



Raisonnements simples d'étudiants et de lycéens à propos du plan incliné

Secondary school and university students' simple reasoning about inclined plane

Richard LEFÈVRE

Laboratoire d'Études des Méthodes Modernes d'Enseignement
Bâtiment 3R2
Université Paul Sabatier
31062 Toulouse cedex 4, France.

Pierre ALLEVY

École Ste Marie
13 boulevard Carnot
81000 Albi, France.

Résumé

Ce travail propose un modèle cognitif simple permettant de représenter les connaissances des lycéens de classe terminale scientifique et des étudiants de première année universitaire, à propos du plan incliné. La notion de «schéma de connaissance» nous a conduits à stratifier en plusieurs niveaux de modélisation les schémas construits par les élèves. Une description particulière de ces niveaux est présentée, à partir des réponses données à des questions posées au cours

d'entretiens individuels ou de tests écrits. Quelques interprétations utiles pour l'enseignement en sont tirées.

Mots clés : *plan incliné, schémas de connaissance, modèle enseigné, modèle appris.*

Abstract

The aim of this study is to test an elementary cognitive model representing graphically the scientific models learned by students achieving the secondary course, or beginning the university. It is supported by an apparatus called «the inclined plane». The building blocks of cognition constructed by students are stratified into several levels. The description of these levels are specified from individual interviews responses or tests responses. Some useful interpretations for teaching are dropped out.

Key words : *inclined plane, building blocks of cognition, taught model, learned model.*

Resumen

Este trabajo propone un modelo cognitivo simple permitiendo representar los conocimientos de estudiantes pertenecientes a la clase terminal científica y de aquellos del primer año universitario, a propósito del plano inclinado . La noción de «esquema de conocimiento» nos ha conducido a estratificar en varios niveles de modelización los esquemas construidos por los alumnos. Una descripción particular de estos niveles es presentada, a partir de las respuestas dadas a preguntas planteadas en el transcurso de entrevistas individuales o de pruebas escritas. Algunas interpretaciones útiles para la enseñanza han sido generadas.

Palabras claves : *Plan inclinado, esquemas de conocimiento, modelo enseñado, modelo aprendido.*

1. INTRODUCTION

La plupart des travaux de didactique en physique montrent l'existence de conceptions naïves chez les élèves et les étudiants, qui perdurent au cours de la scolarité. Cela est particulièrement vrai en mécanique, qui est certainement l'un des domaines de la physique ayant donné lieu au plus grand nombre de recherches sur ce thème. Les investigations que nous présentons dans ce qui suit n'apportent d'ailleurs pas de résultats expérimentaux vraiment nouveaux par rapport à ceux déjà publiés par de nombreux auteurs.

Nous avons cherché plutôt à modéliser les raisonnements simples développés par les élèves et les étudiants interrogés, en empruntant à la

psychologie cognitive la notion de **schéma de connaissance** proposée par Rumelhart (1978).

Les situations que nous avons utilisées mettent en œuvre un plan incliné, dispositif que les élèves de l'enseignement secondaire ont rencontré à diverses occasions au cours de leurs études en physique et dont on retrouve régulièrement des illustrations dans la vie quotidienne : descente en ski, montée ou descente d'une côte en bicyclette, etc. Une première étude exploratoire avait montré l'intérêt de l'étude de ce dispositif (Allevy, 1994). Bien que peu mentionné explicitement dans les programmes officiels de 1988, le plan incliné apparaît dans tous les manuels des classes de seconde, première et terminale scientifiques de l'époque (ces programmes ont été modifiés à partir de 1993). Dans le système français, ces classes correspondent aux 5^e, 6^e et 7^e années d'enseignement de la physique. En seconde, le plan incliné était l'occasion d'exercices traitant du bilan des forces et de l'équilibre statique. En première scientifique, l'aérobanc ou la table à mobiles autoporteurs illustraient les problèmes relatifs au travail des forces et aux théorèmes sur l'énergie (énergie cinétique, énergie mécanique). Enfin, on abordait, en terminale scientifique, le théorème du centre d'inertie $\Sigma \mathbf{F} = m \cdot \mathbf{a}_G$ (**nous noterons les grandeurs vectorielles en caractères gras**) que les élèves devaient savoir appliquer au plan incliné. Ce sont ces programmes que les élèves testés ont étudiés.

2. CADRE THÉORIQUE

Pour le physicien, le champ empirique est un espace dans lequel il manipule un certain nombre d'objets, et où il observe le déroulement de phénomènes. Ces objets et ces phénomènes sont repérés comme «intéressants», dans la mesure où ils permettent un questionnement fécond. Comme il ne peut pas rendre compte de l'ensemble des variables qui agissent sur ses objets d'études, le scientifique crée des modèles qui sont censés représenter les phénomènes observés (Halbwachs, 1974). La construction des modèles de la physique obéit à un certain nombre de règles : ces modèles sont souvent réducteurs, ils idéalisent les situations, ils ont un champ de validité borné et ne s'appliquent bien que sous certaines conditions qu'il faut toujours préciser.

Les objets et les phénomènes du champ empirique sont liés par un certain nombre de relations qui constituent la structure praxéologique de ce champ (Halbwachs, cité par Robardet & Guillaud, 1994, p. 80). Ces relations sont formalisées par des structures syntaxiques au niveau du modèle.

Certains modèles élaborés par les physiciens deviennent des objets d'enseignement. Nous désignerons dans la suite ces modèles de la

physique présentés dans le cadre scolaire, par les termes «**modèles enseignés**». Le travail effectué sur le modèle pour qu'il passe du statut de modèle savant au statut de modèle enseigné est l'objet de la transposition didactique.

La physique est enseignée à l'école, au collège, au lycée et à l'université en présentant successivement des modèles plus ou moins aboutis. Le cas de la diode à semi-conducteur, étudié par Martinand (1995), montre bien comment un même objet peut être présenté avec différents degrés d'approximation. Ces degrés d'approximation peuvent être reliés à différents niveaux de scolarité.

Si l'apprentissage est effectif, on peut penser que les modèles enseignés donnent lieu, chez l'élève, à l'élaboration de structures mentales «à peu près homomorphes» à ces modèles enseignés. Nous considérerons que l'image du modèle enseigné, construite chez l'apprenant, constitue le **modèle appris**.

À chacune de ces étapes, les relations se réorganisent, souvent dans le sens de la simplification, d'où notre proposition d'ensembles «à peu près homomorphes».

Les structures construites chez l'apprenant ne sont pas aussi facilement repérables que celles qui sont présentes dans le modèle enseigné : elles représentent ce que l'élève a compris du modèle enseigné. Il existe donc des écarts entre modèle enseigné et modèle appris.

Nous reprendrons le terme de **schéma de connaissance**, emprunté à Rumelhart (1978), pour désigner cette structure particulière de connaissance. Chaque modèle appris constitue un schéma de connaissance particulier. Ces schémas peuvent être plus ou moins complexes, selon le degré de complexité du modèle appris. Selon Rumelhart, les schémas sont des **blocs de connaissance construits** (Building Blocks of Cognition), c'est-à-dire des structures qui comportent des relations. Ces relations font intervenir des variables (quantitatives, qualitatives ou logiques) dont les valeurs ne sont pas fixées. Ce sont les instanciations de ces schémas dans des situations particulières qui fixeront les valeurs de ces variables. Prenons un exemple élémentaire : le schéma «*acheter un produit*» met en relation un acheteur, un vendeur, de l'argent, un produit et une négociation. Le prix de vente peut prendre différentes valeurs (variable quantitative), la négociation peut être inexistante ou être l'objet de longs palabres (variable qualitative), etc. Une relation classique de ce schéma est la suivante : plus le produit a de la valeur, plus il faut d'argent pour l'acheter.

Les schémas de connaissance peuvent être comparés aux **schèmes** proposés par Piaget (1967) et spécifiés par Vergnaud (1987) qui les décrit comme des structures mentales invariantes pour des classes de situations données. Ils s'en distinguent cependant par le fait que les schémas existent

indépendamment des situations. Ce sont des structures qui sont en attente d'instanciation : selon le contexte, certains schémas particuliers sont instanciés par le sujet. Une situation particulière va donner des valeurs spécifiques aux variables constituant le schéma. Une autre situation donnera d'autres valeurs à ces variables.

Comme les schèmes, les schémas sont très adhérents aux situations au cours desquelles ils ont été élaborés initialement ; ces situations acquièrent un statut de prototype : elles représentent en fait une classe de situations (Richard, 1990, parle de «*représentation particularisée de situation*»). Mais si les schèmes restent très liés aux actions du sujet, le schéma peut s'en distancier ; «*sauter à la perche*» constitue un schème chez un sujet ayant pratiqué cette activité, mais le schéma correspondant peut exister avant même que le sujet tente son premier saut.

On peut inférer l'utilisation de schémas lorsque le sujet s'exprime à l'aide d'un certain nombre de langages symboliques, qui peuvent être mathématiques, verbaux, graphiques, gestuels ou autres.

2.1. Un modèle cognitif élémentaire de l'élève

Nous allons maintenant proposer une modélisation simple du fonctionnement cognitif de l'élève, en identifiant les schémas de connaissance avec les modèles appris. Il est évident que beaucoup d'autres schémas existent, en dehors des modèles appris, mais cette option nous paraît raisonnable dans la mesure où nous visons la description de situations simples. Nous prenons le parti de représenter graphiquement les différents schémas de connaissance à l'aide d'éléments géométriques élémentaires (par exemple : un cercle). Ceci permettra de les situer les uns par rapport aux autres, les distances entre les cercles figurant les schémas étant représentatives de leurs éloignements relatifs, sans que nous puissions quantifier cette distance avec précision. Notre point de vue est qualitatif et développé dans le but de conduire les interprétations les plus simples possibles.

Pour un niveau de scolarité donné, nous regrouperons graphiquement ces différents schémas dans un plan horizontal P_0 (figure 1), que nous nommerons **niveau de modélisation**.

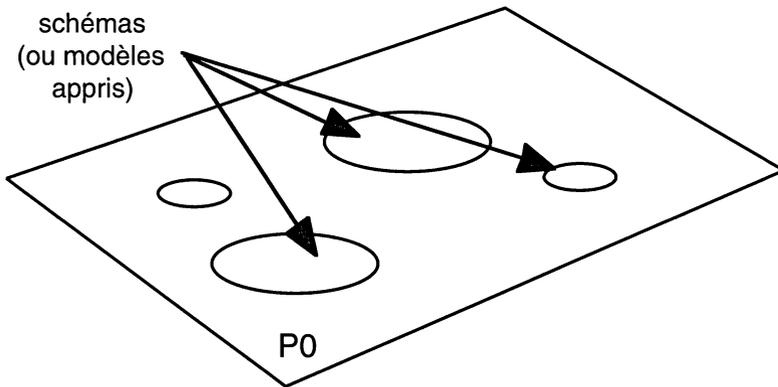


Figure 1 : Niveau de modélisation représenté par un plan

Ce niveau accueille des structures syntaxiques plus ou moins rigoureuses selon le degré de compréhension du modèle enseigné ; lorsqu'elles sont construites chez l'élève, ces structures sont plus ou moins solides, en fonction des circonstances de leur élaboration, de leur fréquence d'utilisation, de leur pertinence à résoudre certaines difficultés, de l'habitude à les utiliser, etc.

Nous représenterons les situations étudiées en classe par des axes orthogonaux au plan de modélisation P_0 (figure 2).

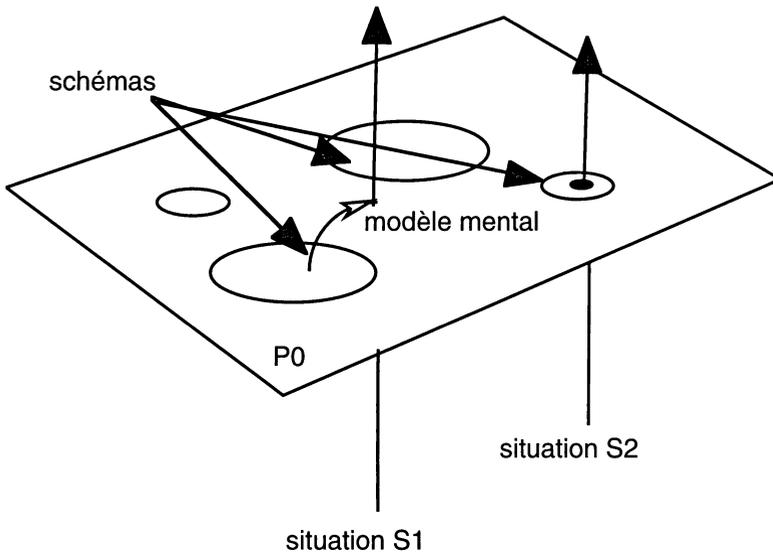


Figure 2 : Représentation graphique des situations et du niveau de modélisation P_0

Par «situation», nous comprenons les propositions de l'enseignant ou du manuel scolaire pour présenter le phénomène, pour en faire la monstration (Johsua S. & Johsua M.-A., 1987), ou même pour le considérer et le traiter sans qu'il y ait eu nécessairement manipulation dans le champ empirique (à l'occasion d'un exercice, par exemple).

Soient S_1, S_2, \dots les différentes situations possibles. Leurs intersections avec le niveau de modélisation P_0 sont plus ou moins proches de certains schémas. Ainsi lorsqu'un élève sera confronté à la situation S_1 , il instanciera certains schémas pour la traiter ; ce seront souvent les plus familiers. Cette instanciation d'un schéma de connaissance dans une situation particulière est représentée sur les figures par une flèche courbe. L'intersection axe-plan (situation-niveau de modélisation) constitue, pour nous, un **modèle mental**, au sens que Johnson-Laird (1983, 1993) a donné à ce terme, dans le cadre d'études de textes littéraires.

En général, le contrat didactique invite l'enseignant à proposer des situations qui sont en adéquation avec les schémas (situation S_2 , sur la figure 2). Si, au contraire, la situation est trop «exotique», elle perce le plan de modélisation en un point éloigné des schémas familiers et elle pourra ne pas être traitée par l'élève, soit parce qu'elle n'est pas reconnue comme appartenant à la classe des situations «traitables», soit parce que le schéma est trop éloigné de l'intersection situation-plan de modélisation (situation S_1 sur la figure 2). L'instanciation du schéma ne se fait pas, ou, en d'autres termes, l'élève ne sait pas quel modèle appris il doit utiliser pour traiter la situation. On peut penser que les élèves «forts» vont réorganiser les schémas disponibles pour traiter la situation, ce qui demande un effort d'adaptation. Ceci les distinguera des élèves «moyens» qui traitent facilement les situations classiques, mais ne font pas cet effort d'adaptation.

2.2. Des niveaux de modélisation hiérarchisés

Les différents modèles enseignés sont généralement hiérarchisés. En mécanique, par exemple, le modèle du point matériel est enseigné avant le modèle du solide. On continue par l'étude de solides indéformables avant d'étudier les solides rigides articulés, puis on s'intéresse aux solides déformables, élastiques, etc. Ces différents modèles, lorsqu'ils sont appris, donnent ainsi naissance à des schémas répartis dans des niveaux de modélisation hiérarchisés ; les plus élevés contiennent les schémas les plus complexes, permettant de traiter avec plus de raffinement les mêmes situations que le niveau P_0 (figure 3).

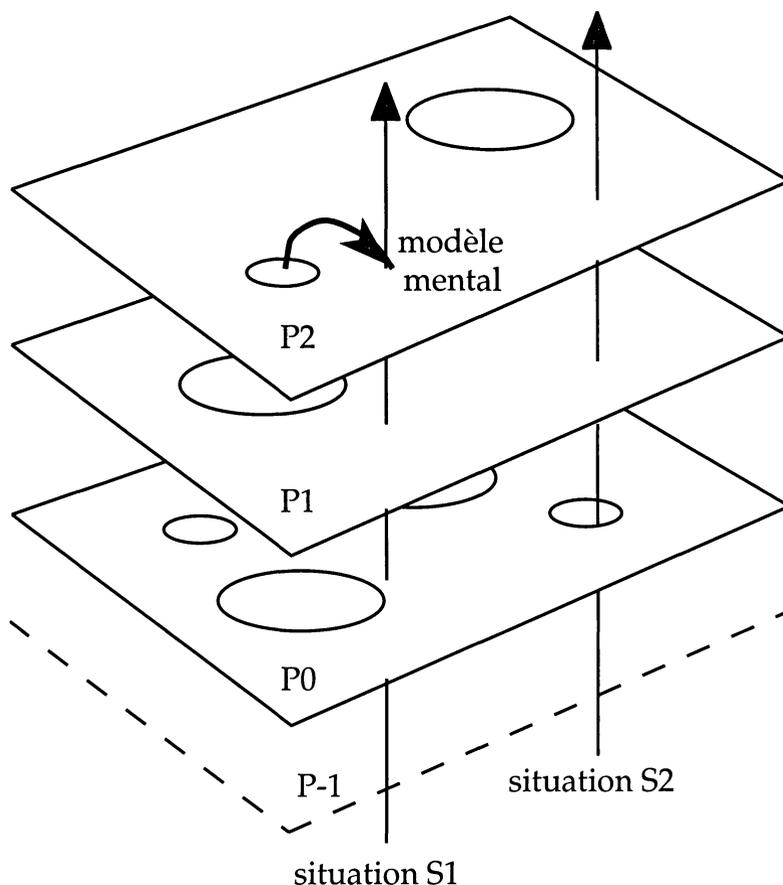


Figure 3 : Représentation symbolique des situations et des niveaux possibles de modélisation

Lorsqu'une même situation peut être «expliquée» par différents niveaux, il est intéressant de voir quel est le modèle mental (intersection situation-niveau de modélisation) qui est privilégié par l'élève. Notre modèle cognitif prend ainsi, graphiquement, l'allure d'un feuilletage hiérarchisé contenant les différents schémas de connaissance construits au cours de la scolarité d'un élève. Les plans P_0 , P_1 , P_2 , ..., peuvent correspondre, en première approximation, à des années de scolarité. Tel modèle est appris en seconde, tel autre en première, etc.

On peut aussi envisager l'existence d'un niveau de modélisation P_{-1} , constitué des schémas construits à l'occasion des expériences personnelles du sujet en dehors du système d'enseignement *stricto sensu*; les didacticiens ont quelquefois appelé «représentations spontanées» ces schémas construits dans des situations non didactiques.

Notons également que le terme de **niveau de modélisation** n'est pas nouveau en didactique des sciences physiques : A. Tiberghien (1994) propose une approche de la modélisation par les élèves sous forme de «niveaux» qui représentent plutôt des registres de référence (théorie, modèle, champ empirique). Le processus de modélisation étudié par cet auteur aboutit à l'élaboration, par l'élève, de modèles internes de raisonnement qui ne sont pas nécessairement, comme dans notre proposition, isomorphes aux modèles enseignés.

Nous allons maintenant contextualiser le modèle cognitif proposé dans quelques situations élémentaires de mécanique, et nous en servir pour conduire quelques interprétations.

3. SITUATION N°1 : SOLIDE SUR UN PLAN INCLINÉ

La situation choisie est très classique : un solide descend en glissant sans frottement le long de la ligne de plus grande pente d'un plan incliné après avoir été libéré sans vitesse initiale. On peut réaliser ces conditions expérimentalement en utilisant un aérobanc incliné ; le mobile se déplace alors sur un «coussin d'air». Sur la figure 4, nous avons représenté ce coussin d'air en laissant un espace entre le mobile et le support. Cette représentation est conforme à la majorité de celles que l'on trouve dans les manuels scolaires (voir par exemple : Baurant et al., 1987 ; Fontaine & Tomasino, 1987 ; Hébert et al., 1984).

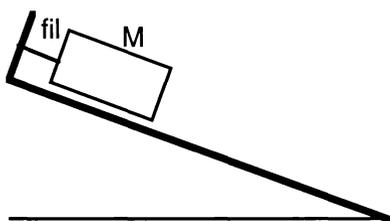


Figure 4 : Solide glissant sans frottement

L'analyse physique qui est faite de cette situation est la suivante : le mobile, une fois libéré de l'action du fil qui le retient, n'est plus soumis qu'à son poids **P**, constant, vertical dirigé vers le bas, et à l'action **R** de l'aérobanc sur le solide, constante et perpendiculaire à la surface de contact. La résultante de ces forces est (figure 5) :

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} + \mathbf{R}$$

Sous l'action de ces forces, le mobile est animé d'un mouvement dont l'accélération est a_G (G est le centre d'inertie du mobile). Le théorème du centre d'inertie s'écrit :

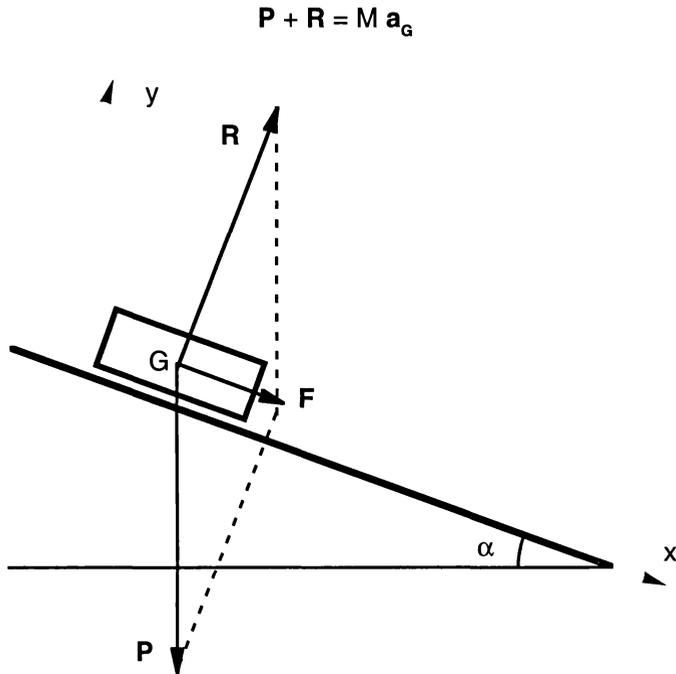


Figure 5 : Forces agissant sur le solide et résultante F (l'action R du plan a été reportée au centre de masse G pour les besoins de la construction)

On peut en déduire l'accélération du mouvement :

$$a_G = g \sin \alpha \text{ (g est l'intensité de la pesanteur)}$$

L'accélération est donc constante au cours du mouvement. La vitesse atteinte par le mobile en un point d'abscisse x est donnée par l'expression $v^2 = 2 a_G x$. Soit :

$$v = (2 g x \sin \alpha)^{1/2}$$

où l'on constate que la vitesse ne dépend pas de la masse du mobile. Dans ces conditions, des solides de masses différentes atteindront le bas du plan avec la même vitesse. On peut dire aussi que les temps de parcours de solides de masses différentes seront les mêmes.

3.1. Recueil des données

Nous avons demandé à des élèves, au cours d'entretiens individuels, de prévoir et de décrire le mouvement du mobile, placé sur un aérobanc incliné, lorsqu'on brûle le fil qui le retient. Nous ne disposions pas de matériel expérimental, le support utilisé pour les entretiens était le dessin de la figure 4.

Au cours de ces entretiens, nous avons posé à chaque élève les questions suivantes :

- «*Que se passe-t-il lorsqu'on abandonne sans vitesse initiale le mobile en haut du plan incliné ?*»
- «*Que peut-on dire à propos de son mouvement ?*»
- «*Justifier.*»

Onze élèves de terminale D (scientifique), issus de deux lycées différents ont été interrogés. Les entretiens, d'une durée de 20 à 30 minutes chacun, ont eu lieu à la fin de l'enseignement de mécanique de leur programme de physique et se sont déroulés sur environ deux mois. L'intégralité des entretiens a été enregistrée, puis retranscrite. Les réponses des élèves s'appuyaient sur des dessins de la situation sur lesquels ils pouvaient faire figurer les forces. Les 11 élèves concernés, 8 garçons et 3 filles, seront désignés dans la suite par les lettres G (garçon) ou F (fille) suivies d'un numéro.

3.2. Utilisation des modèles cinématiques

On constate que, de façon très générale (9/11), les premiers éléments de réponse décrivent le mouvement du solide sans utilisation des modèles scientifiques :

G1 : «*Le solide va glisser sur le plan incliné.*»

G3 et F3 : «*Le mobile descend.*»

F2 : «*Cet objet va tomber.*»

Ces réponses relèvent du sens commun. L'interviewer n'étant pas reconnu comme un enseignant par les élèves interrogés, ces derniers peuvent très bien fournir ce genre de réponse, même si des réponses plus scientifiques sont disponibles.

Au cours de la progression des entretiens, une majorité d'élèves (8/11) indique le caractère **constant** de l'accélération du mobile. La justification avancée réside dans le fait que la vitesse augmente, sans réaliser que ce n'est pas une condition suffisante pour que l'accélération soit constante (tous, sauf un, indiquent de manière explicite le fait que la vitesse augmente).

G1 : *«S'il accélère, il va être uniformément accéléré.»*

Il est vrai que la quasi totalité des mouvements rectilignes accélérés que les élèves ont étudiés au lycée sont uniformément accélérés.

Enfin, 4 élèves précisent que le solide, immobile au départ, possède également une accélération nulle, ce qui ne leur paraît pas incompatible avec le fait qu'il va y avoir mise en mouvement.

G2 : *«Au départ, le mouvement est immobile. Donc, il n'y a pas d'accélération, il n'y a pas de vitesse.»*

On repère des difficultés de séparation des vecteurs vitesse et accélération :

G4 : *«L'accélération, on fait la différence de vitesse sur le temps. Elle peut varier parce que le solide, il a ... sa vitesse augmente. Ou bien, c'est que l'accélération est une constante et sa vitesse doit être constante, alors.»*

G5 : *«Le vecteur accélération doit suivre le mouvement.»*

3.3. Utilisation des modèles dynamiques

Lorsqu'on demande aux élèves de préciser leur opinion au sujet des forces responsables du mouvement, l'analyse dynamique qu'ils font de la situation peut se résumer de la façon qui va suivre.

L'action du plan sur le solide (dite réaction), est parfois omise (3/11), ou bien considérée comme nulle (2/11). Les raisons invoquées sont :

– soit qu'il n'y a pas de frottements ;

G3 : *«La réaction, elle y est. Enfin, non. Il est autoporté.»*

– soit que cette force ne travaille pas, étant perpendiculaire au plan le long duquel se fait le mouvement.

G7 : *«Elle ne compte pas ! La réaction du support, elle est nulle puisqu'elle est perpendiculaire au déplacement.»*

En comparaison, le poids du solide semble valorisé par son rôle actif :

G7 : *«C'est une force qui travaille : si le solide accélère, c'est dû à son poids (...) qui l'entraîne plus rapidement. C'est-à-dire que son poids exerce un travail moteur.»*

Dans le cas de deux élèves (G4 et F2), nous avons constaté l'introduction d'une troisième force qui s'ajoute à \mathbf{P} et à \mathbf{R} , mais qui, en fin de compte, ne serait que la résultante $\mathbf{P} + \mathbf{R}$. Cette proposition offre l'avantage de présenter une force évidemment compatible avec le mouvement. Il leur est néanmoins difficile d'expliquer l'origine de cette force :

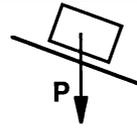
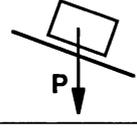
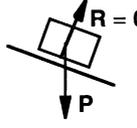
G4 : «Une force (...) due au mouvement du solide. Je ne vois pas comment l'expliquer.»

F2 : «Ben, R , c'est la réaction ... Non. C'est attiré ... Je ne sais pas comment le dire.»

On voit réapparaître cette force dans la deuxième partie de l'entretien :

F2 : «Il y aura une force, mais c'est la somme des ... Enfin, je veux dire, la force sera tangentielle ...»

Les principales réponses des 11 élèves interrogés oralement sont synthétisées dans le tableau 1.

	Mouvement rectiligne uniformément accéléré	La vitesse augmente	Relation accélération-vitesse	$A t = 0 :$	Bilan des forces
G1	OUI				
G2	OUI	OUI	$a = \frac{dv}{dt}$	$a = 0$ \Rightarrow $v = 0$	
G3	OUI	OUI		$v = 0$ et $a = g$	
G4		OUI	$a = \text{cte}$ \Rightarrow $v = \text{cte}$		
G5	OUI	OUI	variation de la vitesse	$v = 0$ \Rightarrow $a = 0$	
G6		OUI	variation de la vitesse	$v = 0$ \Rightarrow $a = 0$	
G7	OUI	OUI	$a = \frac{dv}{dt}$		

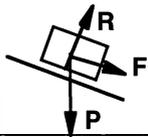
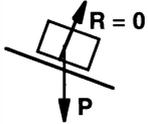
G8	OUI	OUI	$a = \frac{dv}{dt}$	$v = 0$ et $a = g$	
F1	OUI	OUI		a dépend de v	
F2				$a = 0$ \Rightarrow $v = 0$	
F3	OUI	OUI	$a = \frac{dv}{dt}$	$v = 0$ et $a = 0$	

Tableau 1 : Synthèse des réponses des élèves au cours des entretiens

3.4. Interprétation

Nous proposons maintenant une interprétation des réponses fournies par les élèves à ce problème généralement considéré comme facile, à l'aide de notre modèle feuilleté présenté au paragraphe 2. Nous considérerons deux situations :

- celle que nous étudions : un solide glissant sans frottement sur un plan incliné ;
- une situation de chute libre, prototype qui nous permet de faire des comparaisons avec la situation précédente.

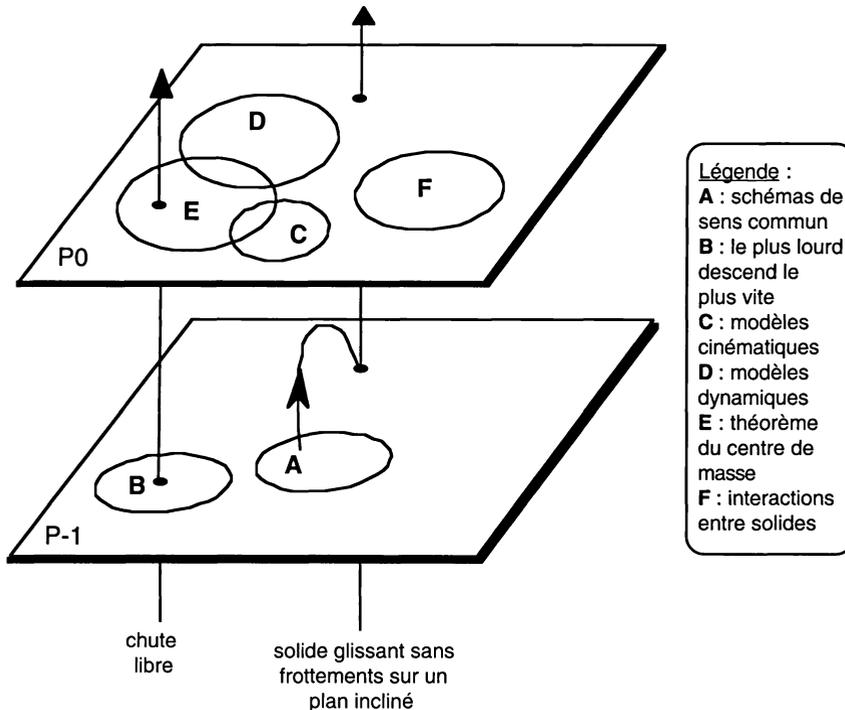


Figure 6 : Représentation des plans de modélisation pour la situation n° 1

Deux niveaux de modélisation peuvent être en cause (figure 6) : P_{-1} et P_0 .

– le niveau P_{-1} est celui des modèles naïfs, construits en dehors du système d'enseignement *stricto sensu*.

Nous pensons que les réponses très générales évoquées en 3.2. et 3.3. (*le solide va glisser sur le plan incliné ; le mobile descend, etc.*), la confusion possible entre force et vitesse, relèvent de schémas de connaissance élémentaires construits à l'occasion d'expériences personnelles des élèves, en dehors de tout contrat didactique. Nous situons ces schémas au niveau P_{-1} . Ils sont repérés par le cercle A.

En B, un schéma naïf classique : «le solide le plus lourd descend plus vite que le plus léger». Ce schéma se construit à partir de situations réelles, quand les frottements interviennent, mais peut aussi être intuitif. Comme nous le verrons dans la suite, ce schéma est instancié dans de nombreuses situations où se pose la question du rôle de la masse. La situation de chute libre est évidemment très adhérente au schéma B.

On constate que les explicitations demandées au cours des entretiens obligent les élèves à donner des réponses de niveau P_0 .

– le niveau P_0 est celui de la mécanique du point.

Il contient plusieurs schémas cinématiques et dynamiques : en C, le modèle de l'accélération comme taux de variation de la vitesse instantanée, $a = dv/dt$. En D, le modèle de la construction de la résultante de deux ou plusieurs forces. En E, le théorème du centre de masse. Aucun de ces schémas n'est correctement instancié dans la situation proposée.

On constate que ces modèles enseignés sont «détruits» :

– de la relation $a = dv/dt$, les élèves retiennent des inférences du type «si v augmente, alors a est constante», «à l'instant initial, $v = 0$ implique $a = 0$ et réciproquement» ;

– la construction de la résultante les amène à considérer la résultante comme une troisième force agissant sur le système.

Le théorème du centre de masse semble être acquis, mais son schéma est trop loin de la situation avec plan incliné, donc pas instancié.

Ces constatations nous ont amené à tracer l'axe représentant la situation étudiée (solide sur plan incliné) assez loin des schémas C, D et E.

4. SITUATION N°2 : SOLIDES LIÉS ENTRE EUX

On considère maintenant le cas de deux solides, (S) et (s), de masses différentes, respectivement M et m , reliés par un fil inextensible et sans masse, et dont on pourra intervertir les positions respectives (figure 7). Ces deux solides sont abandonnés sans vitesse initiale sur un plan incliné sans frottement (aérobanc).

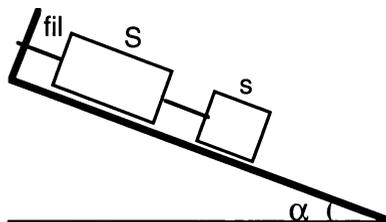


Figure 7 : Deux solides reliés par un fil et glissant sans frottement

Compte tenu du fait que les frottements sont négligeables, les mobiles placés sur le plan incliné sont animés tous deux de mouvements identiques au mouvement du mobile seul vu précédemment. En effet, le même raisonnement que celui tenu dans la question précédente peut être appliqué successivement aux solides (S) et (s).

Pour le solide (S), de masse M , on trouve $a_M = g \sin \alpha$ et pour le solide (s), de masse m : $a_m = g \sin \alpha$ également.

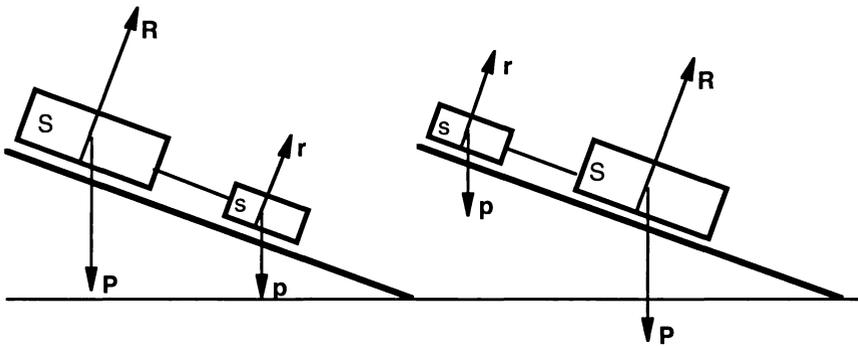


Figure 8 : Les deux situations expérimentales possibles

Une fois l'ensemble lâché, les deux mobiles se mettent en mouvement avec la même accélération, qui ne dépend pas de la masse. À tout instant, ils seront animés de la même vitesse et le fil qui les relie entre eux ne joue par conséquent aucun rôle, quelle que soit la façon dont les mobiles sont disposés entre eux (figure 8).

4.1. Recueil des données

Le fil joue ici un rôle perturbateur et permet de mettre à l'épreuve certains raisonnements tenus par les élèves. Pour les amener à préciser le rôle joué par le fil, on leur demande d'imaginer les mouvements du solide (S) tout seul et du même solide (S) lorsqu'on y a accroché le solide (s). Dans un premier temps, le solide le plus lourd est placé en amont, dans un deuxième, il est en aval. Enfin, pour certains élèves (F1, F3, G3), et dans le but de leur faire approfondir leurs raisonnements, on a même évoqué le cas où le solide le plus léger serait simplement posé sur le plus lourd. Les entretiens se sont déroulés sans matériel expérimental ; le support de questionnement utilisé est le dessin de la figure 7.

Les questions posées étaient les suivantes :

- «*Que se passe-t-il lorsqu'on abandonne sans vitesse initiale les deux solides reliés par un fil en haut du plan incliné, le plus léger en amont ?*»
- «*Qu'est-ce qui change si on place le plus lourd en amont ?*»
- «*Quel est le rôle du fil ?*»

4.2. Mouvement des solides

En étudiant les réponses obtenues au cours des entretiens, il ressort que, pour la majorité des élèves (8/11), le mobile le plus lourd va plus vite que le plus léger. Ceci est d'autant plus évident pour eux que le plus massif est situé en amont du plus léger.

G1 : *«Celui qui a la plus forte masse va rattraper celui qui a la plus faible. (...) Parce que le poids est plus important.»*

G6 : *«(S) étant plus lourd que (s), tous les deux vont avoir un mouvement rectiligne accéléré, mais (S) va sûrement rattraper (s).»*

De même pour l'association des deux :

F3 : *«Ils (le gros et le petit mobile) vont descendre plus vite (...) parce que la masse formée par les deux solides est plus importante.»*

Il semble que les élèves ne raisonnent qu'à partir du poids, qu'ils savent proportionnel à la masse, et non à partir de l'accélération qui, dans ce cas, ne dépend pas de la masse. C'est ainsi que l'on retrouve des raisonnements du type :

G8 : *«Tous les deux se déplacent (...) avec une accélération différente puisque l'accélération est en relation avec les forces, suivant la formule $F = m a$.»*

En fait, les élèves ne prennent plus en compte l'action **R** du plan sur le solide : 3 réponses seulement sur 11 mentionnent cette action du plan sur le solide (dont 1 pour signaler qu'elle est nulle) alors que, dans la situation précédente (un mobile sur le plan incliné), 8 élèves sur 11 la mentionnaient (2 indiquaient qu'elle était nulle). En aucun cas, il n'est fait mention de la relation vue en classe ($R = M g \cos \alpha$) entre cette action **R** et la masse du mobile.

Par contre, deux élèves, (G1 et G6), après avoir affirmé que le mouvement des deux solides sur le plan incliné n'est pas le même à cause de la différence des masses, soutiennent que si les solides étaient en chute libre, leurs mouvements seraient identiques car la masse n'intervient pas.

4.3. Rôle du fil de liaison

D'une manière générale, les élèves interrogés ont du mal à admettre que le fil, une fois les mobiles abandonnés, ne sert à rien.

G2 : *«Au départ, il est tendu. Après, il doit se resserrer, puisque ... ça va se rapprocher.»*

Ils ont plutôt tendance à attribuer un rôle actif à l'un ou à l'autre des solides.

Dans le cas où le solide (S) est en aval :

F3 : «*Le gros va entraîner le petit.*»

G8 : «*Le petit va freiner le grand.*»

On note fréquemment (F1, F3, G2, G4, G7) que le solide (S), le plus lourd, placé en amont, va rattraper, puis, éventuellement, pousser le plus léger et que, lorsqu'il est situé en aval, son rôle consiste à tirer le solide (s) qui, par conséquent, soit jouera le rôle de frein, soit ira plus vite que dans le cas précédent. La raison avancée reste l'influence du poids, donc de la masse, sur le mouvement des mobiles.

La plupart des élèves sont persuadés que, dans le cas où le solide (S) est en aval de (s), le fil reste tendu. Ils omettent cependant de tenir compte de la tension du fil dans le bilan des forces. L'action du fil sur les solides est un élément qui les dérange :

G3 : «*Normalement, les deux tensions sont les mêmes. [...] Et bé, elles vont s'annuler.*»

G6 : «*Je crois qu'elle n'est que d'un côté, la tension du fil.*»

Et même (G4) : «*Elle (la tension du fil) aura tendance à le pousser vers le haut, tiens !*»

Un élève propose une procédure de vérification expérimentale :

G5 : «*Oui, mais le fil ..., je ne sais pas si le fil exerce une force [...] Il faudrait pendant le trajet couper le fil pour voir si les deux s'écartent, se rapprochent ou continuent à la même distance.*»

Enfin, à la question : «*Le fil qui relie les deux masses, à quoi il sert ?*», la dernière élève interrogée (F3), répond : «*À nous faire tromper !* »

Les principales réponses aux questions posées au cours des entretiens sont résumées dans le tableau 2.

PLAN INCLINÉ	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	F1	F2	F3
Mouvements différents car poids (masses) différents	OUI	OUI	?	OUI		OUI	OUI	OUI	OUI	?	OUI
Un solide agit sur l'autre		OUI				OUI		OUI			OUI
Le fil exerce une action	OUI			OUI		OUI		OUI	OUI	?	OUI
Action du plan mentionnée		$R_n=0$						OUI	OUI		

Tableau 2 : Cas des deux solides reliés (résultats des entretiens)

4.4. Interprétation

Dans cette deuxième situation, on a pu constater que la grande majorité des élèves considère que le solide le plus lourd (S) descend le plan incliné plus rapidement que le plus léger (s). Pour eux, lorsque les mobiles sont reliés, soit le fil reste tendu lorsque (s) est en amont, soit (S) rattrape (s) lorsque ce dernier est en aval et le fil ne sert plus à rien.

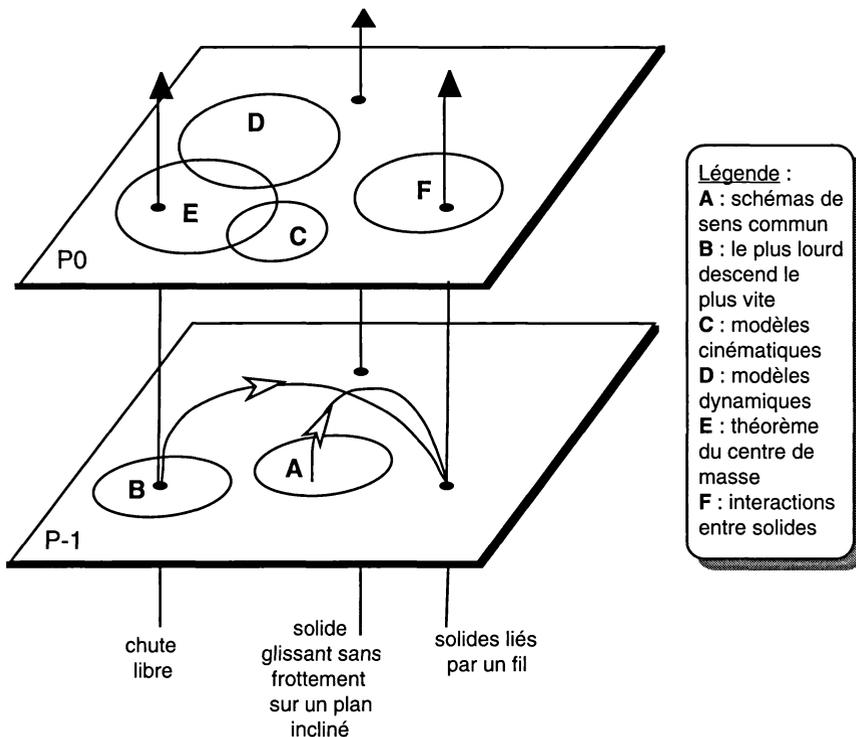


Figure 9 : Représentation des plans de modélisation pour la situation n°2

La représentation des plans de modélisation pour la situation n°2 est sensiblement la même que celle de la situation n°1 (figure 9). Nous avons figuré la nouvelle situation (solides liés par un fil) par un axe relativement éloigné des schémas existants. Il semble, en effet, qu'aucun des schémas disponibles ne soit proche de cette situation, ce qui rend leur instanciation difficile. Comme, de plus, les schémas présents sont relativement déstructurés, on ne doit pas être étonné du faible nombre d'interprétations correctes que les élèves sont en mesure de formuler :

– le niveau P_{-1} (modèles naïfs) est toujours bien présent, en particulier par son schéma B, «le plus lourd descend plus vite que le plus léger» qui est instancié dans pratiquement toutes les situations dans lesquelles des solides de masses différentes descendent des pentes, et par le schéma A traduisant la confusion entre force et vitesse ;

– le niveau P_0 est peu opératoire, bien que contenant les schémas suffisants pour interpréter la situation. On constate que les schémas «cinématiques» (C) ne sont plus instanciés pour laisser la place aux seuls schémas «dynamiques» (D et E), pour lesquels on note quelques rares instanciations. Le schéma F, correspondant à l'interaction entre solides, est celui qui est le plus mobilisé dans cette situation. Il permet d'expliquer les actions réciproques entre les solides glissants et le support, et l'interaction entre les deux solides *via* le fil de liaison (qui est nulle, comme nous l'avons montré). Comme c'est souvent le cas, ce schéma est instancié de manière incorrecte. D'une part, les élèves attribuent un rôle effectif au fil de liaison, d'autre part ils négligent complètement l'action du plan sur les mobiles.

5. SITUATION N°3 : PROBLÈME DE CHOCS

Nous avons souhaité proposer aux élèves une situation qui leur permettrait de développer des raisonnements simples, mais qui n'est pas étudiée dans le cadre scolaire. Nous avons choisi un problème de chocs afin de pointer les schémas qui seraient mobilisés dans ce cas.

Le problème, posé sous forme de question écrite, était libellé de la façon suivante :

Deux mobiles de masses différentes sont abandonnés à tour de rôle sans vitesse initiale depuis le haut d'un même plan incliné. Ils glissent sans frottements (figure 10).

Après un déplacement d le long du plan incliné, ils heurtent un obstacle fixe, fragile (brique, plaque de verre,...). On constate que le mobile le plus léger est arrêté par l'obstacle (éventuellement, il rebondit) alors que le plus lourd le brise.

Comment expliquez-vous cela ?

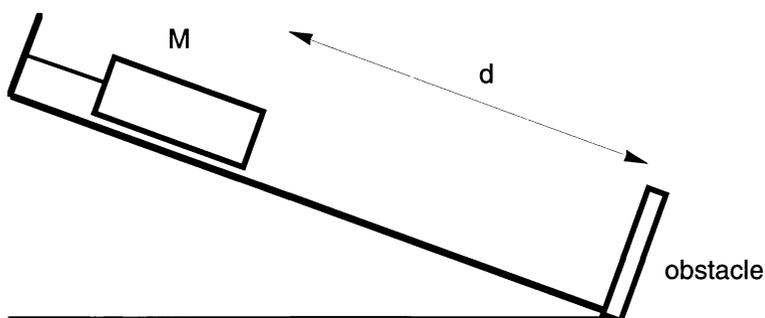


Figure 10 : Plan incliné avec obstacle

En «mécanique de la rupture», on peut interpréter la rupture de l'obstacle en termes d'énergie : énergie de rupture, caractéristique des dimensions et de la nature du matériau constituant l'obstacle, ou bien en termes de force : résistance de l'objet (à la compression, la traction, la flexion).

Dans le premier cas, l'obstacle se brise si l'énergie qu'il absorbe au cours du choc, énergie apportée par le mobile pendant une durée Δt suffisamment petite, est supérieure à son énergie de rupture.

Dans le deuxième cas, il est nécessaire de faire intervenir la notion d'impulsion, variation de la quantité de mouvement du projectile au cours de l'impact de durée Δt , et de la comparer à la résistance de l'obstacle.

5.1. Recueil des données

Répondre à cet exercice implique donc de décider de l'aspect, énergétique ou dynamique, du problème. Nous avons cherché dans les réponses en quels termes les élèves énoncent les conditions de rupture et pour quelles raisons le mobile le plus lourd arrive à briser l'obstacle et pas le mobile le plus léger.

Nous souhaitons repérer les ensembles de schémas relatifs soit à la notion d'énergie, soit à la notion de force, qui seraient mobilisés par les élèves, et éventuellement de pointer des recouvrements de ces ensembles.

Par exemple, si on considère l'énergie absorbée au cours du choc, l'obstacle doit être caractérisé par son énergie de rupture ; il faut la comparer à l'énergie acquise par chacun des mobiles.

Le problème a été posé, sous forme de test écrit, à 30 lycéens de terminale scientifique et 30 étudiants de première année d'université inscrits en DEUG A (diplôme décerné après les deux premières années d'études scientifiques à l'université). Dans ce qui suit, les lycéens seront désignés par la lettre (L) et les étudiants par (E). Les réponses ont fait l'objet d'une analyse de contenu thématique classique.

5.2. Force ou énergie ?

Le tableau 3 présente la synthèse des notions choisies par les répondants pour expliquer le problème.

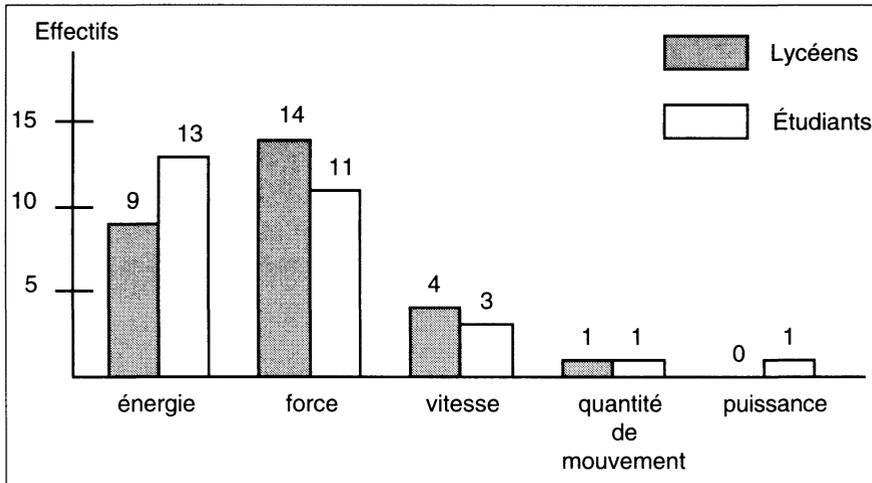


Tableau 3 : Synthèse des notions choisies par les répondants

Ce tableau montre effectivement que la voie «énergie» et la voie «force» apparaissent comme celles qui ont le plus séduit les élèves. On constate que 13 étudiants et 9 lycéens (38% des réponses) ont choisi de traiter ce problème sous l'angle de l'énergie et que 11 étudiants et 14 lycéens (43% des réponses) ont préféré l'aborder en termes de force ; 7 répondants (4L et 3E) en restent à un point de vue purement cinématique fondé sur la vitesse.

Détaillons chacun des deux ensembles, force ou énergie.

5.2.1. La force : point de vue dynamique

Dans les réponses en termes de force, on trouve des expressions telles que *la réaction*, *la résistance de l'obstacle*, *la force exercée par l'obstacle*, *la force acquise par le mobile*.

On peut lire également des expressions qui se rattachent à la notion de force : *impact moins violent, choc plus brutal, le solide va heurter l'obstacle plus doucement (ou plus violemment)*. Un étudiant fait mention d'une *force d'entraînement*.

Aucune des réponses utilisant ce point de vue n'est vraiment satisfaisante. Il est clair que la principale difficulté rencontrée consiste à déterminer l'origine de cette force «acquise» par le mobile et exercée sur l'obstacle. On peut y voir la manifestation de ce que Viennot (1979, 1996) appelle un «*capital de force*».

Ainsi, on constate différents groupes de réponses :

– cinq étudiants et huit lycéens indiquent que cette force est directement liée à la vitesse du mobile juste avant l'impact. Le raisonnement caractéristique chez ces élèves peut se résumer par : «*Si la masse est plus grande, alors la vitesse du mobile est plus élevée, donc la force (acquise ou exercée) est plus importante*» ;

– trois étudiants utilisent le théorème du centre d'inertie pour justifier le fait que la force exercée sur l'obstacle par le solide le plus lourd est plus importante. Par exemple :

$\Sigma F = m \cdot a$ donc, plus m est grand, plus ΣF est importante ou $T + P + R > M a$ (il semble que cet étudiant ait hésité entre $>$ et $=$) où T est la force exercée par l'obstacle ou encore, pour le mobile qui ne brise pas l'obstacle : $T + P + R = 0$;

– deux étudiants et un lycéen relient plus ou moins directement la force acquise par le mobile ou exercée par l'obstacle au poids du mobile : «*son poids est plus fort que la réaction créée par l'obstacle*» ou «*sa vitesse plus son poids vont détruire l'obstacle*» ;

– un étudiant et trois lycéens lient la force exercée sur l'obstacle à la masse des mobiles : «*la force exercée sur l'obstacle renforcée par la masse...*»

5.2.2. Point de vue énergétique

Comme le montre le tableau 3, sur les 60 répondants, 22 ont choisi la voie énergétique. Le tableau 4 donne la répartition des réponses de ces 22 répondants en fonction du type d'énergie invoqué.

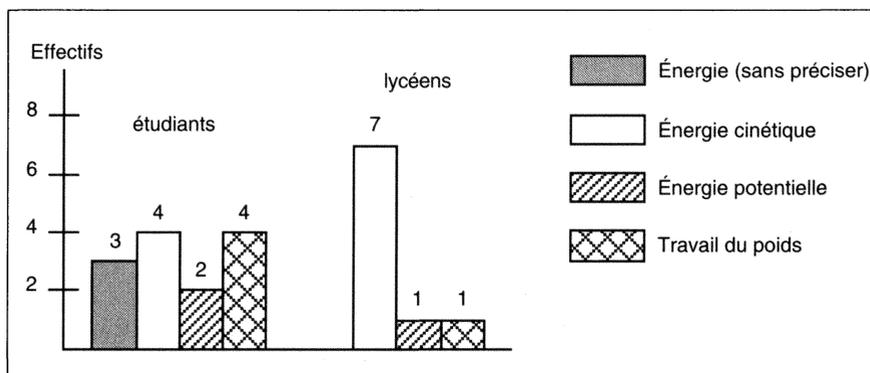


Tableau 4 : Répartition des réponses en fonction des types d'énergie

On remarque que les lycéens font appel principalement à l'énergie cinétique alors que les choix des étudiants se répartissent entre les différents types d'énergie possibles. Dans l'ensemble, nous avons pu considérer que seulement 2 parmi ces 22 réponses étaient correctement rédigées.

Les réponses suivantes sont caractéristiques des types d'énergie invoqués :

1) Trois étudiants (3E) parlent d'énergie en général (énergie, énergie mécanique). Certaines réponses sont clairement exprimées : «*énergie nécessaire, suffisante, trop petite, pour briser, casser l'obstacle, etc.*»

2) Onze répondants (4E et 7L) font intervenir l'énergie **cinétique** pour exprimer la condition de rupture de l'obstacle au moment de l'impact.

Parmi ceux-là :

– trois (2E et 1L) se bornent à affirmer que $E_c(M) > E_c(m)$ au moment de l'impact. «*Le mobile le plus lourd brise l'obstacle car l'énergie cinétique ($1/2 Mv^2$) absorbée par l'obstacle lors de l'impact est plus importante, car proportionnelle à la masse du corps*» ;

– quatre (2E et 2L) utilisent la chaîne causale erronée suivante, dont seuls le point de départ et la conclusion sont justes :

$M > m$ donc $V > v$ et, par conséquent $E_c(M) > E_c(m)$

où M , V et $E_c(M)$ représentent respectivement la masse, la vitesse et l'énergie cinétique du solide le plus lourd (m , v et $E_c(m)$ pour le plus léger) ;

– un étudiant fait mention de l'énergie cinétique **de l'obstacle** en voulant appliquer le théorème de l'énergie cinétique, sans préciser quel système il considère.

3) Trois répondants (2E et 1L) mettent en avant l'énergie **potentielle** initiale du mobile (en haut du plan incliné). Le mobile brise l'obstacle si cette

énergie est suffisante. Ces réponses précisent que $E_p(M) > E_p(m)$ sans fournir de justification. L'obstacle (*ne*) résiste (*pas*) à l'énergie potentielle.

4) Cinq répondants (4E et 1L) mentionnent le **travail du poids** des mobiles, celui du mobile le plus lourd étant plus important que celui du mobile le plus léger.

Un lycéen, en appliquant le théorème de l'énergie cinétique successivement à un mobile puis à l'autre, est arrivé à montrer (presque) correctement qu'ils ont la même vitesse à l'arrivée sur l'obstacle, mais que *«le choc avec l'obstacle sera plus important pour le mobile le plus lourd.»*

On relève la présence de la formule : $\Delta E_c = \Sigma W(\mathbf{F})$. Elle n'est pas assortie de justification sur la rupture de l'obstacle.

5.2.3. Autres explications

Trois autres grandeurs ont été utilisées par les élèves dans leurs explications.

Quatre lycéens et trois étudiants (soit 12% des réponses) donnent la vitesse du mobile comme critère de rupture de l'obstacle. À nouveau, il faut envisager l'hypothèse de l'existence d'une conception selon laquelle le mouvement est vu comme une force, et non comme le résultat d'une force (Viennot, 1979, 1996). Ainsi, on peut lire : *«...car son mouvement a acquis une plus grande force ...»* ou encore : *«le vecteur vitesse peut être plus important que la force qu'oppose l'obstacle.»*

Un lycéen et un étudiant expliquent les conditions de rupture en faisant intervenir la quantité de mouvement des mobiles : *«quantité de mouvement suffisante pour briser l'obstacle.»* En effet, tous les deux affirment que la quantité de mouvement $p = mv$ est plus grande pour le mobile le plus lourd, le lycéen rajoutant que, pour le mobile le plus léger, il s'agira d'un choc mou.

Enfin, un étudiant tient un raisonnement en termes de puissance : *« $P = F.v$... $P(P) = Mg.v$. Plus la masse M est grande, plus la puissance P augmente.»* Il n'a pu aboutir à une solution acceptable.

5.3. Interprétation

Dans le tableau 5, nous avons représenté (partiellement) les étapes de diverses explications rencontrées. Le mot FIN signale que la relation placée dans l'encadré juste précédent indique la condition de rupture. Les nombres indiqués sur les flèches représentent les effectifs des répondants ; on peut ainsi suivre les flux entre chaque étape de raisonnement. Les parcours grisés sont incorrects au sens du physicien : ce sont pourtant les parcours les plus importants numériquement.

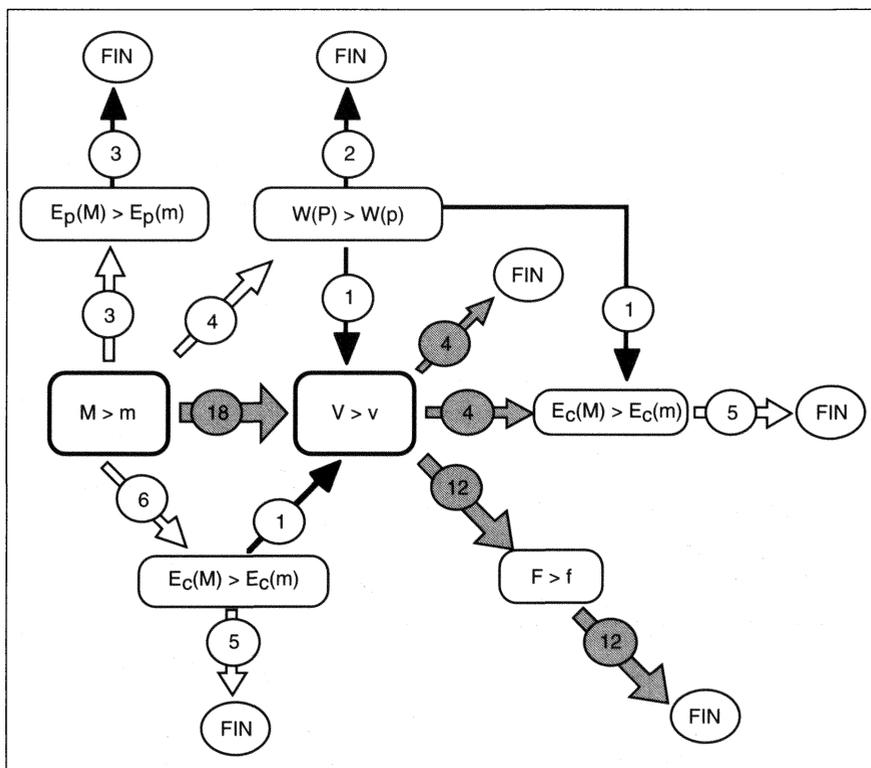


Tableau 5 : Étapes des explications données par les répondants

On peut constater immédiatement que, partant de la condition $M > m$, la comparaison des vitesses occupe une position centrale : 20 réponses partent de l'encadré $V > v$ sur les 31 réponses du départ. L'inégalité $V > v$, qui traduit le schéma naïf de niveau P_1 selon lequel « le mobile le plus lourd descend le plus vite », est donc encore instancié majoritairement sur cette situation.

Le tableau 5 montre que 4 répondants concluent leur raisonnement sur cette affirmation fautive ; 4 autres en tirent des conclusions (justes !) sur l'énergie cinétique des mobiles.

Le tableau montre aussi que les 12 réponses qui traduisent la condition de rupture de l'obstacle par $F > f$ appuient également cette affirmation sur la condition $V > v$. L'action exercée par le solide sur l'obstacle ne peut, dans ces conditions, qu'être le résultat d'une force acquise progressivement par le mobile au cours de sa descente. Comment imaginer et expliquer le processus d'acquisition de cette force sinon par le mouvement lui-même qui précède le choc ? Là encore, nous pensons pouvoir interpréter

ces réponses par l'instanciation d'un schéma de niveau P_{-1} : l'adhérence et la confusion force-vitesse.

Lorsque la condition de rupture est exprimée en termes d'énergie : $E_p(M) > E_p(m)$ ou $E_c(M) > E_c(m)$ ou de travail $W(P) > W(p)$, la difficulté semble résider dans la manière de caractériser l'obstacle lui-même. Le transfert d'énergie entre le mobile et l'obstacle n'est pratiquement jamais envisagé (2 réponses seulement en font état).

La figure 11 reprend notre proposition de modélisation en précisant la place que nous pourrions attribuer aux nouveaux schémas.

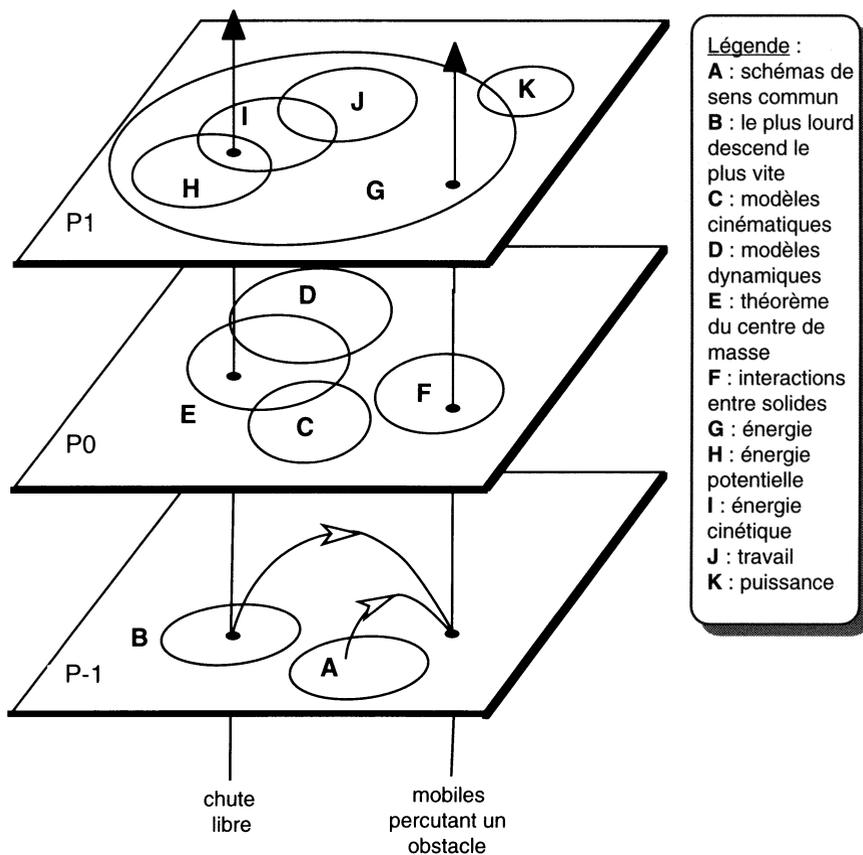


Figure 11 : **Représentation des plans de modélisation pour la situation n°3**

La situation proposée (mobiles percutant un obstacle) est assez éloignée de la situation prototypique (chute libre), ce qui est figuré par deux axes verticaux distants.

Le niveau P_{-1} , caractérisé par les modèles construits par l'élève, mais non scolaires, contient des schémas déjà rencontrés. Nous en spécifierons deux :

- en A : le schéma identifiant et confondant force et vitesse, particulièrement disponible dans cette situation où il est question de rupture d'un obstacle. Force et vitesse sont des concepts souvent mobilisés pour interpréter cette situation (32 fois sur 60) ;

- en B : le schéma naïf «le mobile le plus lourd descend le plus vite», très lié à la situation de chute libre, mais facile à instancier dans beaucoup d'autres situations de chute, du fait de sa faible structuration.

Le niveau P_0 contient les schémas déjà rencontrés dans les situations précédentes :

- en D, les modèles dynamiques, très peu opératoires dans cette situation, alors qu'ils pourraient donner des solutions convenables. Ces schémas nous paraissent relativement éloignés de l'intersection entre la situation et le plan P_0 . La confusion fréquente entre la force et la vitesse nous porte à inférer que ce sont plutôt des schémas de niveau P_{-1} qui seront instanciés lorsque la notion de force sera invoquée ;

- en E, le théorème du centre de masse, facile à instancier dans des situations prototypes comme la chute libre, mais peu opératoire pour les situations nouvelles, les répondants ne sachant pas à quel système appliquer ce théorème : doit-on ou non inclure l'obstacle dans le système ? Ce théorème fait intervenir la notion de force (résultante), mais les interprétations des répondants en termes de force viendront principalement du schéma B, de niveau P_{-1} .

Nous avons regroupé sur un niveau de modélisation P_1 l'ensemble des schémas relatifs à l'énergie, ces schémas correspondant à des modèles enseignés postérieurement aux notions cinématiques et dynamiques au cours de la scolarité.

- G est un schéma général relatif à l'énergie, assez étendu pour contenir d'autres schémas plus spécifiques (c'est donc un schéma de schémas), mais certainement peu structuré, donc peu opératoire ;

- H, I et J représentent plusieurs schémas relatifs à l'énergie ; ils correspondent à des modèles enseignés : énergie potentielle, énergie cinétique ou travail d'une force. Ces différents schémas ont des recouvrements, H et I étant très liés à la situation prototypique de chute libre. On peut considérer que la structuration de ces schémas est probablement faible puisque, dans la situation «mobiles percutant un obstacle», seulement 2 répondants sur 22 les ont correctement instanciés.

6. CONCLUSION

Le plan incliné est une situation qui, dans le cadre de l'enseignement de la mécanique, donne lieu à des problèmes considérés comme classiques, voire faciles. Pourtant, les questions que nous avons posées au cours des entretiens ou à l'occasion du test écrit révèlent que, dans l'esprit des élèves, tout n'est pas aussi clair que nous aurions pu l'espérer.

En fait, ce dispositif du plan incliné nous a servi à mettre à l'épreuve un modèle cognitif simple de l'apprenant, montrant graphiquement les dispositions relatives des schémas de connaissances, des niveaux de modélisation et des situations physiques traitées. Ce modèle a, pour l'instant, une visée descriptive et de clarification. Nous envisagerons ultérieurement des implications possibles de ce modèle pour l'enseignant et le formateur.

Trois situations physiques utilisant le plan incliné ont été proposées. Dans chacune de ces situations, nous avons montré la contextualisation possible de notre modèle. D'autres situations, en optique (Lefèvre & Escut, 1997) et en électricité (Lascours et al., 1997) ont été étudiées, qui laissent penser que ce modèle est assez général.

La situation n°1 (mobile descendant sur un aérobanc) nous a permis de mettre en évidence que :

- ce sont souvent les schémas de niveau P_{-1} qui sont instanciés lorsque l'on questionne un élève hors contrat didactique. Si la situation n'est pas une situation de classe, proposée par le professeur de cette classe, mais par un chercheur extérieur dont l'élève ne connaît pas forcément bien les intentions, il peut se contenter de réponses naïves issues de schémas élémentaires ;
- lorsque l'on incite l'élève à aller plus loin dans ses explications, c'est-à-dire lorsque l'on «force» le passage vers un niveau supérieur, on constate que les schémas présents à ce niveau peuvent être à l'origine de réponses incorrectes, soit par déstructuration du schéma (schéma mal compris ou partiellement oublié), soit par éloignement d'un schéma correctement appris de la situation proposée (l'élève ne saisit pas que c'est ce schéma qu'il conviendrait d'instancier).

La situation n°2 (mobiles reliés par un fil) a confirmé la première représentation et a apporté quelques éléments nouveaux :

- le passage de un à deux mobiles focalise l'attention de l'élève sur l'interaction entre les mobiles, laissant de côté l'interaction avec le plan incliné (l'aérobanc) ;
- on constate une augmentation du nombre de schémas dynamiques, faisant intervenir les forces, au détriment des schémas cinématiques, les notions de vitesse et d'accélération étant manifestement délaissées.

La situation n°3 (mobiles percutant un obstacle) a permis de montrer l'existence de schémas relatifs à l'énergie. Ces schémas sont plus diversifiés chez les étudiants que chez les lycéens, ce qui s'explique par la «re-vision» des modèles enseignés. Un niveau de modélisation P_1 permet de rendre compte de la localisation de ces nouveaux schémas. Nous avons montré, à cette occasion, qu'un schéma de niveau P_{-1} («le plus lourd descend plus vite que le plus léger») devait retenir notre attention, car il reste central dans pratiquement tous les raisonnements effectués sur cette situation.

D'une façon générale, nous avons constaté la difficulté rencontrée par la plupart des répondants à instancier des schémas sur des situations «exotiques», c'est-à-dire des situations éloignées des prototypes qui ont servi à la monstration. Lorsqu'ils sont forcés à répondre, les élèves font généralement appel au niveau de modélisation le plus bas qu'ils estiment encore maîtriser. Il est très rare de voir deux schémas différents instanciés pour expliquer une même situation ; il semble que le modèle mental formé au point d'instanciation s'accommode mal de solutions alternatives. Un choc est expliqué, soit par la notion de force, soit par la notion d'énergie, mais pas par les deux.

On peut penser qu'il existe un principe d'économie cognitive qui veut que l'élève se place préférentiellement sur le niveau qui lui permet de donner une réponse satisfaisante de son propre point de vue, en fonction de sa perception de la situation de questionnement.

Bien entendu, comme tous les modèles, celui que nous proposons a un champ de validité qui n'est pas extensible à l'infini. Nous ne pensons pas, par exemple, qu'il puisse permettre de traiter de raisonnements complexes, comme ceux mis en jeu dans la résolution de problèmes. Nous nous sommes prudemment limités à des schémas correspondants à des modèles enseignés (élémentaires) de physique pouvant être instanciés dans des situations de physique relativement élémentaires, elles aussi. Son intérêt réside dans sa simplicité de présentation et dans les multiples situations d'enseignement et d'apprentissage qu'il permet de traiter.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEVY P. (1994). *Le plan incliné*. Mémoire de DEA de Didactique des Disciplines Scientifiques. Toulouse, Université Paul Sabatier.
- BAUTRANT R., BRAMAND P., FAYE P., JAUBERT A. & THOMASSIER G. (1987). *Physique et chimie*. Paris, Hachette.
- FONTAINE G. & TOMASINO A. (1987). *Physique*. Paris, Nathan.
- HALBWACHS F. (1974). *La pensée physique chez l'enfant et le savant*. Neuchâtel, Delachaux et Niestlé.

- HÉBERT A., ECKERT A., HOFFER A., LAMARCHE M. & SCHWAB C. (1984). *Physique*. Paris, Bordas.
- JOHNSON-LAIRD P.-N. (1983). *Mental models*. New-York, Cambridge University Press.
- JOHNSON-LAIRD P.-N. (1993). La théorie des modèles mentaux. In M.-F. Ehrlich, H. Tardieu & M. Cavazza (coord.), *Les modèles mentaux. Approche cognitive des représentations*. Paris, Masson, pp. 1-22.
- JOHNSUA M.-A. & JOHNSUA S. (1987). Les fonctions didactiques de l'expérimental dans l'enseignement scientifique. *Recherches en didactique des mathématiques*, vol. 8, n° 3, pp. 231-266.
- LASCOURS J., LEFÈVRE R. & CALMETTES B. (à paraître). Difficultés d'étudiants à propos des circuits RC en courant alternatif. *Actes du 6^e séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Lyon.
- LEFÈVRE R. & ESCAUT A. (à paraître). Un modèle interprétatif de raisonnements simples d'étudiants : situations physiques et niveaux de modélisation. *Actes du 6^e séminaire national de recherche en didactique des sciences physiques*. Lyon.
- MARTINAND J.-L. (1995). Introduction à la modélisation. *Séminaire de didactique des disciplines technologiques*. Cachan, ENS, Association Tour 123, pp. 7-19.
- PIAGET J. (1967). *La psychologie de l'intelligence*. Paris, Colin.
- RICHARD J.-F. (1990). *Les activités mentales*. Paris, Colin.
- ROBARDET G. & GUILLAUD J.-C. (1994). *Éléments d'épistémologie et de didactique des sciences physiques*. Grenoble, IUFM.
- RUMELHART D.-E. (1978). *Schemata : the building blocks of cognition. Theoretical issues in reading comprehension*. Hillsdale, New Jersey, Erlbaum Associates.
- TIBERGHIE A. (1994). Modeling as a basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, vol. 4, pp. 71-87.
- VERGNAUD G. (1987). Les fonctions de l'action et de la symbolisation dans la formation des connaissances chez l'enfant. In J. Piaget, P. Mounoud & J.-P. Bronckart (dir.), *Psychologie*. Paris, Gallimard, pp. 821-844.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonner en physique*. Paris, De Boeck.