

Le frottement cinétique : analyse des raisonnements des étudiants

Helena CALDAS

Université Vitoria
Departamento de Fisica CCE
UFES Universidade Federal do E.S.
29069 Vitoria E.S., Brésil.

Édith SALTIEL

Université Paris 7
Laboratoire de Didactique de la Physique
dans l'Enseignement Supérieur
Tour 24 – 2, place Jussieu
75251 Paris cedex 05 case 7021, France.

Résumé

Le travail présenté ici étudie les modes de raisonnement d'étudiants de différents pays, confrontés à des situations physiques simples de frottement cinétique. La nature des raisonnements rencontrés, en présence de frottement solide sec, diffère profondément de celle que l'on rencontre avec des situations de mécanique habituelle. Les caractéristiques principales de ces raisonnements seront décrites et analysées. Les conséquences d'un tel travail, tant au niveau des perspectives de recherche qu'au niveau pédagogique, seront évoquées.

Mots clés : raisonnements, frottement cinétique, mécanique, enseignement.

Abstract

This paper presents work on ways of reasoning that students from different countries use when confronted with physical situations of sliding friction. The nature of the reasonings encountered in dry solid friction situations differ greatly from that of usual mechanical situations. The principal characteristics of these types of reasonings will be described and analysed. The consequences of this work will be discussed from the research as well as the pedagogical perspective.

Key words : reasonings, sliding friction, mechanics, teaching.

Resumen

El trabajo estudia los modos de razonamiento de estudiantes, de diferentes países, confrontados a situaciones físicas simples de frotamiento cinético. La naturaleza de los razonamientos encontrados, en presencia del frotamiento sólido seco, difiere profundamente de aquella que encontramos en situaciones de la mecánica habitual. Las características principales de estos razonamientos serán descritas y analizadas. Las consecuencias de este trabajo serán discutidas tanto a nivel de las perspectivas de investigación como a nivel pedagógico.

Palabras claves : razonamiento, frotamiento cinético, mecánica, enseñanza.

Les effets du frottement solide sec se manifestent à tout instant dans notre vie quotidienne : c'est grâce au frottement que nous pouvons marcher, rouler en voiture, coudre, travailler à notre bureau sans que ce dernier ne glisse et sans que les livres qui se trouvent dessus ne tombent... Et pourtant dans la plupart des pays l'enseignement général aborde très peu ces phénomènes. Est-ce parce que les lois du frottement solide sec sont des lois phénoménologiques (empiriques) ? En effet, il n'existe pas actuellement de modèle microscopique physique pour ce type de phénomène (Baumberger et al., 1994) : en chaque point d'une région, appelée surface de contact, des forces s'exercent sur le solide étudié mais seule la résultante des forces peut être déterminée à l'aide de lois empiriques. De plus, ces lois diffèrent selon qu'il y a ou non glissement au contact d'une surface par rapport à l'autre, c'est-à-dire selon que le frottement est cinétique ou statique. Nous avons voulu savoir comment les étudiants raisonnent lorsqu'ils sont confrontés à des situations de frottement cinétique, comment le phénomène frottement lui-même est compris et comment les étudiants utilisent, dans des situations de frottement, les lois de Newton : verra-t-on jaillir les mêmes types de raisonnement qu'en dynamique élémentaire, trouvera-t-on une association force-vitesse, comment seront localisées les forces de contact, comment sera appliquée la loi des actions réciproques pour des actions de contact, etc. ?

De façon générale, dans l'enseignement français on parle peu du frottement solide, mais on en parle tout de même : les forces de frottement étaient, jusqu'en 1993, introduites en classe de seconde, comme exemples de forces de contact, puis en première comme exemples de forces dissipatives. Au lycée, aucune distinction n'est faite entre frottement cinétique et frottement statique ; tout comme à l'université, sauf dans des enseignements spécialisés de mécanique du solide. Dans la grande majorité des exemples choisis dans l'enseignement, il s'agit de forces résistantes qui s'opposent au mouvement et qui freinent (Caldas, 1994). L'idée principale transmise par l'enseignement de la physique est cette idée de freinage, de phénomène résistant et non de phénomène « positif », c'est-à-dire d'un phénomène pour lequel la force de frottement peut être à l'origine du mouvement d'un objet. Ainsi, par exemple, le chapitre concernant l'étude de ces phénomènes est intitulé « résistance au mouvement ». Dans ce qui suit, nous nous intéresserons uniquement aux forces de frottement **cinétique**. Les lois phénoménologiques du frottement solide sec qui permettent de connaître la résultante (\vec{f}) des forces de frottement cinétique (ou dynamique) qui s'exerce sur un solide sont les suivantes :

- la norme de cette force est égale à $\mu_c N$ où N est la composante normale de la résultante des forces de contact exercée sur le solide étudié et μ_c , le coefficient de frottement cinétique ;
- le sens de cette force est opposé à celui de la vitesse relative de glissement au contact de l'un des solides par rapport à l'autre.

Dans la plupart des manuels, une force de frottement cinétique est déclarée s'opposer au mouvement, sans préciser le référentiel dans lequel est défini ce mouvement : dans le meilleur des cas, les auteurs parlent en termes de mouvement relatif des surfaces, mais les exemples et les exercices proposés sont tels que le solide étudié se déplace, dans le référentiel étudié, sur une surface fixe ; ainsi mouvement relatif et mouvement du solide dans le référentiel considéré sont identiques (Caldas, 1994).

Une enquête auprès d'étudiants d'horizons divers a été entreprise dans le but de dégager les grandes tendances d'ensemble des raisonnements. L'essentiel des résultats concernant le frottement cinétique sera exposé ici.

1. QUESTIONNAIRES

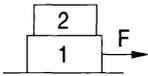
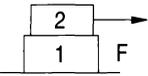
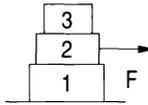
Le frottement étant majoritairement présenté comme un phénomène dissipatif et résistant, donc « négatif », nous avons voulu confronter les élèves à une situation physique pour laquelle la seule force qui permette d'expliquer le mouvement d'un des objets étudiés est la force de frottement, et voir comment ils analysent cette situation.

Trois questionnaires «papier crayon» ont été posés à 442 personnes réparties de la façon suivante :

- 214 étudiants brésiliens, essentiellement de première année d'université,
- 48 espagnols, professeurs de lycée en stage de formation continue,
- 131 français de première et deuxième année d'université,
- et enfin 49 étudiants portugais d'un enseignement pré-universitaire technique.

Au total, des cultures et des formations très différentes. Tous ces étudiants ont, au moment de la passation, étudié les forces de frottement d'un point de vue élémentaire. Les étudiants brésiliens utilisaient comme manuel de référence celui de Resnick et Halliday (1979), les français, celui de Alonso et Finn (1970) ou de Le Bellac (1985), ou tout autre manuel similaire du point de vue du frottement, comme les étudiants portugais ; ceci signifie que ces populations sont assez semblables du point de vue de l'enseignement reçu, ce qui a été vérifié lors du dépouillement des questionnaires.

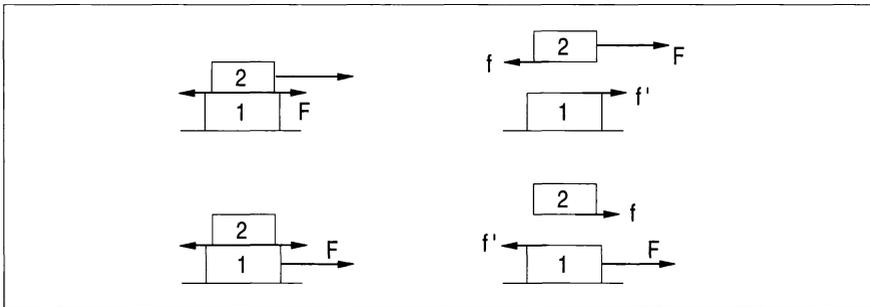
Les situations proposées sont très similaires et assez scolaires, seules les questions posées le sont un peu moins. Ces situations sont schématisées dans l'encadré 1, ainsi que les questions posées (en annexe, se trouve l'énoncé complet de l'un des questionnaires).

Questionnaire A ₁	Questionnaire A ₂	Questionnaire C
		
<p>On exerce une force \vec{F} constante sur l'un des blocs et on constate que les blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre. On suppose que le seul coefficient de frottement négligeable dans le problème est celui qui correspond au contact table, bloc qui repose dessus.</p> <p>Trois types de questions :</p> <p>1 - Dessiner sur le schéma toutes les forces qui s'exercent sur chacun des blocs.</p> <p>2 - Pour chaque bloc, il est demandé :</p> <ul style="list-style-type: none">- quelles forces s'exercent sur lui ?- quel est le sens du mouvement de ce bloc par rapport à la table ?- la force de frottement qui s'exerce sur lui s'oppose-t-elle ou non au mouvement de ce bloc par rapport à la table ? <p>3 - On augmente le frottement entre deux blocs ; y a-t-il modification du mouvement par rapport à la table de chacun de ces deux blocs ?</p>		

Encadré 1 : **Énoncé des questionnaires**

Dans toute la suite, pour éviter toute ambiguïté de langage, la composante tangentielle de toute force de contact (ici, il s'agit de forces horizontales) sera appelée force de frottement ; le bloc sur lequel l'expérimentateur exerce la force constante \vec{F} , le bloc moteur, et tous les autres, les blocs passifs¹. À une interface de contact correspondent ainsi deux forces de frottement \vec{f} et \vec{f}' qui, d'après la loi des actions réciproques, sont telles que $\vec{f} = -\vec{f}'$, chacune s'exerçant sur un bloc différent.

Pour bien mettre en évidence le fait que ces forces s'exercent sur des objets différents, tout en étant localisées au niveau de la surface de contact, nous avons inscrit sur les figures de l'encadré 2 le schéma habituel et des schémas « éclatés », c'est-à-dire des schémas sur lesquels les objets en contact sont artificiellement séparés. De plus, pour ne pas surcharger les figures, nous n'avons dessiné que les seules forces horizontales. Ainsi, le sens de la force de frottement s'exerçant sur le bloc moteur est opposé à celui de la force \vec{F} , et opposé à celui du sens du mouvement de ce bloc par rapport à la table. Le sens de la force de frottement s'exerçant sur le bloc passif est en revanche le même que celui du mouvement de ce bloc par rapport à la table.



Encadré 2 : **Bilan des forces horizontales**

La résultante des forces de frottement, contenue dans le plan tangent à la surface de contact, s'oppose au mouvement relatif de glissement au contact d'un solide par rapport à l'autre. Par la suite, nous appellerons mouvement relatif, le mouvement relatif de glissement des deux blocs en leurs points de contact, et mouvement effectif, le mouvement d'un bloc par rapport à la table.

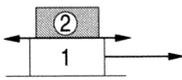
1 Ainsi, le bloc moteur est, dans la situation du questionnaire A₁, le bloc n° 1 et, dans les situations des questionnaires A₂ et C, le bloc n° 2. Les blocs passifs sont le bloc 2 pour le questionnaire A₁, le bloc 1 pour le questionnaire A₂ et les blocs 1 et 3 pour le questionnaire C.

2. RÉSULTATS

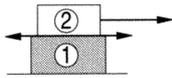
2.1. Schémas de forces

La majorité des étudiants (et ceci quel que soit le pays d'origine) ne dessine qu'une seule force de frottement (**63,5 %**), force que nous appellerons **force solitaire**. 79 % de ces forces solitaires sont en sens opposé à \vec{F} , contre 19 % dans le même sens que \vec{F} .

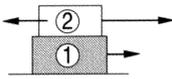
Une minorité (31,5 %) dessine deux forces de frottement, c'est-à-dire les deux forces \vec{f} et \vec{f}' , forces que nous appellerons «**mariées**» pour bien indiquer qu'elles obéissent à la troisième loi de Newton et qu'il existe donc une relation entre elles. Très peu d'étudiants ayant dessiné des forces mariées (10 % environ) déclarent que la force de frottement agissant sur le bloc passif a un rôle moteur pour ce bloc. Lorsque c'est le cas, les justifications sont claires, comme le montrent ces quelques citations² :



«La force de frottement ne s'oppose pas au mouvement de (2). Cette force **produira le mouvement** du bloc, car, sur le bloc (2), on a $\Sigma F_x = f_2 = m_2 a_2$.»



«Le bloc de masse m_1 , se déplace vers la droite dans le sens de la force de frottement de (2) sur (1). La force de frottement ne s'oppose pas, au contraire, **c'est la responsable du mouvement.**»



«La force de frottement sur le bloc (1), c'est exactement **la force qui lui imprime le mouvement** ; elle ne s'oppose donc pas au mouvement. Si cette force n'existait pas, le bloc (2) se déplacerait librement sur m_1 , et m_1 , resterait immobile.»

Deux questions se posent à ce niveau :

– que représente pour les étudiants la force unique dessinée ? A-t-elle été construite à partir de \vec{F} , comme force qui s'oppose à \vec{F} ? A-t-elle été construite pour expliquer le mouvement d'un des blocs ? Dans ce cas, sur quel(s) objet(s) agit-elle ? Un seul, les deux ?

– que représentent les deux forces dessinées lorsqu'une d'entre elles n'est pas déclarée être la responsable du mouvement du bloc passif ?

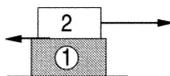
² Pour ne pas surcharger les figures, nous n'avons jamais dessiné le support sur lequel reposent les deux blocs. Pour que le lecteur n'ait pas à se reporter en permanence à l'énoncé du questionnaire, nous avons systématiquement hachuré, sur le schéma qui accompagne chaque citation, le bloc sur lequel porte la question.

2.2. Effet dessous-dessus (effet DD)

L'ensemble des résultats obtenus s'explique si on admet que, pour les étudiants, la résultante unique dessinée des forces de contact n'agit que sur **l'un** des objets en contact, **celui qui se trouve au-dessus de l'interface**, ce que nous avons appelé effet dessous-dessus (effet DD).

Cet effet est très bien explicité par les étudiants lorsqu'on leur demande si la modification du frottement entre deux blocs change ou non quelque chose dans le mouvement, par rapport à la table, de chacun des deux blocs (question 3).

56,5 % des étudiants déclarent que la force de frottement **n'agit pas** sur le bloc **du dessous**, comme l'illustre cette citation :



«Le mouvement de (1) ne changera pas car le frottement de ce bloc avec le sol ne change pas. Seul le mouvement de (2) sera modifié puisque l'augmentation du frottement avec (1) va provoquer une plus grande difficulté par rapport au déplacement de (2).»

Pour cet étudiant, la force de frottement solitaire n'agit que sur le bloc 2, c'est-à-dire celui qui se trouve au-dessus de l'interface de contact, interface où il existe un coefficient de frottement. En revanche, pour que le mouvement du bloc inférieur soit modifié, il faudrait, toujours pour cet étudiant, qu'il y ait frottement entre ce bloc et le sol, c'est-à-dire à l'interface qui se trouve en dessous de lui.

Avec le questionnaire des trois blocs, la question porte sur une modification du frottement entre les blocs 2 et 3. On trouve également des réponses où cette modification ne peut pas modifier le mouvement de (2) car :

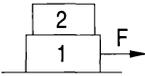
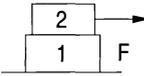
«Pour modifier le mouvement de (2), on devrait augmenter le frottement entre (1) et (2), donc seul le mouvement de (3) sera modifié.»

«Non, le mouvement de (2) ne sera pas modifié si on augmente le frottement entre (2) et (3) parce que le frottement n'agit pas sur m_2 mais il agit sur m_3 .»

«Le mouvement de (2) ne sera pas modifié parce que \vec{F} est constante et ne dépend pas des forces situées au-dessus de m_2 .»

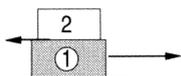
La comparaison des résultats et des justifications obtenus à la question portant sur le mouvement du bloc moteur dans chacun des questionnaires A_1 et A_2 montre bien l'existence de cet effet (encadré 3). En effet, 97,5 % des étudiants répondent que la force de frottement s'oppose au mouvement effectif (par rapport à la table) du bloc moteur lorsque ce dernier est le bloc supérieur (2) (questionnaire A_2), alors que seulement 46,5 % donnent ce

type de réponse lorsque le bloc moteur est le bloc inférieur (1) (questionnaire A₁).

	Questionnaire A ₁	Questionnaire A ₂
		
force de frottement s'oppose au mouvement du bloc moteur	46,5%	97,5%

Encadré 3 : Sens de la force de frottement et du mouvement du bloc moteur

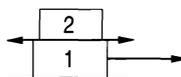
Les justifications qui accompagnent les réponses « \vec{f} ne s'oppose pas au mouvement du bloc » (53,5 % des réponses) sont très explicites. Citons-en une, à titre d'illustration :



« Pas du tout, étant donné qu'il n'existe pas de frottement sous le bloc m_1 , celui-ci est donc libre de tout mouvement (frottement $sol/m_1 = 0$). La force de frottement qui existe sur m_1 ne joue aucun rôle quant au mouvement de celui-ci. »

Cette citation est très explicite : la force de frottement solitaire n'a d'effet que sur l'un des solides en contact, celui qui se trouve **au-dessus** de l'interface de contact.

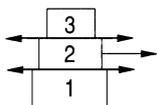
On rencontre cet effet chez bon nombre d'étudiants qui ont dessiné deux forces de frottement, c'est-à-dire des forces mariées, comme l'indique cette citation :



« Le mouvement de (2) changera parce que la force qui interfère [intervient] dans son mouvement va augmenter. Le mouvement de (1) ne changera pas parce que, malgré l'augmentation de la force de frottement sur ce bloc, **cette force ne conditionne pas son mouvement** (forces symétriques). »

Cet étudiant reconnaît à la fois l'existence d'une force de frottement sur le bloc moteur et son absence d'effet sur ce même bloc, car ce bloc se trouve en dessous de l'interface de contact où il y a frottement : c'est un autre aspect de l'effet DD.

Nous trouvons également des étudiants qui dessinent deux forces à une interface (forces mariées) ; mais ces deux forces agissent sur le même objet, celui qui se trouve au-dessus de l'interface, comme l'indique cette citation d'un étudiant qui a répondu au questionnaire des trois blocs :

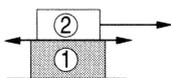


«Le bloc (3) peut rester immobile si $\vec{F} = \vec{f}_{23}$ car sur m_3 on a \vec{f}_{23} qui s'oppose au mouvement et \vec{f}_{32} qui l'entraîne vers l'avant.»

Apparemment, les deux forces dessinées à l'interface entre les blocs 2 et 3 ne concernent que le bloc 3, c'est-à-dire le bloc qui se trouve au-dessus de l'interface de contact.

L'existence de cet effet permet de rendre compte d'une grande partie des schémas de forces. En effet, la majorité des forces dessinées sont solitaires et localisées à l'interface (une force de frottement unique par interface). Quand par hasard cette force unique est localisée sur l'un des blocs, c'est toujours sur le bloc qui se trouve au-dessus de l'interface (19 % des forces de frottement solitaires), jamais sur le bloc du dessous. Dans le même ordre d'idées, nous constatons que toutes les composantes normales des forces de contact solitaires (87 % des forces dessinées) sont dirigées du bas vers le haut et jamais dans l'autre sens : il s'agit sans doute du même type de phénomène.

Une autre manifestation de cet effet se rencontre lorsque les étudiants, ayant dessiné des forces mariées, veulent expliquer le mouvement par rapport à la table du bloc passif, ici le bloc 1 :



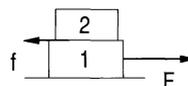
«Le bloc (1) se déplace dans le même sens que m_2 parce que le frottement sol/ $m_1 = 0$. Ce mouvement se produit à cause **des** frottements qui **tendent à unir** les blocs.»

Pour cet étudiant, deux arguments sont mentionnés : l'absence de frottement entre le bloc 1 et la table (effet DD) et une liaison entre les deux blocs, ce qui va nous amener à parler d'un autre résultat : l'effet d'entraînement.

2.3. Mouvement du bloc passif : effet d'entraînement

La majorité des étudiants trace, pour une interface donnée, une force unique de frottement qui n'agit que sur le bloc du dessus et qui est de sens contraire à la force \vec{F} , force exercée par l'expérimentateur. Aucun étudiant ne met en doute le résultat indiqué dans le questionnaire, à savoir «les deux blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre». De plus, la quasi-unanimité des étudiants déclare que le bloc passif se déplace, par rapport à la table, dans le même sens que celui du bloc moteur. Les étudiants, selon le type de questionnaire, se trouvent confrontés à des difficultés de nature légèrement différente.

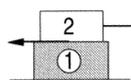
En effet, les schémas que l'on trouve avec le questionnaire A₁ sont, dans leur majorité, du type de celui indiqué sur la figure ci-contre. À cause de l'effet DD, la force dessinée n'agit que sur le bloc du dessus (bloc 2). Donc la seule force exercée sur (2), pour les étudiants, est une force de sens contraire à celui du mouvement (par rapport à la table) du bloc.



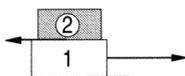
Comment expliquent-ils alors le mouvement de ce bloc (initialement au repos) vers la droite (mouvement parfaitement accepté par l'ensemble des étudiants), alors qu'il n'est soumis qu'à une seule force, qui se trouve être de sens contraire à celui du mouvement ?

Avec le questionnaire A₂, la force \vec{F} s'exerce sur le bloc supérieur et la force de frottement solitaire n'agit, pour les étudiants (effet DD), que sur ce bloc. Au total, aucune force n'est appliquée sur le bloc passif : comment, là encore, expliquent-ils le mouvement de ce bloc (initialement au repos) vers la droite, alors qu'aucune force ne s'exerce sur lui ?

Un élément de réponse à ces deux questions est donné par ces justifications :

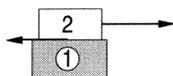


«Il est étrange de considérer que m_1 bouge par rapport à la table sauf si la masse m_2 entraîne m_1 dans son sens et donc la force de frottement s'oppose au mouvement.»

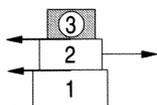


«Oui, la force de frottement empêche que le bloc m_2 se déplace en sens contraire de \vec{F} et par conséquent la masse m_2 a une tendance à suivre le mouvement de m_1 , à cause du frottement.»

C'est donc le frottement, et non une force de frottement s'exerçant sur le bloc, qui est responsable de sa tendance à suivre le mouvement du bloc moteur. On pourrait penser que les étudiants s'imaginent que les deux blocs sont entièrement solidaires. Il n'en est rien, comme le montrent ces citations :



«Le sens de déplacement de (1) est aussi vers la droite quand on tire le bloc (2), **ce bloc amène le bloc (1) avec lui à cause du frottement entre les deux blocs. Le bloc (1) aura une vitesse plus petite que le bloc (2) parce qu'il a une masse plus grande et parce qu'il n'y a pas de force qui agit directement sur lui.**»



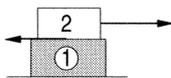
«Le bloc (3) se déplace car il existe **des frottements entre les blocs (2) et (3) ; m_2 bouge et entraîne nécessairement m_3 (ces frottements les rendent en partie solidaires).**»

Un exercice numérique, correspondant à la situation du questionnaire A₁, a été donné à 21 étudiants de première année de DEUG scientifique

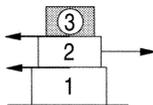
(première année d'université en France) ; dans cet exercice sont données les valeurs numériques des masses de chacun des deux blocs, de la force exercée par l'expérimentateur, ainsi que celle de «la» force de frottement. Les étudiants doivent calculer l'accélération de chacun des blocs et préciser le sens de déplacement du bloc passif par rapport à la table. Quatorze étudiants seulement vont jusqu'au bout et **tous** calculent des accélérations différentes pour les deux blocs, tracent une force solitaire localisée à l'interface et dirigée en sens contraire de \vec{F} . Sur ces quatorze étudiants, deux déclarent (alors que la question n'était pas posée) : «*le bloc (2) se déplace vers la droite par rapport à la table*», et donnent pour valeur de l'accélération du bloc passif (bloc 2) l'expression « $a_2 = \frac{f}{m_2}$ ».

D'après les réponses fournies, tout se passe comme si l'existence d'un frottement entre les blocs suffisait à expliquer l'entraînement du bloc passif par le bloc moteur sans que ne s'exerce sur lui une force de frottement dans le sens du mouvement. Les blocs sont déclarés «être liés», «unis», «rester accrochés», «adhérer»...

Certains étudiants (qui représentent à peine un quart de ceux qui répondent que le bloc passif se déplace vers la droite et qui ont dessiné une force de frottement en sens contraire), sans doute gênés par l'absence de force dans le sens du mouvement, transfèrent la force exercée par l'expérimentateur, le frottement fonctionnant alors comme «un pont de transmission» de cette force :



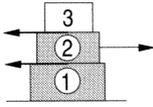
«À cause du frottement entre les blocs, le mouvement de m_1 sera le même que celui de la force \vec{F} sur m_2 . S'il existait un frottement entre m_1 et la table, le frottement serait de sens contraire au mouvement de m_1 . Le bloc m_1 se déplace seulement à cause du frottement avec (2) (parce que les surfaces adhèrent les unes aux autres) **puisque le frottement fonctionne comme un pont de transmission**. On ne peut pas oublier que m_1 se déplacera librement sur la surface sur laquelle il repose tout en accompagnant donc le sens de la force \vec{F} sur (2).»



«Le bloc (3) se déplace vers la droite car le frottement entre m_2 et m_3 va transférer la force \vec{F} sur le bloc (3).»

Nous trouvons le même type de phénomène avec le questionnaire numérique : quelques étudiants trouvent que l'accélération du bloc 2, différente de celle du bloc 1, vaut : $a_2 = \frac{F-f}{m_2}$.

Notons enfin que cette explication en terme d'entraînement peut coexister sans problème avec l'effet DD, comme le montre cette citation :



Q2 : «Le bloc (1) se déplace par rapport à la table parce qu'il est entraîné par le déplacement du bloc (2) où s'applique la force \vec{F} , à cause **des frottements entre** (1) et (2).» (effet d'entraînement)

Q4 : «Si on augmente les frottements entre les blocs (2) et (3), seul le mouvement de (3) sera modifié. Le mouvement du bloc (2) reste inchangé parce que ce bloc est seulement soumis à la force \vec{F} et aux frottements entre (1) et (2) qui sont les mêmes.» (effet DD)

2.4. Sens de «la» force de frottement

La majorité des forces dessinées sont des forces solitaires et de sens opposé à celui du sens du mouvement du bloc considéré. Très peu d'étudiants acceptent l'idée qu'une force de frottement puisse être motrice, la majorité d'entre eux pensant qu'elle s'oppose toujours au mouvement (il s'agit bien sûr du mouvement effectif du bloc concerné, c'est-à-dire du mouvement par rapport à la table).

Pour beaucoup, il n'y a aucun doute : ils écrivent, en effet, que «*la force de frottement s'oppose au mouvement du bloc **par définition***», ou encore que «*la force de frottement s'oppose au mouvement de (2) puisqu'elle est toujours contraire à la force qui tire ou qui pousse un corps vu que cette force est une **force de résistance***».

Cependant l'effet DD et l'effet d'entraînement sont suffisamment forts pour que les étudiants, pour le questionnaire A₁ et certaines questions du questionnaire C, déclarent que la force de frottement sur le bloc inférieur soit n'existe pas, soit, si elle existe, n'a aucun effet.

3. MODÈLE ÉTUDIANT

À partir de l'ensemble des résultats, il est possible de donner une description unificatrice du modèle étudiant :

Le phénomène de frottement de glissement entre deux solides est représenté par UNE résultante unique, localisée en général à l'interface des deux solides, qui a UN sens bien défini (opposé au mouvement effectif du solide étudié) et UNE orientation de l'action (toujours du dessous vers le dessus).

*Le frottement fonctionne comme s'il existait, entre les solides en contact, un «lien» qui assure une certaine «adhérence» entre les surfaces des solides en contact. Cette «adhérence» a **deux fonctions** : d'un côté, elle **freine** le mouvement des solides et, de l'autre, elle permet au solide «passif» d'être **entraîné** par le solide «moteur» sans qu'il ne s'exerce explicitement sur lui une force dans le sens du mouvement.*

4. CONSÉQUENCES

Les résultats et le modèle décrits ici appellent quelques commentaires, tant au niveau de la recherche qu'au niveau de l'enseignement.

4.1. Conséquences au niveau de la recherche

On retrouve ici des difficultés, bien décrites par ailleurs, sur les changements de référentiels (McDermott, 1984 ; Saltiel, 1980). En effet, le sens de la force de frottement est connu à partir du moment où l'on connaît le mouvement relatif des deux blocs en leurs points de contact. Or des études ont montré que les étudiants ne définissent pas les mouvements des solides dans des référentiels puisqu'ils ne considèrent que des mouvements « vrais », « réels », c'est-à-dire des mouvements auxquels on peut trouver une cause dynamique (dans le cas des situations étudiées, les mouvements effectifs ou encore les mouvements des blocs par rapport à la table) ; les mouvements relatifs étant, lorsqu'ils sont reconnus exister, considérés comme des mouvements apparents, voire des illusions d'optique. Donc, il n'y a rien d'étonnant à ce que le mouvement relatif d'un bloc par rapport à l'autre ne soit pas pris en compte et que toute force de frottement s'oppose au mouvement vrai ou effectif du solide étudié et non à un mouvement relatif qui, disent les étudiants, est « une illusion » puisque non « défini physiquement ».

Un résultat surprenant : les raisonnements observés sont *a priori* incompatibles avec ceux qui ont été mis en évidence par différents chercheurs, en particulier ceux du LDPES (Viennot, 1979 ; Rozier, 1988) lors de situations de dynamique élémentaire. En effet, les étudiants expliquent ici le mouvement d'un objet (initialement au repos) sans qu'aucune force dans le sens du mouvement de l'objet ne s'exerce explicitement sur lui. Rappelons qu'en dynamique, les étudiants considèrent qu'« un mouvement dans un sens implique une force dans le même sens », ce raisonnement apparaissant surtout lorsqu'il est possible, dans la situation physique proposée, de se représenter les mouvements, ou encore lorsque les mouvements présentés semblent être incompatibles avec les forces en jeu.

Ici, nous nous trouvons dans des situations où la seule force reconnue s'exercer sur l'objet étudié est soit en sens contraire du mouvement du dit objet, soit inexistante. Les étudiants doivent concilier LA propriété d'une force de frottement qui, pour eux, s'oppose toujours au mouvement, avec une explication qui permette de rendre compte du mouvement de l'objet. Nous sommes donc dans une autre catégorie de situations et de questions qui amènent à des raisonnements spécifiques. La différence essentielle entre les situations de dynamique et celles étudiées ici est l'existence d'un frottement et par suite d'un support sur lequel se déplace l'objet étudié.

Ce rôle du support a été mentionné par Ogborn (1993), qui pense qu'il existe deux caractéristiques essentielles du mouvement, à savoir «*l'effort*» et «*le support*», le support pouvant intervenir comme cause de non-mouvement mais aussi comme cause de mouvement. Par ailleurs, Law (1990), en étudiant les idées des élèves sur les causes du mouvement, rencontre fréquemment une structure de base qui «*comprend deux objets, le couple agent-patient : l'un fournit une substance qui assure la médiation de la cause (force) et l'autre qui en subit l'influence, ce qui entraîne son mouvement*».

Il est clair que l'existence d'un frottement amène les étudiants à le traiter comme un lien ou une substance qui assure la médiation de la cause du mouvement et qui permet à l'objet étudié d'être entraîné. Il paraît souhaitable de voir si d'autres situations d'entraînement sont analysées de la même façon par les étudiants, mais ceci est un autre travail.

4.2. Conséquences pour l'enseignement

À la lecture de ces résultats, tout enseignant se doit d'être vigilant vis-à-vis de ces problèmes. Il apparaît crucial de dire et d'expliquer qu'une force de frottement solide peut être aussi bien motrice que résistante, et de ne pas laisser entendre implicitement qu'une force de frottement ne permet jamais la propulsion. Mais ceci ne suffit pas : nous avons constaté que la loi des actions réciproques n'est pas vraiment appliquée, ce qui n'est pas une grande surprise, compte tenu des résultats déjà observés (Ménigaux, 1986 ; Viennot, 1989). Mais il est surprenant de constater que lorsque deux forces sont dessinées (apparemment bonne application de la loi des actions réciproques), ces deux forces agissent sur le même objet !

Concernant l'enseignement, L. Viennot préconise l'utilisation de schémas éclatés (c'est-à-dire de schémas où les objets en contact sont dessinés séparément afin que les forces en jeu soient appliquées sur le bon objet). L'avantage de ce type de schéma est clair : les étudiants sont en effet obligés de localiser chaque force sur un seul objet et d'associer, à toute force, son vis-à-vis qui, lui, se trouve localisé sur un autre objet (soit celui avec lequel il est en contact, soit celui avec lequel il est en interaction à distance). Ce dernier point paraît important car nous avons constaté que les étudiants brésiliens, à qui les enseignants ont introduit les schémas éclatés, mais sans les associer systématiquement à l'application de la loi des actions réciproques, et sans accompagner cette construction d'une analyse qualitative de la situation étudiée, ont répondu aux questionnaires, pour lesquels les schémas étaient éclatés, comme leurs collègues français et portugais.

Il ressort de ceci qu'il est important, semble-t-il, de bien indiquer sur quel objet agit chaque force, de faire une analyse physique de la situation et d'insister sur la loi des actions réciproques en traçant toujours des forces mariées, c'est-à-dire en cherchant systématiquement le partenaire ou le vis-à-vis de chaque force solitaire. Ceci suppose que les promoteurs de programmes fixent des objectifs pédagogiques clairs par rapport aux difficultés soulevées ici.

Un mot enfin sur l'aspect «changements de référentiels». En France, les promoteurs de programmes ont l'habitude de dire (et d'écrire) qu'il «*faut faire sentir aux étudiants la nécessité de se placer dans un référentiel*». En fait, cette nécessité est souvent comprise comme une obligation, voire un «dada» d'enseignant, sans qu'aucune expérience ou contre-expérience puisse permettre de saisir cette nécessité. Il se trouve qu'ici, la force de frottement cinétique est de sens opposé à celui d'un mouvement relatif, et que cette force a une réalité physique assez forte puisque, dans les exemples étudiés, c'est elle et elle seule qui permet de rendre compte du mouvement, dans un référentiel donné, de l'objet. Nous voudrions plaider en faveur de l'introduction des forces de frottement solide en étudiant dans différentes situations le sens de cette force, ce qui devrait aider à prendre conscience de la nécessité de savoir dans quel référentiel on raisonne.

5. CONCLUSION

Cette étude sur les modes de raisonnement montre qu'il existe encore des domaines de la physique pour lesquels nous ne connaissons pas très bien les façons dont les étudiants raisonnent. Sur ce thème, il reste encore beaucoup à faire : interroger des élèves plus jeunes n'ayant encore reçu aucun enseignement de physique et voir si on retrouve des germes de ces raisonnements, étudier l'aspect historique de la question, avoir plus d'informations sur l'effet dessous-dessus, chercher s'il existe d'autres situations physiques que celles étudiées ici pour lesquelles la cause du mouvement d'un objet n'est pas dynamique. En particulier, il s'agit de voir si de tels raisonnements se rencontrent uniquement avec des situations physiques de frottement, ou si on en trouve aussi dans des situations où interviennent des forces de liaison.

Les raisonnements décrits ici sont largement partagés par une population très variée : c'est, nous semble-t-il, un argument pour que soient prises en compte dans l'enseignement toutes ces difficultés. Par ailleurs, l'analyse de manuels réalisée à l'occasion de cette étude (Caldas, 1994) montre que leurs auteurs ne prêtent guère attention à ces raisonnements et bien souvent participent à renforcer leur existence. Espérons que ce type de travail enrichira la réflexion que mènent tous les pays sur les objectifs de l'enseignement.

BIBLIOGRAPHIE

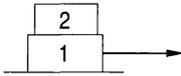
- ALONSO M. & FINN E.J. (1970). *Physique générale, Tome 1*. Montréal, Éditions du Renouveau Pédagogique.
- BAUMBERGER T., RONSIN O., HESLOT F. & PERRIN B. (1994). Dynamique du frottement solide : un système modèle. *Bulletin de la Société Française de Physique*, n° 94, pp. 3-6.
- BAUMBERGER T., HESLOT F. & PERRIN B. (1994). Crossover from creep to inertial motion in friction dynamics. *Nature*, vol. 367, pp. 544-546.
- CALDAS H. (1994). *Le frottement solide sec : le frottement de glissement et de non glissement. Étude des difficultés des étudiants et analyse de manuels*. Thèse, Université Paris 7.
- LAWN N. (1990). *Eliciting and understanding commonsens reasoning about motion*. PhD Thesis, University of London.
- LE BELLAC M. (1985). *Introduction à la mécanique*. Paris, Belin.
- McDERMOTT L.C. (1984). Research on conceptuel understanding in mechanics. *Physics Today*, n° 37, pp. 24-32.
- MÉNIGAUX J. (1986). La schématisation des interactions en classe de Troisième. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 683, pp. 761-778.
- OGBORN J. (1993). Approches théorique et empirique de la causalité. *Didaskalia*, n° 1, pp. 29-47.
- OGBORN J. & GUTTERIEZ R. (1992). A causal framework for analysing alternative conceptions. *International Journal of Science Education*, vol. 14, n° 2, pp. 201-220.
- RESNICK R. & HALLIDAY D. (1979). *Mécanique Physique 1*. Ottawa, Éditions du Renouveau Pédagogique.
- ROZIER S. (1988). *Le raisonnement linéaire causal en thermodynamique classique élémentaire*. Thèse, Université Paris 7.
- SALTIEL É. & MALGRANGE J.-L. (1980). Spontaneous ways of reasoning in elementary mechanics. *European Journal of Physics*, vol. 1, pp. 73-80.
- VIENNOT L. (1979). *Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire*. Paris, Hermann.
- VIENNOT L. (1989). Bilan des forces et loi des actions réciproques. Analyse des difficultés des élèves et les enjeux didactiques. *Bulletin de l'Union des Physiciens*, n° 716, pp. 951-969.

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier B. Perrin pour la lecture attentive et critique de cet article ainsi que tous les collègues qui ont accepté de passer des questionnaires.

ANNEXE

Questionnaire A₁



Un bloc de masse m_2 repose sur un bloc de masse m_1 , le tout reposant sur une table horizontale. On exerce une force F constante sur l'un des blocs et on constate que les blocs se déplacent l'un par rapport à l'autre. Il existe un frottement entre les deux blocs. Le coefficient de frottement qui correspond au contact table, bloc qui repose dessus est supposé négligeable.

Questions :

- 1 – Dessiner sur le schéma les forces auxquelles sont soumis les deux blocs.
- 2 – La force de frottement sur le bloc de masse m_1 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de ce bloc ? Justifiez votre réponse.
- 3 – La force de frottement sur le bloc de masse m_2 s'oppose-t-elle ou non au mouvement de ce bloc ? Justifiez votre réponse.
- 4 – On augmente le coefficient de frottement entre m_1 et m_2 . Cela va-t-il changer le mouvement du bloc de masse m_2 , celui du bloc de masse m_1 ? Justifiez votre réponse.