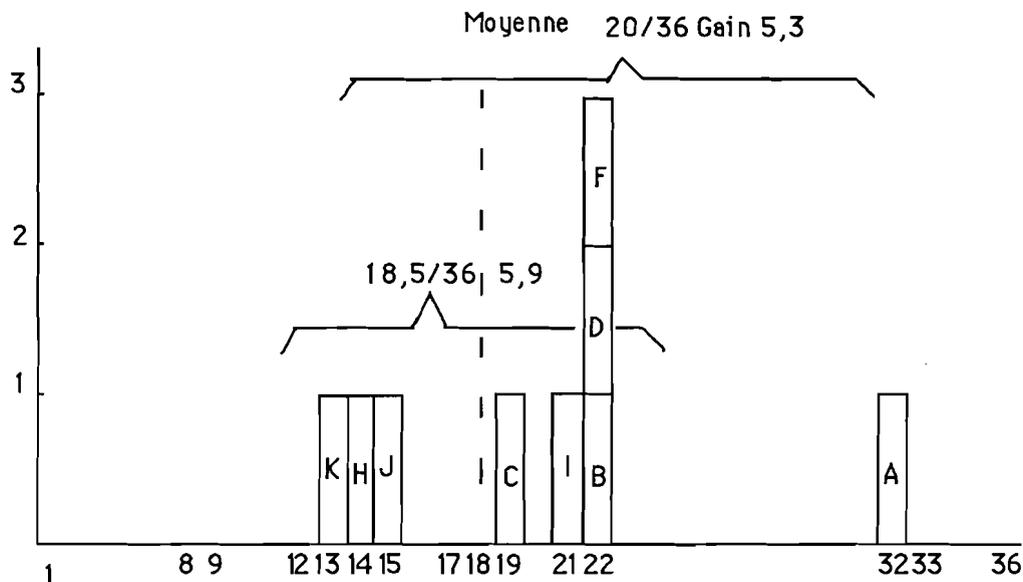
Le premier cours de l'année fut consacré à un débat inspiré d'un exercice suggéré par E. Saltiel dans l'article du B.U.P. déjà cité (Saltiel, Malgrange 1979) sur les problèmes de changement de référentiel : "un promeneur sur un tapis roulant du métro lance un ballon en l'air, où retombe le ballon ?" Le débat suscité par le problème posé est animé, il révèle les conceptions des étudiants, une grande diversité de point de vue et crée dès la première séance un climat différent de l'enseignement auquel étaient habitués les étudiants, propre à faciliter l'expression des idées. Mais cette première expérience fut sans suite faute de matériel pour prolonger l'initiative et l'enseignement

suivant des plus traditionnels : cours magistral, exercices d'application avec seulement un souci constant de distinguer au niveau du langage les conceptions du physicien des conceptions de sens commun.

III.5 Le post-test établit sans doute possible l'échec de cette première tentative

Les performances globales du groupe ont été sensiblement peu affectées par l'enseignement.

a. Les réponses globales au post-test



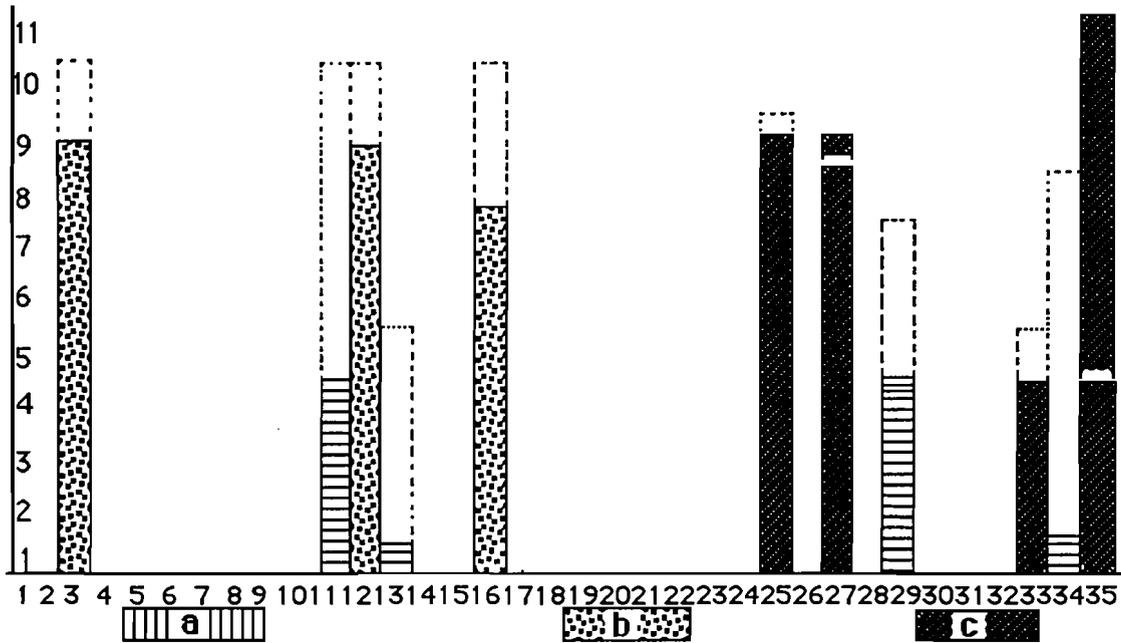
Histogramme des résultats du posttest. En abscisse le nombre total de réponses exactes, en ordonnée le nombre d'étudiants ayant réalisé ce score. L'ordre alphabétique reflète le classement des étudiants selon leurs réponses au prétest seuls les étudiants A et B ont conservé leur place.

L'homogénéité du groupe initial a volé en éclat, certains ont progressé plus que d'autres, par exemple l'étudiant I est passé d'un score de 9 à 21 cependant, le gain moyen comme on peut le constater est très faible 5,3 ou 5,9/36 et comparable à celui obtenu avec les 405 étudiants de Collège Physics.

Mais la réponse globale n'est qu'un aspect de l'inefficacité de la séquence d'enseignement, les réponses par thème attestent encore plus la résistance des connaissances initiales des étudiants.

b. Réponses erronées par thème au post-test

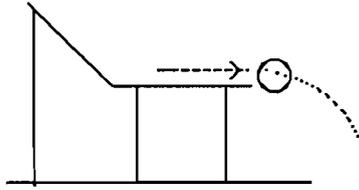
Le nombre de réponses erronées aux questions sensibles est pratiquement inchangé pour les deux derniers thèmes, entretien nécessaire du mouvement et relation force-vitesse, il y a même une nette aggravation dans ce dernier cas : précédemment 4 étudiants sur 11 répondaient que le doublement de la force entraînait nécessairement un doublement de la vitesse, ils sont désormais 9 sur 9 à le faire (question 35). Il y a seulement, en apparence, une amélioration sensible quant à la possibilité d'une vitesse constante en l'absence de force, thème (a).



Les réponses erronées des étudiants aux questions sensibles lors du post-test. En abscisse le numéro de la question, en ordonnée le nombre d'étudiants produisant une réponse erronée. Les pointillés indiquent le nombre d'étudiants ayant commis une erreur lors du prétest. Les blancs indiquent donc les gains. Parfois ces gains sont négatifs cf 27 et surtout 35.

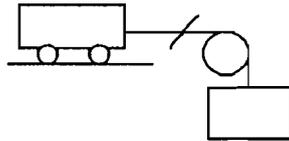
Les améliorations apparemment très nettes constatées dans le cas des questions 11, 13 et 34 sont à interpréter avec précaution et ne correspondent pas nécessairement à une remise en question du modèle de sens commun : en effet 6 étudiants au lieu d'un seul répondent maintenant que la vitesse d'un objet lancé sur une surface sans frottement se conserve mais 4 sur ces 6 répondent à la question suivante que cette conservation de la vitesse est due à une force horizontale. Ils ont donc simplement modifié leur conception initiale pour l'adapter à une nouvelle situation rencontrée au cours de l'enseignement : par exemple il est difficile de soutenir que sur une surface à très faibles frottements la vitesse ne se conserve pas. Ce constat n'entraîne pas, pour autant, la remise en cause de la conception initiale. Cette conception est toujours bien là et plus vivante que jamais, capable de produire une nouvelle mouture d'elle-même quand le besoin s'en fait sentir.

La même remarque vaut pour l'amélioration obtenue à la question 13 interprétée à la lumière des réponses à la question 16 : 8 étudiants sur 9 au lieu de 6 sur 11 répondent désormais que sur le plan horizontal sans frottements la vitesse de l'objet reste constante. Mais sur les 9, 6 répondent à la question 16 que la composante horizontale du mouvement parabolique est associée à une force horizontale dans le sens et la direction du mouvement. Il est donc légitime de supposer que si la même question leur avait été posée pour le mouvement sur la piste horizontale qui précède ils auraient introduit également une force horizontale pour rendre compte de la conservation de la vitesse.



Bien que les questions 13 et 16 relatives respectivement à la vitesse de la balle sur la piste horizontale et aux forces agissant dans la chute libre ne soient pas explicitement liées comme les questions 11 et 12 mais seulement implicitement, les bonnes réponses à la question 13, 8/9 ne sont donc pas significatives d'un changement des conceptions si on les rapproche des réponses à la question 16. Ils sont sans doute l'expression d'un savoir empirique : un objet qui a roulé sur un plan incliné peut poursuivre un moment sa route à vitesse pratiquement constante si les frottements ne sont pas trop élevés.

Les 5 bonnes réponses supplémentaires à la question 34, 8/9 au lieu de 3/11, pourraient être plus significatives.



On a supprimé la cause du mouvement et il se poursuit cependant à vitesse constante toutefois en dehors de deux cas particuliers, il est impossible d'en inférer une remise en question de la force-cause. On peut simplement remarquer que cette situation qui met en jeu la pesanteur est assez proche de l'expérience ainsi que des situations examinées en détail au cours de l'enseignement.

En conclusion les améliorations apparentes constatées dans la réponse à certaines questions vont plutôt dans le sens d'une manifestation supplémentaire de la résistance des conceptions initiales à l'enseignement par la plasticité qu'elles présentent face à des situations nouvelles et imprévues, auxquelles elles s'adaptent parfaitement sans qu'il apparaisse pour ceux qui les soutiennent de conflit cognitif. Cette incapacité de l'expérience seule à ébranler les conceptions initiales est soulignée explicitement par les auteurs du questionnaire et par d'autres auteurs (Johsua, Dupin 1987). L'expérience n'est pas ignorée mais intégrée dans le savoir de sens commun qui en produit une interprétation. L'expérience n'est pas non plus simplement confondue avec le savoir de sens commun : on peut remarquer en particulier que la pesanteur n'apparaît jamais comme une force-cause abstraite mais comme une donnée empirique qui contraint le savoir initial à une adaptation sans que cela entraîne pour autant une remise en cause définitive du savoir initial. Ce fait ressort très nettement de la comparaison des réponses aux questions 25 et 33, pour la première un vecteur force constant entraîne une vitesse constante pour 9 étudiants sur 11 au prétest comme au post-test, tandis que, lorsque cette force constante est une tension créée par un poids, elle entraîne une vitesse croissante pour 6 étudiants sur 11 au prétest et 6 sur 9 au post-test.

III.6 Conclusions de la première tentative

Le bilan de cet échec n'est pas que négatif.

• Le rejet de l'hypothèse naïve

La première conclusion est qu'il ne suffit pas de connaître les connaissances initiales des étudiants pour les modifier par un enseignement. D'autre part il apparaît que la méthode d'enseignement retenue - exposé traditionnel, suivi d'exercices d'application - est particulièrement peu adaptée à l'objectif visé. Enfin la distinction purement verbale entre les conceptions initiales des étudiants et la conception du physicien est de peu d'effet. En résumé quand l'étudiant est confronté à un vrai problème ce ne sont pas les connaissances apprises dans l'enseignement qu'il mobilise pour résoudre ce problème mais ses connaissances initiales en lesquelles il a beaucoup plus confiance même si du point de vue scolaire, elles ne donnent pas de bons résultats et si elles sont décriées par l'enseignant.

• Une nouvelle vision des connaissances initiales des étudiants

Ce premier échec même s'il est durement ressenti ne se réduit pas à des conclusions négatives, il conduit à une nouvelle perception des connaissances initiales des étudiants qui s'accorde mal avec la notion réductrice de "représentation" avec tout ce qu'elle implique de figé ou même avec la notion de conceptions contradictoires. Il n'y a contradiction, incohérence, dans les conceptions les plus résistantes, que pour celui qui reste extérieur à la logique de l'étudiant et qui refuse ses présupposés, son paradigme de référence. Nous avons montré plus haut la cohérence très forte du modèle de sens commun du mouvement. Dans le domaine complètement différent de l'électrocinétique S. Johsua et J.J. Dupin (Johsua, Dupin 1987) montrent comment une expérience sur le sens du courant qui dans la logique du physicien devrait conduire à une mise en contradiction du paradigme des étudiants peut très bien s'interpréter à partir de ce même paradigme. Dans son fonctionnement la connaissance initiale apparaît donc bien plutôt comme une véritable théorie capable de produire une modélisation qui n'a rien à envier par ses capacités d'interprétation et d'adaptation à celle du physicien orthodoxe. Cette richesse des connaissances initiales et leur capacité à produire du sens peut seule expliquer leur égale capacité à résister si efficacement à l'enseignement, elle peut être également une des voies de leur propre transformation.

IV - La deuxième tentative

Elle implique nécessairement la remise en cause au moins partielle de la problématique précédente.

IV.1 Une nouvelle problématique

La nouvelle problématique part du constat issu de l'étape précédente : pour avoir quelques chances de provoquer un apprentissage, il est tout aussi inutile de dénoncer les conceptions initiales des étudiants que de les ignorer, cette dénonciation n'empêche pas la mobilisation des connaissances initiales, elle impose seulement que cette mobilisation des connaissances initiales ait lieu en dehors du contrôle de l'enseignant. Puisque la mobilisation des connaissances initiales est quasiment irréprouvable, pourquoi ne pas organiser le fonctionnement de ces connaissances dans le cadre même de l'enseignement, il sera alors possible de créer des situations dans lesquelles les

étudiants seront conduit à constater les insuffisances de leurs modèles, les limites de leur domaines de validité et à se convaincre de la nécessité de transformer leur savoir initial. Ce choix conduit à une nouvelle question : comment mettre en oeuvre un tel processus ?

En dehors du processus de mobilisation des connaissances initiales dans des situations problématiques, une autre condition de leur transformation est leur explicitation par leurs auteurs. La réflexion et l'expérience conduisent rapidement à se convaincre que le processus qui permet l'explicitation de conceptions ou de connaissances non encore objectivées (même si elles possèdent une cohérence interne et une logique propre) ne peut être qu'un processus dialectique dans lequel l'énonciation d'une proposition ou d'une idée entraîne par association soit l'énoncé d'une idée connexe qui vient enrichir la première ou l'énoncé d'une contre-proposition qui conteste la première affirmation. Le débat d'idées apparaît donc comme un des modes d'expression les plus adaptés à ce travail d'explicitation. Mais la formulation dans le débat d'idée n'a pas que la fonction de clarification, de mise au jour des idées, elle implique également un jugement sur la validité de ces idées et un engagement social devant le groupe constitué des autres étudiants qui va impliquer le développement d'une argumentation. Ces deux démarches renvoient elles-mêmes à deux pratiques d'enseignement, mises en oeuvre par des didacticiens des mathématiques.

IV.2 Deux pratiques d'enseignement qui ont servi de référence

La première de ces pratiques fut la construction d'une situation didactique proposée par N. Balacheff à propos de la somme des angles d'un triangle. (Balacheff 1987). La deuxième, l'instauration du débat scientifique par M. Legrand dans un enseignement de mathématique en première année de Deug A (Legrand 1986). Ces deux pratiques renvoient elles-mêmes au travail de Guy Brousseau (Brousseau 1981).

La deuxième tentative a donc consisté à transposer (ou du moins à tenter de le faire) ces pratiques dans le domaine de la mécanique élémentaire.

IV.3 Construction d'une situation didactique sur la relation force-vitesse

Il s'agit de construire une situation dans laquelle les étudiants mobiliseront leurs conceptions.

IV.3.1 Le compte rendu des événements

Position du problème : au terme d'une séance consacrée au théorème de l'énergie cinétique la question suivante est posée : "Quand la résultante des forces qui s'applique à un objet est successivement croissante, constante, décroissante comment est la vitesse et à quels moments c'est-à-dire est-elle croissante, constante ou décroissante et quand ?".

Les réponses après dix minutes de réflexion

(elles sont écrites au tableau par l'enseignant).

(a) Force constante : vitesse constante.

(b) Force croissante : vitesse croissante.

(c) Force décroissante : vitesse décroissante.

Sont formulées par 4 participants sur 6.

Remarque d'un intervenant : "En regardant les équations reliant la variation d'énergie cinétique au travail je suis arrivé à la conclusion que Force constante implique Vitesse constante".

Un autre intervenant : "Il faut prendre en considération le sens de la force, si la force est de sens opposé à la vitesse, force croissante peut se traduire par vitesse décroissante".

Le dernier intervenant ne se prononce que sur la proposition (a) force constante et se rallie sur ce point à la majorité. Fin de la séance.

Nouvelle séance

Une semaine plus tard, 4 participants dont un nouveau.

Rappel des prises de positions antérieures qui sont confirmées par leurs auteurs, le nouveau se dissocie : "Si la force est constante la vitesse est uniformément variée".

Proposition majoritaire : "Si la force est constante, la vitesse est constante".

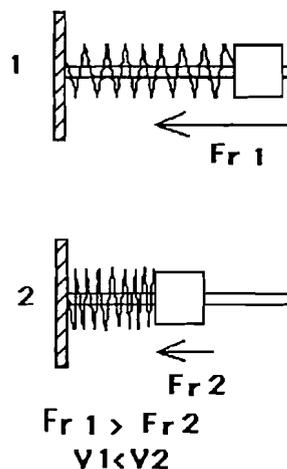
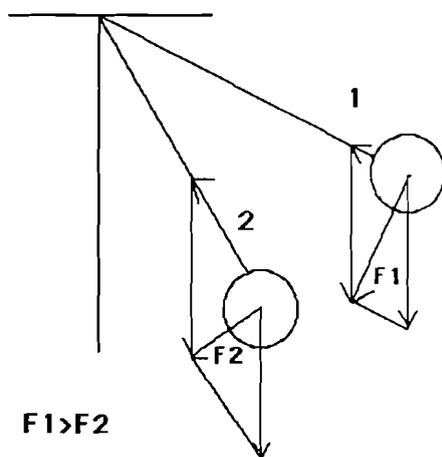
Proposition de l'enseignant de vérifier sur des exemples l'exactitude de cette proposition. On se limite d'abord au cas où force et vitesse sont de même sens. On recherche d'abord des forces constantes.

La pesanteur : la chute des corps dans l'air à vitesse constante va dans le sens de la proposition (a).

Autres exemples ?

Il y a peu d'exemples de forces constantes on s'oriente alors vers la recherche de forces décroissantes et la vérification de la proposition (c) : force décroissante implique vitesse décroissante.

Deux exemples : résultante des forces d'un pendule, force de rappel d'un ressort.



Lorsqu'un pendule est à sa position d'équilibre, la résultante des forces auxquelles il est soumis : la tension du fil et son poids est nulle et minimale. Par suite quand on lâche un pendule immobile d'une position en dehors de la verticale la force motrice ne peut que décroître, alors que simultanément la vitesse ne peut que croître pour être maximale à l'équilibre, lorsque la force motrice atteint son minimum. Au delà de la position d'équilibre force et vitesse sont de sens opposé, la force croît et la vitesse décroît.

La situation est identique pour un ressort muni d'une masse mobile écarté de sa position de repos. La force de rappel du ressort est nulle lorsque le ressort a sa longueur nominale. Si on étire le ressort pour le relâcher ensuite la force de rappel décroît pendant que la vitesse croît. Puis la situation s'inverse quand on a dépassé la position de repos, la vitesse décroît et la force croît quand le ressort se comprime.

Ce constat plonge les étudiants dans une grande perplexité mais force est de constater que :

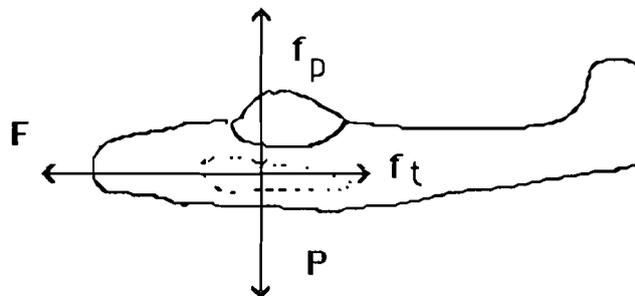
- quand force et vitesse sont de même sens bien que la force décroisse, la vitesse croît,
- quand force et vitesse sont de sens opposé, la force croît et la vitesse décroît.

Il est par suite raisonnable d'émettre la conjecture suivante : "Si force et vitesse sont de même sens, que la force soit croissante, constante ou décroissante, la vitesse sera croissante ; si force et vitesse sont de sens opposé la vitesse sera décroissante quel que soit l'état de la force".

Il reste à fournir une "preuve" de cette assertion en la rattachant à d'autres connaissances acquises. Cette tâche est assurée par l'enseignant en utilisant le théorème de l'énergie cinétique qui vient d'être examiné. L'ensemble de la séance aura duré trois heures. La fois d'après un compte rendu détaillé est fourni aux étudiants.

IV.3.2 Evaluation de l'effet de la séquence sur les conceptions

L'examen de fin d'année fournit une occasion d'évaluer l'impact sur les conceptions de cette séquence didactique.



Enoncé du problème d'examen :

La résistance de l'air sera prise proportionnelle au carré de la vitesse de l'avion V et on écrira donc $f_p = k_p V^2$ et $f_t = k_t V^2$ où k_p et k_t sont des constantes caractéristiques de l'avion et de la configuration de vol.

On suppose qu'après une phase de montée, l'avion a atteint un régime de croisière en vol horizontal et que sa vitesse est constante et vaut V_0 .

Quelle est l'intensité de la résultante des forces horizontale ?
 Quelle est l'intensité de la force F ?

Le résultat escompté de l'enseignant est que la résultante des forces doit être nulle et par suite la force motrice rigoureusement égale en module à la force de traînée puisque la vitesse de l'avion doit rester constante.

Voici les réponses des 4 participants :

a) "La résultante est nulle, $F = -f_t$ ".

b) "L'intensité de la Résultante des forces horizontales est $> f_t$:

$$\left\langle \text{-----} \left\langle \text{---I---} \right\rangle \text{-----} \right\rangle f_t "$$

R

c) " $f_t = k_t \cdot V \circ 2$, $F = M \cdot V \circ$ $\implies R = M \cdot V \circ - k_t \cdot V \circ 2$ ".

d) "L'intensité de la force F devra être supérieure aux forces de traînée pour que l'avion puisse voler donc se déplacer".

Dans trois cas sur quatre, il faut une force motrice supérieure à la force résistante pour que l'avion puisse voler. Dans un cas cette force motrice a la forme explicite $M \cdot V \circ$ mais l'important est surtout que la séquence précédente a laissé les conceptions rigoureusement intactes cela sera encore confirmé par un nouveau questionnaire 4 mois plus tard.

Cette séquence a laissé de côté le problème fondamental :

"Comment se fait-il qu'un avion puisse voler si la force motrice est égale aux forces de frottements ?". Comment se fait-il qu'il y ait mouvement alors qu'il y a équilibre des forces, situation caractéristique de l'état de repos ?

Il ne s'agit pas d'un constat **empirique**, comme le prétendent certains selon lequel il ne peut y avoir de mouvement réel sans force et sans apport d'énergie dans le monde "réel" mais d'un énoncé **théorique** fondement de toute l'analyse du mouvement.

Ce qui est spécifié sans ambiguïté est **que la force motrice doit être supérieure à la force de frottement. Sinon, il y a équilibre des forces et le mouvement cesse puisque l'on se trouve dans la situation du repos, la cause du mouvement ayant été supprimée. L'existence d'un mouvement est inintelligible c'est un non-sens, une contradiction dans les termes de cette théorie qui postule que tout mouvement doit avoir une cause permanente.**

Ce modèle théorique est soutenu avec le plus parfait dogmatisme digne de celui de la communauté scientifique "Vous n'allez tout de même pas me dire qu'il peut y avoir un mouvement horizontal sans force horizontale !".

IV.4 Bilan de la deuxième tentative

Cette deuxième tentative se traduit par un nouvel échec. Quelles sont les raisons de ce nouvel échec ? Deux erreurs importantes peuvent être invoquées.

- **Une première erreur**

Elle est liée à la conduite de la séquence didactique. Du point de vue de la transposition visée de la situation didactique de référence on peut remarquer que la situation didactique proposée est plutôt une situation didactique pour la "formulation" des conceptions des étudiants et de plus la formulation est presque entièrement prise en charge par l'enseignant, les étudiants n'ont plus qu'à se glisser dans les phrases proposées par l'enseignant pour tomber dans le piège qui leur est tendu, mais dans lequel il ne sont que très partiellement engagés. Pour reprendre la terminologie de Brousseau (Brousseau 1981) la situation proposée n'est pas une "**situation didactique pour l'action**" qui sollicite la mobilisation par les étudiants de leur "**modèle implicite**" du mouvement pour résoudre un problème réel pour eux. Ce n'est pas la **situation** elle-même qui sollicite la référence au modèle de sens commun mais le **discours de l'enseignant**.

- **La deuxième erreur**

Elle est plus importante, c'est une erreur de stratégie consécutive à une erreur d'analyse épistémologique : La séquence didactique et l'examen de fin d'année révèlent une grande confusion entre les notions de vitesse et de force : $F = MV$: la notion de variation de la vitesse n'a pas de sens en dehors de la variation de la force, il n'y a pas d'autonomie de cette notion par rapport à la notion de force. La tentative pour établir précisément cette autonomie de la variation de la vitesse par rapport à la variation de la force a totalement échoué malgré le choix de contre-exemples tout à fait probants du point de vue du physicien.

Pourquoi en est-il ainsi ? Parce que dans le paradigme des étudiants la notion d'autonomie de la vitesse à l'égard de la force n'a aucun sens : la vitesse ne peut exister sans sa cause permanente et par suite la question secondaire, dérivée, de l'autonomie de la variation de la vitesse par rapport à la force est une question qui ne se pose pas. Dans ce contexte épistémologique les deux contre-exemples rapportés par l'enseignant font figure d'épiphénomènes un peu gênants certes mais qui ne remettent pas en cause l'essentiel de la théorie. Pour reprendre les expressions de Lakatos, ce sont des contres-exemples locaux et non globaux (Lakatos 1984) car il ne réfutent pas la conjecture principale. En résumé la situation didactique précédente ne vise pas la bonne cible parce qu'elle ne prend pas en compte la hiérarchie du savoir initial des étudiants. Au lieu de mettre en question la connaissance source : le principe de causalité du mouvement, elle ne s'en prend qu'à une connaissance dérivée de cette dernière la relation force-vitesse qui du point de vue de l'enseignant apparaît comme la plus lourde de conséquences.

Enfin la situation didactique précédente en ne prenant pas la peine de bâtir une véritable expérimentation, en se limitant à des expériences de pensée ne fait que conforter une des tendances du sens commun à se situer dans le domaine de la seule spéculation et à éviter la confrontation de ses affirmations avec l'expérience.

IV.5 Acquis et perspectives

Bien que constituant un nouvel échec cette situation didactique et son évaluation, n'en comporte pas moins des acquis importants qui ouvrent de nouvelles perspectives.

• Acquis

L'acquis le plus fondamental est le dévoilement de la richesse du savoir initial des étudiants. Savoir structuré, déduction rigoureuse, argumentation forte, formulation claire : "Pour que l'avion puisse voler, l'intensité de la force motrice devra être supérieure aux forces de traînée". Ce ne sont pas les compétences qui font défaut mais au contraire leur abondance et leur utilisation judicieuse qui interdisent toute acquisition de connaissance nouvelle totalement superflue. Il s'agit d'une véritable connaissance qui fonctionne et donne à ses partisans toute satisfaction jusqu'à nouvel ordre : elle permet d'interpréter le monde dans lequel ils vivent de lui donner du sens, pourquoi l'abandonneraient-ils ? Cela est si vrai que la sanction académique qui tombe brutalement à la fin de l'année de scolarité, apparaît tout aussi injustifiée, qu'injuste. Cette connaissance peut être modélisée de la façon suivante :

MODELE DES ETUDIANTS	MODELE GALILEEN
Le repos est l'état naturel de toutes choses qui s'oppose au mouvement comme son contraire.	Mouvement et repos sont relatifs; rien ne permet de les distinguer si la vitesse est constante. Ils sont alors une seule et même chose. Le mouvement aussi naturel que le repos
Tout mouvement doit avoir une cause et ne peut subsister sans elle: la force-cause.	n'a pas besoin de cause pour exister ou se maintenir. La causalité n'intervient que dans la modification du mouvement: force perturbatrice.
La vitesse est la seule caractéristique du mouvement.	La vitesse ne peut suffir à caractériser le mouvement. Il faut un nouvel outil: la variation de la vitesse.
Comme l'effet est proportionnel à la cause, la vitesse est proportionnelle à la force.	Pas de relation de causalité, pas de proportionnalité entre vitesse et force.
La vitesse de chute est proportionnelle au poids des objets.	La variation de la vitesse est proportionnelle à la force.

• Perspectives

Il est clair désormais que dans ces conditions le travail de l'enseignant ne consiste pas à faire acquérir un modèle par l'étudiant mais à faire en sorte que l'étudiant accepte de remplacer un modèle du mouvement par un autre (Viard 1987). Il est clair également qu'aucun enseignement ne conduira à un abandon du modèle de sens commun s'il n'est en mesure d'une part de mettre en question les présupposés fondamentaux de ce modèle et d'autre part d'apporter une réponse satisfaisante à la question fondamentale qui naîtra de cette mise en question : comment se fait-il qu'un avion puisse voler sans force motrice résultante, comment un mouvement peut-il exister sans cause permanente ? L'ancien paradigme ne peut être abandonné définitivement que si le nouveau est déjà présent, mais c'est la crise de l'ancien paradigme qui rend possible l'avènement du nouveau. (Khun 1970).

V - La troisième tentative

V.1 Construction d'une nouvelle situation

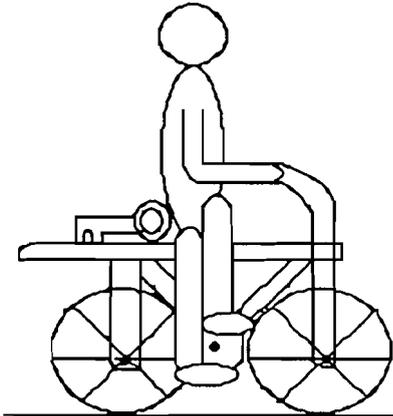
L'objectif est toujours de mobiliser les conceptions des étudiants mais en tenant compte des acquis de l'analyse précédente.

V.1.1 L'objectif

Il est donc nécessaire de construire une situation qui permette de faire "fonctionner" les connaissances initiales ou "le modèle implicite" (Brousseau 1981) en produisant au moyen de ce modèle des anticipations. Le caractère prédicatif des modèles est en effet fondamental en physique qu'il s'agisse des modèles de sens communs ou des modèles savants. A la différence de la situation précédente la mobilisation du modèle implicite ne viendra pas du discours enseignant mais sera induite par la situation elle-même et par la nécessité de résoudre le problème qu'elle pose. D'autre part cette situation devra faire fonctionner les axiomes fondamentaux du modèle et non pas leurs conséquences.

V.1.2 La situation

La situation problème suivante est proposée aux étudiants dès le premier cours.



Le problème suivant est proposé aux étudiants:

Je suis en vélo, je me promène tranquillement sur une route horizontale à une vitesse constante. Distraitemment, après avoir décadéassé mon vélo, j'ai oublié les clés de mon antivol avant de partir, sur mon porte bagage arrière à l'aplomb du moyeu de la roue arrière.

Mes clés tombent, je continue ma route. Un observateur extérieur sur le bord de la route est témoin de la scène. Question : au moment précis où les clés atteignent le sol et compte tenu du fait que la résistance de l'air n'a pas d'effet appréciable sur le mouvement des clés, quelles seront les positions relatives du vélo et des clés au moment indiqué ? Comment seront-ils l'un par rapport à l'autre ?

Où est le vélo?



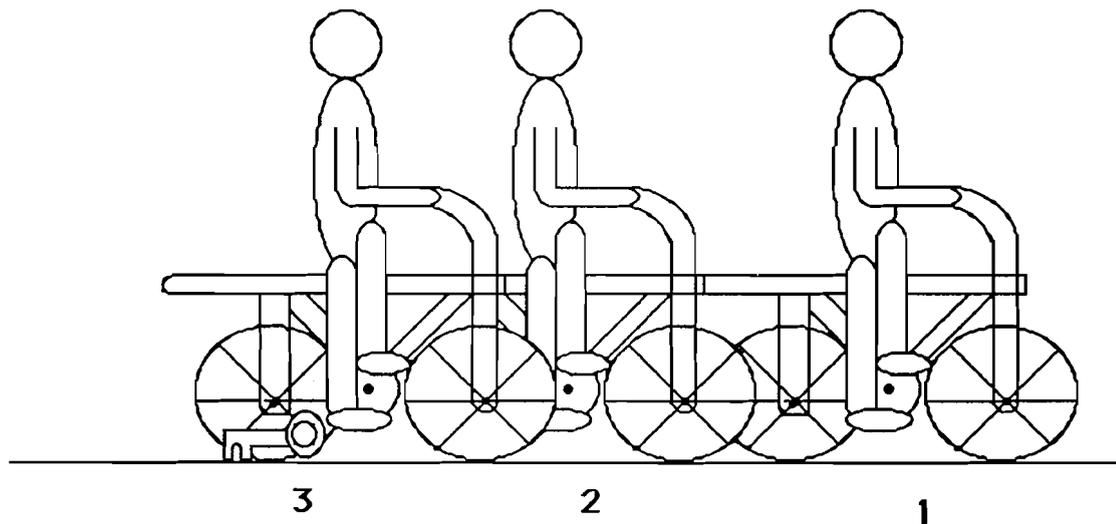
L'enjeu de cette situation est le suivant : Le mouvement de chute des clés peut se décomposer en un déplacement horizontal et un déplacement vertical, cette décomposition géométrique du mouvement ne pose en général pas trop de problème aux étudiants. Du point de vue de la physique en raison du principe de la conservation

de la quantité de mouvement, en l'absence de force horizontale (de fait la résistance de l'air a peu d'effet) la quantité de mouvement horizontale des clés se conserve pendant leur chute. La vitesse horizontale des clés reste constante et égale à celle du vélo. Les clés accompagnent le vélo dans leur chute et arrivent au sol en même temps que lui, au même endroit de la route. Les étudiants ne peuvent accepter ce principe de la conservation du mouvement horizontal car il contredit leur principe qui est qu'un mouvement horizontal ne peut exister sans force horizontale, lorsque le vélo n'agit plus sur les clés il n'y a plus de force horizontales et le mouvement horizontal va cesser soit immédiatement, soit progressivement.

La séquence d'enseignement comprend alors plusieurs phases qui sont les suivantes

1ère phase : Les étudiants réfléchissent individuellement et font des anticipations sur le devenir des clés relativement au vélo ou du vélo par rapport aux clés.

2ème phase : L'enseignant recueille les anticipations des étudiants et les transcrit intégralement au tableau. Il note la répartition des étudiants entre les différentes anticipations proposées.



Les anticipations peuvent se réduire à trois d'entre elles : lors du choc des clés sur le sol : **1** le vélo est loin devant les clés ; **2** le vélo est devant les clés ; **3** le vélo est à l'endroit des clés.

3ème phase : l'enseignant recueille les argumentations des étudiants et les transcrit au tableau. Il y a six intervenants : a ; b ; c ; d ; e ; f.

Les argumentations

- a) "Il y a la vitesse du vélo, le poids des clés. Plus le poids des clés est grand, plus la clé tombera près du vélo, mais la clé tombera derrière le vélo".
- b) "Il y a la vitesse du vélo et le poids des clés".
- c) "Il y a l'instant $t = 0$ où la clé commence à tomber et l'instant où elle arrive. La clé tombe verticalement, pendant ce temps le vélo avance, la clé sera derrière le vélo".

d) Se reconnaît dans les arguments de a) et b).

e) "Je me range aux arguments ci-dessus mais l'observateur ne verra pas l'écart entre le vélo et les clés". (e) affirmera plus tard que la composante horizontale de la vitesse se conserve mais pour le moment il est ébranlé par la position majoritaire dans le groupe, il se range à leur avis en maintenant que l'effet qu'ils invoquent ne sera pas visible : les clés seront au niveau du vélo).

f) "La clé conserve sa vitesse mais son trajet est plus grand, donc la clé arrivera derrière le vélo".

Il peut donc y avoir plusieurs argumentations pour une même anticipation, la situation peut se résumer ainsi.

Première position : lorsque les clés quittent le vélo elles n'ont plus de vitesse horizontale et tombent tout droit, le vélo lui continue sa route au moment du choc elles sont donc séparées de la distance horizontale parcourue par le vélo pendant leur chute verticale.

Deuxième position : première argumentation : lorsque les clés quittent le vélo elles ont la même vitesse que lui mais lorsqu'elles quittent le vélo leur vitesse horizontale diminue, elles parcoureront donc pendant leur chute verticale une distance horizontale inférieure à celle parcourue par le vélo. Deuxième argumentation : les clés conservent le module de la vitesse qu'elles avaient lorsqu'elles étaient sur le vélo mais non la direction de cette vitesse en raison de l'action de la pesanteur. Elles ont par suite un trajet plus grand que le vélo à parcourir durant leur descente et comme leur vitesse est la même que celle du vélo elles arrivent derrière lui.

Troisième position : les clés ont au moment de leur chute la même vitesse que le vélo, elles conservent leur vitesse et parcourent pendant leur chute verticale la même distance horizontale que le vélo.

L'enseignant constate la diversité des anticipations et des argumentations et organise un débat entre les participants.

Le débat : Il s'instaure principalement entre les tenants des argumentations 1 et 2 : six intervenants : a ; b ; c ; d ; e ; f.

f) "Je ne suis pas d'accord avec c), la clé ne tombera pas verticalement".

b) n'est pas d'accord avec c) "la clé a une vitesse horizontale initiale donc elle ne chute pas directement verticalement".

f) "La clé a une vitesse initiale quand elle va tomber cette vitesse va s'ajouter au poids et le résultat ne sera pas vertical".

d) est d'accord avec f et b.

Question de l'enseignant : pourquoi la vitesse diminue-t-elle ?

a) "La vitesse initiale horizontale diminue parce que la clé quitte son support : la clé n'est plus soumise au déplacement horizontal. Le vélo est responsable du déplacement horizontal".

Le vélo entraîne la clé, d) et a) sont en accord avec cette proposition.

f) "La clé continue à aller à la même vitesse mais cette vitesse n'est plus horizontale".

e) "La composante de la vitesse horizontale ne diminue pas".

b) "La vitesse horizontale ne peut pas rester constante car il faudrait que la clé fournisse un travail pour conserver cette vitesse constante.

Question de l'enseignant : "Ce principe s'applique-t-il dans tous les cas ?"

b) "Oui". Le résultat du débat est d'éliminer l'une des positions : la vitesse des clés s'annule lorsque les clés quittent le vélo : il subsiste alors deux positions contradictoires : 1) la vitesse des clés se conserve, 2) elle diminue.

5ème phase : Face à cette contradiction l'enseignant propose une expérimentation au moyen d'une situation équivalente à la précédente empruntée à "Pour la Science" (McCloskey 1983) :

"Quelqu'un va courir avec une balle à la main et la laisser tomber, la scène sera filmée avec une caméra vidéo et l'on observera les mouvements relatifs de la balle et du coureur et notamment la position relative de la balle et du pied, qui seront les analogues des clés et du vélo".

Le résultat est un peu variable suivant les cas tantôt la balle arrive en coïncidence avec le pied du coureur, tantôt entre les deux jambes, tantôt légèrement en arrière du pied mais même dans ce cas les observateurs qui avaient misé sur les positions 1 et 2 (chute des clés en arrière du vélo) considèrent que leurs anticipations ont été infirmées. Certains cependant font l'objection suivante : si la chute avait été plus longue, on aurait peut-être pu constater un retard important. L'expérience n'est donc pas absolument décisive pour tous, et surtout elle n'apporte pas de réponse à la question : pourquoi la troisième prévision s'est-elle réalisée et non la deuxième ?

Face à cette insatisfaction l'enseignant propose d'examiner ce qui dans les argumentations a conduit un grand nombre à anticiper que la balle devait tomber derrière le coureur ou les clés derrière le vélo, les réponses sont :

- 1) La vitesse.
- 2) La différence de vitesse entre le vélo et les clés.
- 3) Le fait que les clés ne gardent pas la même trajectoire.
- 4) Le fait que les clés quittent le support.
- 5) Le poids des clés.

Question de l'enseignant : d'où vient la différence de vitesse entre le vélo et les clés ?

"La clé n'est plus soumise à une force motrice du vélo"

Commentaire de l'enseignant : cela implique que tant que les clés sont sur le vélo, elle sont soumises à une force motrice du vélo.

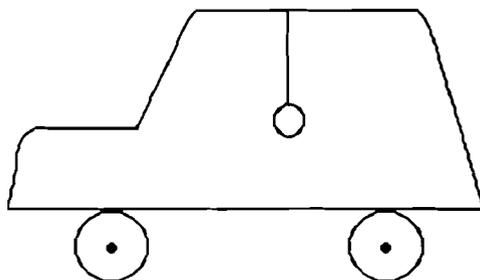
Question de l'enseignant : Comment observer l'action exercée par le vélo, le support, sur les clés ?

Cela est-il possible dans le cas du vélo ? Il est clair que non. Il s'agit maintenant de mettre à l'épreuve cette conjecture que le vélo exerce une force motrice sur les clés qui caractérise les positions majoritaires.

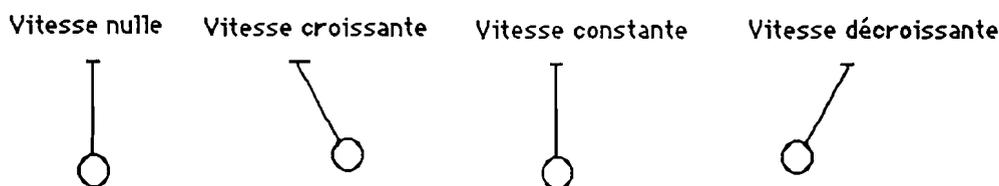
6ème phase : Une expérience de pensée. Suggestion de l'enseignant comment analyser, observer l'action d'un objet en mouvement sur un autre dans une expérience de pensée ?

Première proposition : dans une voiture on place une bille sur un support dur. On observe son mouvement en liaison avec celui de la voiture.

Deuxième proposition : on place la bille au bout d'un fil pour en faire un pendule. On accroche le pendule au plafond de la voiture.

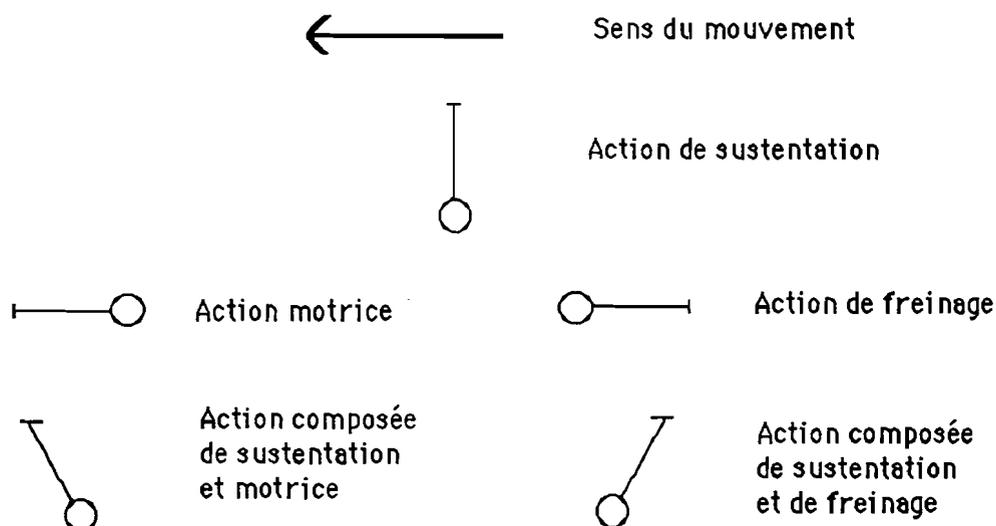


Il est possible alors de lier la position d'équilibre du pendule aux différents états de mouvement de la voiture.



Ces différentes inclinaisons d'un pendule dans un véhicule en mouvement selon que le véhicule est en phase d'accélération, de décélération ou se déplace à vitesse constante fait partie des acquis partagés par tous au sein du groupe. Le problème de l'oscillation éventuelle du pendule qui se pose dans une expérience réelle n'est pas soulevé ici.

Mais le fil du pendule permet de visualiser la direction de l'action exercée par le support sur le pendule et de classer ces actions.



La décomposition géométrique d'une action en deux composantes perpendiculaires, ou l'opération inverse de composition, en règle générale n'ont pas posé de gros problèmes aux étudiants. Les très bonnes réponses obtenues à la question 25 du questionnaire qui a pour objet une composition de forces en attestent.

C'est clair : les phases du mouvement à vitesse constante sont caractérisées par un état identique et par une absence de toute action horizontale du support sur l'objet. En particulier quand la vitesse est constante le vélo n'exerce aucune force motrice sur les clés, de même la main n'exerce aucune force motrice sur la balle, par suite il n'est pas surprenant que le fait de lâcher la balle ne modifie en rien sa vitesse horizontale, puisque du point de vue horizontal rien n'est modifié. Avant de conclure la séance l'enseignant formule sous forme d'énoncé général, de principe, ce qui vient d'être construit par le groupe à l'occasion d'une situation particulière. Quand un objet se déplace à vitesse constante, il n'est soumis à aucune action dans la direction du mouvement et réciproquement. Au total il aura fallu trois heures et demies environ réparties sur deux séances pour arriver à cette conclusion alors qu'habituellement l'énoncé du principe d'inertie ne prend que quelques secondes : le temps de sa seule formulation verbale.

V.1.2 Analyse de la situation didactique

Cette situation est complexe et l'on y retrouve la plupart des composantes de situations didactiques dont Brousseau a établi la typologie (Brousseau 1981). La première composante est une situation d'action.

1) Situation d'action. Les étudiants face à une situation problématique qui ici se résume à la question : que va-t-il se passer ?, doivent agir pour relever le défi de l'anticipation. Il vont devoir prononcer un **jugement** et pour ce faire se référer à une théorie du mouvement qui fournit un "**modèle implicite**". On a une autre situation d'action à la fin de la séquence d'enseignement là le problème n'est plus d'anticiper mais de rendre compte d'événements qui ont eu lieu, l'expérimentation a laissé une profonde insatisfaction, un sentiment d'incompréhension, de perte du sens, il faut alors construire une nouvelle interprétation, un nouveau modèle et donc une nouvelle théorie, la théorie initiale s'étant montrée défailante pour l'interprétation du résultat de l'expérience.

Ce contexte de la genèse d'un nouveau modèle du mouvement n'est pas un phénomène isolé pour le didacticien : "comme une théorie le modèle se révèle par ses contradictions - apparentes ou réelles - avec l'expérience et non par ses accords. Il faut voir dans ce fait un phénomène tout à fait général et important qui contredit formellement certaines théories didactiques empiristes, ..., ce ne sont pas les ressemblances (les isomorphismes) entre les situations rencontrées qui sont le moteur principal des abstractions non plus que la transcription ou la schématisation des structures ne sont la clé de la formulation. La simple familiarité, même active avec des situations bien structurées, ne suffit jamais à provoquer la mathématisation. Au contraire, les problèmes posés par une situation à la mise en oeuvre d'un modèle (implicite ou explicite) préexistant ou par une théorie à la prise d'une décision, provoque l'évolution, la reprise ou le rejet et la formulation des théories" (Brousseau idem).

Ce point de vue est en total accord avec des prises de positions épistémologiques caractérisées sur la génèse de la connaissance **en général** : "Pour un esprit scientifique toute connaissance est une réponse à une question, s'il n'y a pas eu de question, il ne peut y avoir connaissance scientifique. Rien ne va de soi. Rien n'est donné. Tout est construit" (Bachelard 1938). Et quand donc naissent les questions si ce n'est lorsque les réponses habituelles ne fonctionnent plus. C'est seulement la crise d'une théorie ancienne qui permet l'avènement d'une théorie nouvelle. "Dans chaque cas une théorie nouvelle n'est apparue qu'après des échecs caractérisés de l'activité normale de résolution de problème" (Khun 1970). Mais la crise ne produit pas automatiquement une nouvelle théorie ou même des questions clairement formulées. "L'esprit scientifique nous interdit d'avoir une opinion sur des questions que nous ne comprenons pas, sur des questions que nous ne savons pas formuler clairement" (Bachelard idem).

Une autre composante de la situation didactique est la situation de formulation.

2) Situation de formulation. L'objectif didactique est ici de passer d'un modèle implicite à un modèle explicite. Dans notre exemple c) donne une formulation particulièrement claire et rigoureuse de son modèle du mouvement, qui permettra ensuite d'instaurer un débat avec ses partenaires sur des bases dépourvues de toute ambiguïté. Un objectif dérivé est la maîtrise du langage scientifique. La formulation peut se faire individuellement pour répondre à une exigence personnelle, mais un contexte particulièrement favorable est celui où l'on doit communiquer ses choix, ses décisions face au problème rencontré.

3) Situation de communication. Elle se caractérise par la nécessité de **s'impliquer devant témoins** dans un jugement ou au moins dans une formulation et également de **convaincre** son auditoire ou ses lecteurs donc **d'argumenter**. La situation de communication n'a pas qu'un objectif de clarification individuel, elle a aussi un **objectif social**, elle permet de dégager dans le groupe les positions qui résistent à la critique et qui feront l'objet d'un **consensus** de la part d'une fraction, au moins, des participants. Dans notre cas le débat a permis d'éliminer l'une des thèses en présence :   savoir que les clés tomberaient verticalement.

4) Situation d'expérimentation, ou de validation expérimentale du modèle. Pour qu'il y ait validation expérimentale il faut que l'expérience soit construite à partir d'une hypothèse échafaudée à partir d'une théorie ou d'un modèle. C'est le cas ici, à partir de leur modèle du mouvement les étudiants ont avancé l'hypothèse que le vélo exerçait une action motrice horizontale sur les clés. Cette hypothèse conduit à l'anticipation de la chute retardée des clés par rapport au vélo. La mise à l'épreuve des faits expérimentaux de leurs anticipations constitue une validation (ou invalidation) de leur modèle. Cette expérimentation est généralement bien appréciée des étudiants car elle comporte un enjeu, la vérification des anticipations dans lesquelles ils se sont impliqués auparavant. L'expérience n'est pas gratuite mais a son fondement dans une question rest e sans réponse. Cette expérience est construite pour répondre à la demande crée par l'impossibilité de trancher par le débat argument  entre deux positions contradictoires et par le refus de l'enseignement de trancher au nom de l'argument d'autorité. L'expérience n'a pas le statut didactique habituel d'expérience prototypique venant illustrer le discours de l'enseignant mais celui d'expérience test mettant à l'épreuve les anticipations des étudiants. Ce point est développé dans la présentation d'une situation semblable à celle-ci par Guy Robardet

(Robardet 1989). L'expérience n'a pas non plus le statut d'expérience cruciale qui emporte l'adhésion (ici le refus du modèle initial). Du point de vue expérimental, la mesure est extrêmement grossière, entachée d'imprécision évidente pour les étudiants, mais la précision n'a pas de valeur magique, absolue mais seulement une valeur relative à la possibilité de valider ou non une hypothèse, les étudiants jugent eux-mêmes que la précision est suffisante pour invalider leurs anticipations, pas nécessairement leur modèle.

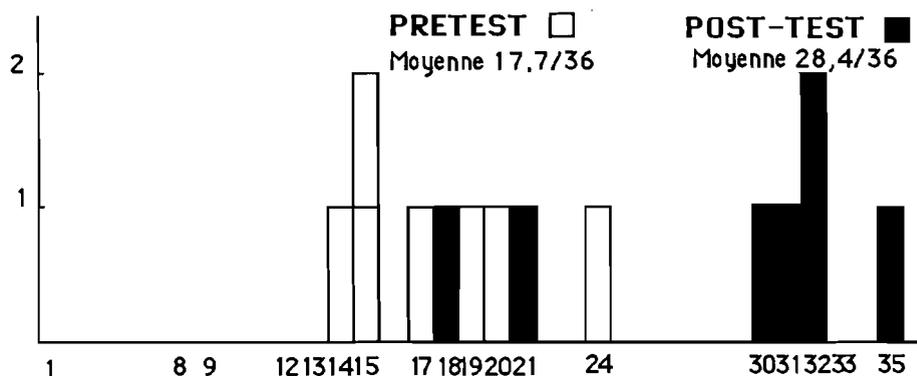
5) Situation de validation non plus expérimentale mais par le raisonnement. Elle se situe non plus au niveau de l'expérience mais de la théorie. Cette étape sera précédée d'une nouvelle phase d'investigation pour arriver à une formulation claire de ce qui dans le modèle initial a conduit à la conclusion que la vitesse horizontale des clés devaient diminuer lorsque les clés quittent le vélo. Cette étape conduira à la conjecture suivante : "Tant que les clés sont sur le vélo elles sont soumises à une force motrice de la part du vélo". La situation de validation consistera à soumettre cette conjecture à une expérience de pensée à laquelle elle ne résistera pas en dévoilant par le fait un nouveau modèle du mouvement : un mouvement sans force motrice. Ou plutôt c'est parce qu'il a été possible de construire dans une expérience de pensée un nouveau modèle du mouvement, une nouvelle description du mouvement capable elle, de rendre compte des anticipations, de les interpréter de façon satisfaisante, de créer du sens que la conjecture première qui s'était trouvée en difficulté face à cette même obligation a été laissée de côté. Elle n'a pas été réfutée par les faits expérimentaux, pas plus qu'elle n'avait été induite par les faits. Et là encore ce fait caractérisé par Lakatos (Lakatos 1984) est un phénomène général.

V.2 La suite de l'enseignement et une nouvelle évaluation par le questionnaire

Il n'est pas possible de décrire ici l'enseignement dans sa totalité ni même simplement la trame de cet enseignement. Il est fondamental de préciser qu'une unique séance si performante soit-elle n'a pas transformé magiquement en quelques heures les conceptions initiales des étudiants. Mais d'une part cette première séquence a, dans certains cas, enclenché un processus de distanciation par rapport à ces conceptions initiales, d'autre part cette séquence donne le ton général. L'enseignement qui suivra à la différence du précédent sera bâti de façon cohérente sur ce premier modèle : introduction systématique des nouvelles connaissances à partir de situations problèmes qui mobilisent les connaissances antérieures et de débats autour de ces situations, analyse collective des difficultés rencontrées, avec de temps en temps des moments de mise en forme et d'institutionnalisation du savoir acquis dans les étapes précédentes. Après quatre mois d'enseignement le même questionnaire que précédemment a donné les résultats suivants pour un groupe de sept étudiants.

V.2.1 Résultats globaux

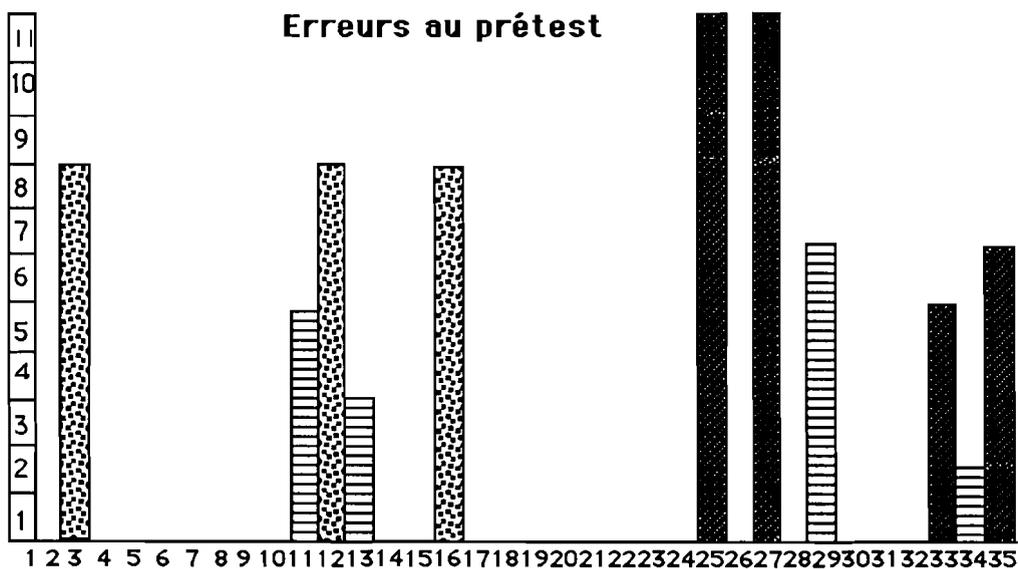
La situation avant enseignement est un peu meilleure que pour le groupe précédent : on obtient au prétest 49% de réponses justes (17,66/36) au lieu de 41% précédemment (14,77/36). Mais la situation après enseignement est bien meilleure 79% de réponses justes au post-test (28,42/36) au lieu de 55% précédemment (19,88/36). Le gain entre les deux pré, post tests a plus que doublé en passant de 14% (5,11/36) à 30% (10,71/36) du total des réponses.



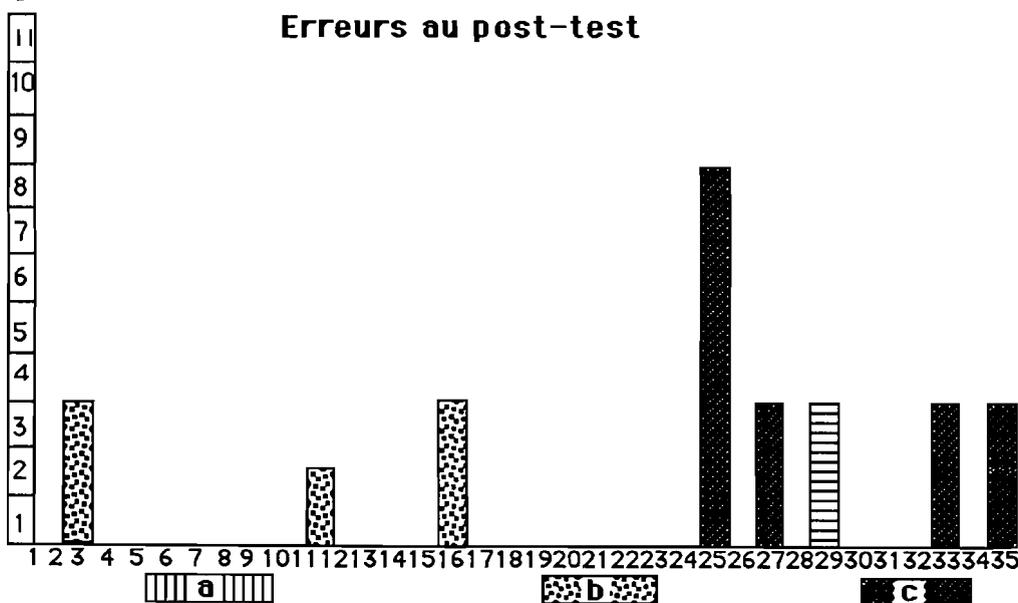
Histogramme des résultats globaux, en abscisse nombre de réponses exactes/36, en ordonnée nombre d'étudiants.

V.2.2 Résultats aux questions sensibles

L'amélioration est encore plus nette pour les réponses aux questions sensibles



On a effectué une correction sur le nombre de réponses pour se ramener à un groupe de 11 étudiants.



Le nombre de réponses erronées est cette fois sensiblement plus faible à une exception près (celle de la question 25 où l'amélioration existe mais est moins importante). Ces résultats portant sur de très petits effectifs n'ont pas valeur de preuve d'une efficacité de l'enseignement, ils montrent cependant que quelque chose a changé dans les effets de cet enseignement et surtout relativement aux objectifs visés. Il est intéressant toutefois de les rapprocher d'une autre expérimentation faite par les auteurs du questionnaire. En utilisant ce qu'ils nomment "un processus dialectique d'enseignement" (dialectical teaching process) (Hestenes 1987), ces auteurs disent également avoir obtenu des gains du même ordre entre les prétests et post-tests effectués au moyen de leur questionnaire (10 points sur 36) et cela sur des effectifs d'un grand nombre d'étudiants. Ces résultats sont corrélés à une meilleure réussite aux examens classiques, et de plus ils remarquent que contrairement au cas de l'enseignement de type classique les progrès les plus importants sont enregistrés chez les étudiants les plus faibles au départ. (Halloun, Hestenes 1987).

En conclusion l'ensemble de ces résultats tendraient à prouver que, sans faire de triomphalisme, dans certains cas les connaissances initiales des étudiants peuvent être modifiées (pour combien de temps cela reste à déterminer) et que comme l'affirment Halloun et Hestenes l'enseignement "peut être effectif" (Halloun, Hestenes 1987).

Peut-être, comme l'anecdote suivante inciterait à le penser, s'agit-il moins d'une "effectivité" de l'enseignement que de la pensée elle-même des étudiants lorsqu'on fait confiance à son audace - "Il faut oser penser". Mao Tsé toung - et lorsque l'on crée ainsi les conditions nécessaires à son existence".

"Un jour une petite fille découvre que dans les pédales de son vélo il y a un roulement à bille, elle demande à son instituteur à quoi cela peut bien servir. Les élèves et l'instituteur après en avoir discuté décident de simuler le fonctionnement du roulement à bille avec des rouleaux de même diamètre posés sur une table sur laquelle on pose une règle. Lorsque la règle est posé directement sur la table et que l'on communique une impulsion à cette règle son mouvement cesse rapidement, lorsqu'on pose la règle sur des rouleaux, son mouvement se poursuit à vitesse constante, autant que l'on peut en juger par l'observation directe, tant qu'il existe des rouleaux pour la supporter. «Mais alors» dit la petite fille qui avait posé la question, avec un certain frémissement d'angoisse devant l'ampleur de sa découverte, «S'il y avait une table sans fin avec des rouleaux sans interruption la règle ne s'arrêterait jamais !». Elle venait de retrouver à propos de cette histoire de roulement à bille, l'intuition de Galilée et de découvrir un monde différent de celui dans lequel elle avait vécu jusque là².

Références

G BACHELARD, (1938), *La formation de l'esprit scientifique*. Vrin.

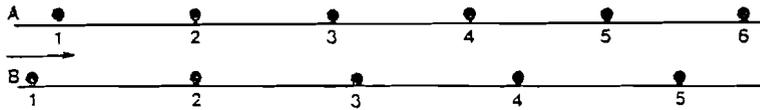
N. BALACHEFF, (1987), Dévolution d'un problème et construction d'une conjecture. Le cas de la somme des angles d'un triangle. *Cahier de Didactique des Mathématiques*. N°39. I.R.E.M. Paris VII.

² Cette histoire est rapportée en ces termes par Jean Loup Canal professeur à l'école normale d'instituteurs de Rodez

- G. BROUSSEAU, (1981), Problèmes de didactique des décimaux. *Recherches en didactique des mathématiques. Vol. II n° 1 pp. 37-127.*
- B. BROWN, (1989), *Physics Today. Correspondance .*
- A.F. CHALMERS,.(1981), *Qu'est-ce-que la Science ?* Editions "La découverte".
- P. CURIE (1894), *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques.* Paris .
- Citation B.MAITTE, (1989), in "*La symétrie aujourd'hui*" ouvrage collectif. Points Science, Seuil 1989.
- A. EINSTEIN et L. INFELD,.(1948), *L'évolution des idées en physique.* 2ème édition Flammarion. 1968. Cités par B. Saint Sernin in *Encyclopédie Universalis. Causalité.*
- G. GALILÉE, (1632), *Dialogues sur les deux principaux systèmes du monde.* .Cité par J.M. Lévy-Leblond in *La physique en question. Mécanique.* Vuibert 1980.
- I.A. HALLOUN et D. Hestenes, (1985-1), The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics. 53 (11), p.1043.*
- I.A. HALLOUN et D. HESTENES, (1985-2), Common sense concepts about motion. *American Journal of Ph. 53 (11), p.1056.*
- I.A. HALLOUN, D. HESTENES, (1987), Modelling instruction in Mechanics. *American Journal of Physics 55 (5), p.455.*
- D. HESTENES, (1987), Toward a modeling theory of physics instruction. *American Journal of Physics 55 (5), p.440.*
- S. JOHSUA, J.J. DUPIN, (1987), La gestion des contradictions dans des processus de modélisation, en phys, en situation de classe. *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques. Actes du colloque de Sèvres. La pensée sauvage.*
- T. KHUN, (1970), *La structure des révolutions scientifiques.* Flammarion.
- I. LAKATOS,.(1984) *Preuves et réfutations.* Hermann.
- M LEGRAND et al., (1986), L'introduction du débat scientifique à l'intérieur du cours pour provoquer chez les étudiants un processus de découverte et de preuve. *IIème Ecole d'été de Didactique des Math.*
- M. MCCLOSKEY, (1983), L'intuition en physique. "*Pour la Science*"
- I.NEWTON, (1687), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica.* Traduction anglaise E. Marquit, *American journal of Physics 58 (9) September 1990 p. 867.*
- G. ROBARDET, (1989), La situation problème dans l'enseignement des sciences physiques, *Petit x n° 23, pp. 61-70.*
- E. SALTIEL, J.P. MALGRANGE, (1979), Les raisonnements naturels en cinématique élémentaire. *Bulletin de l'union des physiciens.*
- L. VIENNOT, (1975), Sens physique et raisonnements formels en dynamique élémentaire. *Bulletin de la Société Française de Physique.*
- J. VIARD, (1987), Modélisation et réalité en physique, *IXèmes Journées Internationales sur l'éducation Scientifique. Chamonix.*

ANNEXE

I. Deux balles A et B se déplacent à des vitesses constantes sur des pistes séparées. Les positions occupées par les deux balles au même moment sont indiquées sur la figure ci-dessous par **des nombres identiques**. La flèche indique la direction des mouvements. Les points de départ ne sont pas indiqués.



1. Les balles vont-elles à la même vitesse ?

- Oui à l'instant «2».
- Oui à l'instant «5».
- Oui à l'instant «6».
- Oui à l'instant «2» et «6».
- Non.

● C

II. La figure ci-contre montre une balle jetée verticalement vers le haut du point A. La balle atteint un point plus haut que C. B est un point à mi-chemin entre A et C (c'est-à-dire $AB = BC$). En ignorant la résistance de l'air.



2. Quelle est la vitesse de la balle quand elle passe au point C, comparée à sa vitesse quand elle passe au point B ?

- La moitié de sa vitesse au point B.
- Plus petite que cette vitesse, mais non nécessairement la moitié.
- Egale à sa vitesse au point B.
- Le double de sa vitesse au point B.
- Plus grande que cette vitesse, mais non deux fois plus grande.

3. Pendant la montée, quelle(s) force(s) agit (agissent) sur la balle ?

- Son poids dirigé verticalement vers le bas.
- Une force qui entretient le mouvement, verticale vers le haut.
- Le poids dirigé vers le bas et une force décroissante vers le haut.
- Le poids vers le bas et une force constante vers le haut.
- Une force vers le haut, agissant d'abord seule sur la balle du point A jusqu'à un certain point, au-delà duquel le poids qui est dirigé vers le bas commence à agir sur la balle ?

4. Après que la balle ait atteint son point le plus haut, au-delà de C, elle change de sens pour redescendre tout droit.

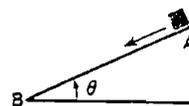
Pendant la descente. Quelle est la vitesse de la balle quand elle passe au point B, comparée à sa vitesse au même point de la montée ?

- Plus petite que la vitesse qu'elle avait à la montée.
- Egale à la vitesse qu'elle avait à la montée.
- Plus grande que cette vitesse, mais non deux fois plus grande.
- Ne peut être déterminée d'après l'information fournie.

5. Si le point A est assez haut, et en ignorant encore la résistance de l'air, la balle atteint-elle une vitesse constante limite telle qu'elle n'aille après ni plus vite, ni moins vite ?

- Oui, à la montée.
- Oui, à la descente.
- Non.
- Ne peut être déterminée d'après l'information fournie.

III. La figure ci-contre montre un bloc qui est lâché du sommet A d'un plan incliné de longueur donnée AB et de pente donnée (angle θ).

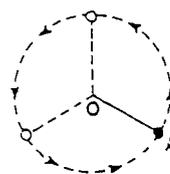


6. Quelle(s) variable(s) affecte(nt) la vitesse que le bloc atteint au bas du plan en B ?
- La forme du bloc
 - La surface du plan
 - La densité de l'air
 - La forme du bloc, la surface du plan, la densité de l'air.

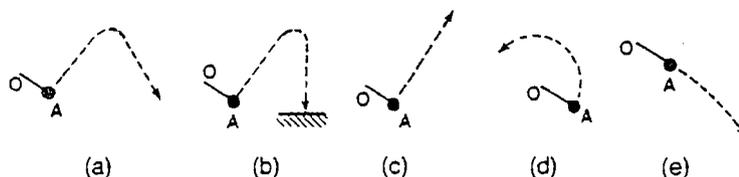
7. Supposons que nous ignorions la **résistance de l'air** et que le plan incliné soit sans frottement. Quelle(s) variable(s) affecte(nt) la vitesse que le bloc atteint au bas B du plan ?

- La forme du bloc.
- La masse du bloc.
- La forme et la masse du bloc.
- La densité du bloc.
- Aucune.

IV. La figure ci-contre montre une balle attachée à une corde que vous tenez dans la main au point O et faites tourner à une grande vitesse dans un plan vertical devant vous. Le cercle indique le trajet de la balle et les lignes droites depuis le centre O représentent les différentes directions de la corde quand vous tournez dans la direction des flèches. Quand la corde atteint la **direction OA** vous **laissez aller la balle**. En ignorant la résistance de l'air et tout effet que la corde puisse avoir.



8. Lequel de ces trajets suivra la balle **après** l'avoir laissé aller en A ?



9. Si vous avez choisi les trajets (a), (b) ou (d) de la question 8. la vitesse de la balle le long du trajet est :

- constante ;
- décroissante de A au sommet de la trajectoire, croissante ensuite à la descente ;
- décroissante de A au sommet de la trajectoire, où la vitesse s'annule, croissante après à la descente ;
- croissante un temps, ensuite décroissante jusqu'à ce que la balle atteigne le sommet de la trajectoire. La vitesse croît ensuite.

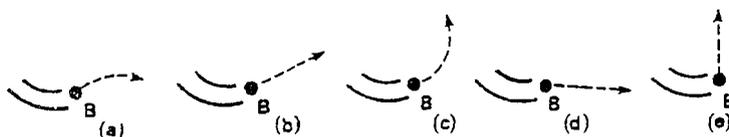
Si vous avez choisi les trajets (c) ou (e) de la question 8. la vitesse de la balle le long de la trajectoire est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- croissante un temps et constante ensuite ;
- décroissante un temps et constante ensuite ?

V. La figure ci-contre montre une cavité, un tube circulaire posé sur une table **horizontale, sans frottement**. Vous regardez la table par dessus. Une balle est tirée à l'extrémité B à grande vitesse.



10. Lequel de ces trajets ci-dessous la balle suit-elle sur la table **après** avoir quitté le tube ?



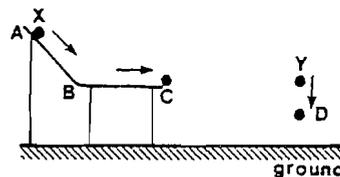
11. La vitesse de la balle le long du trajet que vous avez choisi est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- constante un temps et continuellement croissante après ;
- constante un temps et continuellement décroissante après.

12. Sur la table et le long du trajet que vous avez choisi quelle(s) force(s) agit (issent) sur la balle ?

- Le poids de la balle, dirigé verticalement vers le bas.
- Une force venant de la table, dirigée verticalement vers le haut.
- Une force horizontale, dans la direction du mouvement.
- Les deux premières force ci-dessus.
- Les trois forces ci-dessus.

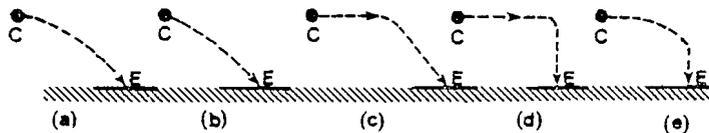
VI. La partie gauche de la figure ci-jointe montre une balle X en mouvement. La balle glisse sur un plan incliné AB, ensuite une piste horizontale sans frottement BC. En C, la balle quitte la piste. Ignorant la résistance de l'air.



13. La vitesse de la balle sur la piste BC est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- croissante pour un temps et constante ensuite ;
- constante un temps et décroissante ensuite.

14. Lequel de ces trajets ci-dessous, la balle suit-elle après avoir quitté la piste en C ?



15. La vitesse de la balle le long du trajet que vous avez choisi est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- constante un temps, et croissante après ;
- autre.

16. Au-delà de C, et le long du trajet que vous avez choisi à la question 14., quelle(s) force(s) agit (issent) sur la balle ?

- Le poids de la balle, vertical vers le bas.
- Une force horizontale qui maintient le mouvement.
- Une force dont la direction change et dans la direction du mouvement.
- Le poids de la balle et une force horizontale.
- Le poids de la balle et une force dans la direction du mouvement.

Au moment où la balle X, dans la figure de la partie (V) quitte la piste C, une balle identique Y est lâchée de son point de repos à la même hauteur que C et tombe verticalement.

17. Quand la balle Y atteint le point D, où sera la balle X ?

- A la même hauteur que D.
- Au-dessus de D.
- Au-dessous de D.
- La position de X dépendra de la hauteur de D.
- Aucune de ces réponses n'est bonne.

18. Quelle balle atteint le sol la première ?

- La balle X.
- La Balle Y.

- c. Les deux balles arrivent en même temps.
- d. Cela dépend de la hauteur de C.
- e. Aucune réponse n'est la bonne.

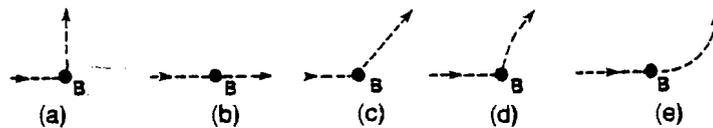
19. Quelle balle atteint le sol à la plus grande vitesse ?
- a. La balle X.
 - b. La balle Y.
 - c. Les 2 balles atteignent le sol à la même vitesse.
 - d. Cela dépend de la hauteur de C.
 - e. Aucune réponse n'est la bonne.

20. Si la piste BC était prolongée au-delà de C de sorte que la balle X ne quitte jamais cette piste, où serait cette balle à l'instant où la balle Y atteint le sol ?
- a. A la verticale de E, le point où X atteint le sol à la question.
 - b. A la droite de E.
 - c. A la gauche de E.
 - d. Cela dépend de la hauteur de C.
 - e. Aucune réponse n'est bonne.

VII. Dans la figure ci-contre, vous regardez par dessus un palet de hockey glissant à vitesse constante sur une surface horizontale sans frottement du point A au point B. Quand le palet atteint le point B, il reçoit un coup horizontal dans la direction de la flèche.



21. Lequel des trajets ci-dessous la balle suit-elle sur la surface après avoir reçu le coup en B.



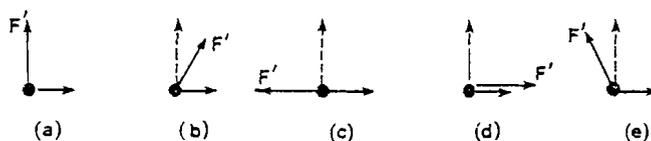
22. Quelle est la vitesse du palet juste après le coup B ?
- a. Egale à la vitesse u qu'il avait avant de recevoir le coup.
 - b. Egale à la vitesse v qu'il reçoit du coup et indépendante de la vitesse u qu'il avait avant.
 - c. Plus petite que l'une ou l'autre des vitesses u et v .
 - e. Plus grande que l'une des vitesses u ou v mais plus petite que leur somme arithmétique.

23. Le long du trajet que vous avez choisi, comment est la vitesse du palet après le coup en B ?
- a. Constante.
 - b. Continuellement croissante.
 - c. Continuellement décroissante.
 - d. Croissante un temps et constante ensuite.
 - e. Constante un temps et décroissante ensuite.

VIII. Dans la figure ci-contre, vous regardez de dessus un palet glissant sur une surface horizontale. Une force constante F agit sur le palet comme l'indique la flèche en trait plein (un palet de hockey sur glace).



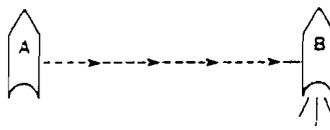
24. Si l'on veut que le palet suive la direction de la ligne en pointillé, une seconde force F' doit agir sur le palet en plus de F , comme il est indiqué. Choisir la figure qui donnera le résultat souhaité. (Un mouvement vers le haut selon le pointillé).



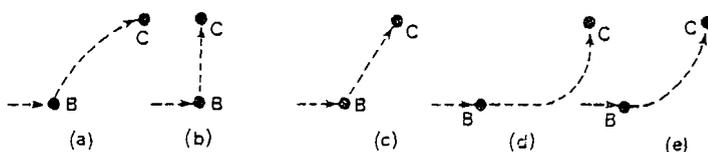
25. Quand les 2 forces agissent simultanément sur le palet la vitesse de ce palet le long de la ligne pointillée).

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- croissante un temps et constante après ;
- constante un temps et décroissante après.

IX. La figure ci-contre montre une fusée naviguant dans l'espace dans la direction de la ligne pointillée. Entre A et B aucune force extérieure n'agit sur la fusée. Quand elle atteint le point B, la fusée allume ses moteurs, comme indiqué, qui exercent une force de poussée constante jusqu'à ce qu'elle atteigne un point C de l'espace.



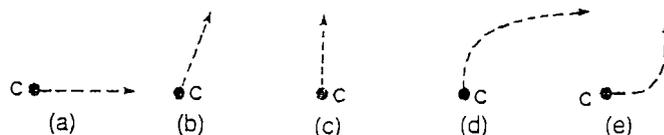
26. Lequel des trajets ci-dessous va suivre la fusée de B à C ?



27. Lorsque la fusée se déplace de B à C sa vitesse est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- croissante un temps et constante après ;
- constante un temps et décroissante après.

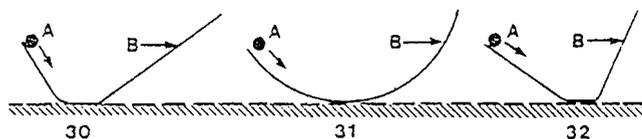
28. En C on arrête les moteurs de la fusée. Quel est le trajet ci-dessous suivi par la fusée au-delà de C ?



29. Au-delà de C, la vitesse de la fusée est :

- constante ;
- continuellement croissante ;
- continuellement décroissante ;
- croissante un temps et constante après ;
- constante un temps et décroissante après.

X. Les 3 figures ci-contre montrent des pistes sans frottement dans un plan vertical. Une balle est lâchée au repos du sommet A vers le côté gauche de chaque piste.

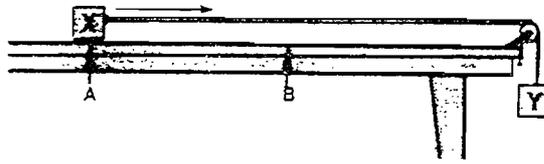


Question 30. - 31. - 32. Quel est le point le plus haut que la balle peut atteindre sur le côté droit de chaque piste ?

- Le point B qui est à la même hauteur que le point A.
- En-dessous de B.
- Plus haut que B.
- Cela dépend de la hauteur du point A.
- Cela dépend de la grosseur de la balle.

XI. La figure ci-dessous montre 2 blocs X et Y reliés au moyen de cordes sans masses et d'une poulie sans frottement. Quand il est lâché le Bloc Y tire le bloc X dans la direction de la flèche sur une table sans frottement horizontal, supprimant la résistance de l'air.

33. La vitesse du bloc est ;
- constante ;
 - continuellement croissante,
 - continuellement décroissante,
 - croissante un temps et constante après,
 - constante un temps et décroissante après.



34. Quand le bloc X atteint B, la corde casse. Le bloc X ensuite :
- s'arrête en B ;
 - continue à se déplacer à vitesse constante ;
 - accélère ;
 - ralentit ;
 - accélère un temps ralentit ensuite.

Le bloc Y est remplacé par un autre bloc Z qui exerce sur le bloc X une traction 2 fois plus grande que celle exercée précédemment par le bloc Y. Le bloc X est remis en A et lâché. De nouveau quand X atteint B la corde casse.

35. Quelle est la vitesse du bloc X au point B maintenant, comparée à la vitesse atteinte au même point quand Y le tirait.
- La moitié de la vitesse atteinte auparavant.
 - Plus petite que cette vitesse, mais pas sa moitié.
 - Egale à cette vitesse.
 - Le double de cette vitesse.
 - Plus grande que cette vitesse mais non 2 fois plus grande.
36. Combien de temps faut-il à X pour atteindre le point B quand le bloc Z le tire, comparé au temps mis lorsque c'est Y qui le tire ?
- La moitié du temps mis avec le bloc Y.
 - Moins que le temps précédent mais non la moitié .
 - Le même temps.
 - Un temps double.
 - Un temps plus long mais non le double.