

Le frottement statique : analyse des raisonnements des étudiants

Static friction : students' ways of reasoning

Helena CALDAS

Departamento de Física-CCE
UFES-Universidade Federal do E.S.
29069 Vitória, E.S. Brésil.

Édith SALTIEL

Laboratoire de Didactique des Sciences Physiques
Université Denis Diderot - Paris 7
Case courrier 7086, 2 place Jussieu
75251 Paris cedex 05, France.

Résumé

Le travail présenté étudie les modes de raisonnement des étudiants confrontés à des situations de frottement statique. Les caractéristiques principales de ces raisonnements sont décrites, analysées et sont comparées à celles observées précédemment à l'occasion de situations de frottement cinétique. Sont enfin évoquées des suggestions pédagogiques et des perspectives de recherche.

Mots clés : *raisonnement, frottement statique, frottement solide sec, mécanique, enseignement.*

Summary

This paper presents work on ways of reasoning that students use when confronted to physical situations of static friction. The principal characteristics of these type of reasoning will be described, analysed and compared with those observed in situations of kinetic friction. Some pedagogical and research perspectives are mentioned.

Key words : *reasoning, static friction, dry friction, mechanics, teaching.*

Resumen

El trabajo presentado estudia los modos de razonamiento de los estudiantes confrontados a situaciones de frotamiento estático. Las características principales de estos razonamientos son descritas, analizadas y comparadas con las observadas anteriormente en situaciones de frotamiento cinético. Finalmente se presentan sugerencias pedagógicas y algunas perspectivas de investigación.

Palabras claves : *razonamiento, frotamiento estático, frotamiento sólido seco, mecánica, enseñanza.*

INTRODUCTION

Dans un précédent article (Caldas & Saltiel, 1995), ont été décrits les raisonnements des étudiants lorsqu'ils étaient confrontés à des situations physiques de frottement cinétique. Nous avons montré que tout se passe comme si le raisonnement des étudiants s'appuyait sur les éléments suivants :

- une force de frottement est, pour la grande majorité des étudiants, une force qui s'oppose au mouvement (certains allant jusqu'à écrire que « *La force de frottement s'oppose au mouvement du bloc **par définition*** » ;
- à une interaction de contact correspond, pour les étudiants, une seule force (et non deux, c'est-à-dire une sur chacun des objets qui sont en contact). De plus, cette force « unique » de contact n'agit, pour les étudiants, que sur un seul objet. Dans les situations de frottement cinétique étudiées, les deux objets en contact étaient situés l'un au-dessus de l'autre et la force unique agissait sur l'objet qui se trouvait au-dessus de l'interface de contact.

Depuis, d'autres situations ont été étudiées (en particulier des situations où les surfaces en contact sont verticales) et les résultats (Besson,

1997) obtenus montrent que, pour les étudiants, il n'y a toujours qu'une seule force de frottement qui s'exerce sur un seul objet (en général, celui sur lequel un agent extérieur agit). L'objet sur lequel aucune force de frottement ne s'exerce est déclaré être entraîné par frottement.

Lorsqu'il y a frottement cinétique, il y a glissement et donc une vitesse relative de glissement. Dans ce cas, le sens de la force de frottement est lié au sens de cette vitesse relative. Or, lors de notre étude sur le frottement cinétique, nous avons constaté que les étudiants ne déterminaient pas le sens d'une force de frottement à l'aide de cette vitesse relative de glissement. Il nous a semblé intéressant de regarder ce que faisaient les étudiants lorsqu'ils étaient amenés à résoudre des problèmes de frottement statique : quel(s) mouvement(s) privilégieraient-ils ? Raisonneraient-ils comme pour les situations de frottement cinétique ?

Par ailleurs, au lycée, la distinction entre frottement cinétique et frottement statique, lorsqu'elle existe, est très sommaire. Il en est de même dans la plupart des cours de mécanique de première année d'Université, à l'exception des cours spécialisés de mécanique du solide. Les exemples choisis dans l'enseignement étaient, jusqu'aux modifications des programmes français en 1993, dans la grande majorité des cas, des exemples où ces forces sont des forces résistantes qui s'opposent au mouvement, des forces 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 pouvant être à l'origine du mouvement d'un objet. Prenons un exemple : pour une voiture, on lit fréquemment, dans les manuels, que « *le couple moteur sert à vaincre le frottement* » et exceptionnellement « *c'est la force de frottement qui permet à la voiture d'avancer* ». Les étudiants différencient-ils ces deux types de frottement ?

1. QUELQUES RAPPELS SUR LES LOIS DU FROTTEMENT STATIQUE OU FROTTEMENT DE NON GLISSEMENT

Rappelons tout d'abord que le frottement statique, tout comme le frottement cinétique, ne se manifeste qu'à partir du moment où une force extérieure au système physique considéré lui est appliquée. Si cette condition n'est pas remplie, il n'existe aucun frottement entre les solides en contact ; dans ce cas, les résultantes des actions de contact sont normales à chacune des surfaces en contact et les composantes tangentielles de ces résultantes (appelées habituellement forces de frottement) exercées sur chacune de ces surfaces sont nulles.

De façon générale, il y a frottement statique lorsque la **vitesse relative de glissement** des points (lignes ou surfaces) des solides en contact **est nulle**.

La force de contact, lorsqu'il y a un frottement statique, est contenue à l'intérieur d'un cône de demi-angle au sommet α_s donné par l'expression

$$\operatorname{tg} \alpha_s = \mu_s = \frac{|\vec{f}_s|_{\max}}{|\vec{N}|}$$

où μ_s est le coefficient de frottement statique qui est toujours supérieur à μ_c (coefficient de frottement cinétique), et N la norme de la composante normale de la résultante des actions de contact. Cette expression donne la valeur maximum que peut prendre la norme de cette force, ce qui correspond au cas où le mouvement relatif entre les points, lignes ou surfaces en contact est imminent. À part ce cas extrême, la norme de cette force est *a priori* totalement inconnue et varie entre 0 et $f_{s\max}$. Par ailleurs, le sens de la composante tangentielle de cette force de frottement, contrairement à celle du frottement cinétique, ne peut pas être défini à l'aide de la vitesse relative de glissement puisque cette dernière est nulle. De plus, la seule donnée des différents mouvements des solides en contact ne permet pas de connaître le sens de cette force : il est, tout autant que la norme, inconnu *a priori*, contrairement à ce qui se passe pour les forces de frottement cinétique. En effet, les forces de frottement statique sont orientées de telle sorte qu'elles s'opposeront toujours à cet éventuel glissement relatif (en absence de frottement). Il existe des situations physiques pour lesquelles il est facile de prévoir qualitativement le sens du mouvement de glissement relatif en absence de frottement et donc d'en déduire les sens des forces de frottement statique ; mais ce n'est pas toujours le cas. On est alors obligé d'avoir recours aux équations dynamiques, supposer un sens arbitraire pour la force de frottement et trouver, par le calcul, le sens de cette force.

Depuis quelques années, on trouve dans la littérature des articles sur la tribologie : Barquins (1991), Bowden & Tabor (1959) et Baumberger et al. (1994). Il ressort de ces études que les coefficients de frottement statique et cinétique dépendent très peu de la nature des surfaces de contact, tant que l'on reste dans des conditions de frottement sec, c'est-à-dire sans lubrification. Le contact « réel » entre deux surfaces planes est constitué d'un grand nombre de micro-contacts dont l'aire totale est très inférieure à l'aire apparente de contact, micro-contacts essentiellement dus au fait que les surfaces en regard présentent des aspérités. Bowden & Tabor ont montré le rôle important joué par l'état mécanique de déformation des aspérités. Les contraintes locales au niveau des contacts jouent un rôle essentiel : les contraintes locales, sources des forces de frottement, sont générées par le déplacement microscopique relatif local des contacts (les micro-contacts sont déformés tout d'abord élastiquement puis plastiquement, sur une

distance de l'ordre du micron, avant de rompre). En s'opposant toujours à ce déplacement local, elles peuvent être soit créatrices de mouvement de l'objet étudié soit résistantes. Le gros problème est d'avoir des informations sur ces déplacements relatifs locaux, pour en déduire ensuite des informations sur les forces de frottement.

2. LE FROTTEMENT STATIQUE ET LES ÉTUDIANTS

Le frottement statique est peu étudié en tant que tel dans l'enseignement général. Lorsque c'est le cas, la majorité des exemples étudiés concerne des objets sur lesquels on exerce une force et qui restent immobiles à cause du frottement statique. Les solides étudiés sont toujours au repos par rapport au support sur lesquels ils reposent (d'où le terme de statique, sans doute) : une armoire que l'on veut déplacer en la poussant et qui ne bouge pas, un bateau en équilibre sur un plan incliné, un crayon qui reste immobile sur un cahier que l'on déplace, etc.

Hélène Richoux (1996) a proposé à 130 étudiants (76 étudiants de première année d'université et 54 lycéens de 1^{ère} scientifique (17-19ans), tous ayant étudié la mécanique) des situations de frottement statique mettant en jeu, comme pour le frottement cinétique, des mouvements de translation afin de voir si, en changeant la nature du frottement, les réponses changeaient (un énoncé de ces questionnaires est donné en annexe). Hélène Richoux a constaté que les étudiants et les lycéens répondaient de la même façon à ces questionnaires, justifiant leur réponse en déclarant que « *la force de frottement s'opposait au mouvement de l'objet* », tout comme les étudiants qui ont été confrontés à des situations de frottement cinétique. Les réponses fournies à la dernière question du questionnaire sont assez illustratives puisque, pour la majorité des étudiants, passer d'un frottement statique à un frottement cinétique ne change rien.

Cependant, il y a d'autres situations de frottement statique, celles pour lesquelles le solide étudié est en mouvement par rapport au support avec lequel il est en contact : ce sont toutes les situations **de roulement sans glissement**, puisque roulement sans glissement signifie vitesse relative de glissement au contact nulle. Il se trouve que ces situations sont non seulement très quotidiennes (puisque tout ce qui roule avance, en première approximation, grâce à ce type de frottement), mais aussi très étudiées dans l'enseignement, même si les manuels ne parlent pas de situations de frottement statique à leur sujet. Ce sont de telles situations que nous avons étudiées, c'est-à-dire des situations pour lesquelles la vitesse relative de glissement est bien nulle alors que l'objet qui roule sans glisser a un mouvement tout à fait observable.

2.1. Le questionnaire de la voiture (V_1)

Nous avons donc voulu voir si, pour les étudiants, les forces de frottement statique peuvent aussi bien provoquer un mouvement que le freiner et si elles sont déterminées par le seul mouvement observé du solide sur lequel elles agissent.

Le mobile étudié est une voiture qui a ses roues motrices à l'avant. Cette voiture est arrêtée sur une route horizontale et il est demandé de dessiner les forces de frottement qui s'exercent sur les roues motrices de la voiture dans deux cas différents : dans le premier cas (cas A), la voiture est en panne et son conducteur la pousse ; dans le deuxième (cas B), la voiture n'est plus en panne, le conducteur monte dans sa voiture, met le contact et démarre. L'énoncé se trouve dans l'encadré 1.

ENCADRÉ 1

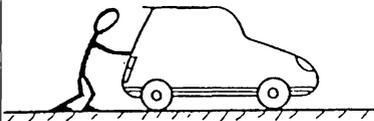
Une voiture ayant ses roues motrices à l'avant, se trouve sur une route horizontale dont la surface est rugueuse. On veut étudier les forces en jeu dans les deux situations suivantes :

cas A : la voiture, en panne, est poussée par son conducteur ;

cas B : le conducteur entre dans la voiture en état de marche, met le contact et démarre (on supposera que les roues de la voiture roulent sans glisser).

A (voiture en panne)

B (voiture en état de marche)



Dessiner sur chacun des schémas les forces de frottement exercées par le sol sur les roues avant de la voiture. Préciser, dans chaque cas, le sens de ces forces par rapport au sens du mouvement de la voiture. Justifier votre réponse.

Ces deux situations sont tout à fait classiques ; en revanche, il est moins habituel de les présenter en même temps. Lorsque la voiture est poussée, il y a deux forces que « l'extérieur » exerce sur la voiture, la force que le conducteur exerce sur elle quand il la pousse (force supposée passer par l'axe des roues) et la force que le sol exerce sur les roues, force dont la composante tangentielle est en sens contraire de celui du mouvement de

translation de la voiture. En revanche, lorsque la voiture démarre, la seule force extérieure à la voiture est une force que le sol exerce sur les roues motrices, force dont la composante tangentielle est de même sens que celui du mouvement de translation de la voiture. Les sens des forces de frottement statique diffèrent d'une situation à l'autre (alors que le mouvement de translation du centre de masse de la voiture et le sens de rotation des roues sont les mêmes dans les deux situations) car les forces qui s'exercent sur la voiture sont différentes et créent au niveau des contacts des déplacements microscopiques relatifs locaux différents, et donc des forces de frottement différentes.

Cent vingt quatre personnes ont été interrogées, dont 24 étudiants français de sciences physiques de troisième année de l'université Paris 7, 18 étudiants français (18-20 ans) de terminale D (spécialité sciences de la vie et de la Terre), 33 étudiants brésiliens de première année de l'université de Vitoria (sections de génie électrique et mécanique) et 49 professeurs espagnols de sciences physiques de lycée de la région de Valencia, dont 38 en stage de formation continue. Bien que la population interrogée soit très hétérogène, tous ont étudié les lois de Newton et ont eu à traiter des problèmes de physique dans lesquels les frottements n'étaient pas négligés. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant.

Questionnaire	A1 (voiture) N = 124			
	Licence	Term D	Brésil	Espagne
Population	N = 24	N = 18	N = 33	N = 49
Sens de f le même dans les deux cas Cas A ← et Cas B ← ou Cas A → et Cas B →	92 %	72,5 %	76 %	84 %
Sens de f différent dans les deux cas ← (cas A) et (cas B) →	4 %	16,5 %	18 %	8 %
Pas de réponse ou réponse inclassable	4 %	11 %	6 %	8 %

Tableau 1: **Sens des forces de frottement**

Les résultats diffèrent peu d'une population à l'autre : la majorité (et ceci quel que soit le niveau d'études des étudiants) trace des forces de frottement qui ont le même sens dans les deux situations physiques proposées. Ce sens « unique » est soit celui du déplacement du centre de masse du solide étudié, soit le sens contraire, comme l'indique le tableau 2 dans lequel nous avons regroupé toutes les réponses.

Questionnaire / Population		A ₁ (voiture) N = 124
Force de frottement s'oppose au mouvement (total : 81,5 %)	de translation de la voiture f vers la gauche ←	55,5 %
	de rotation des roues f vers la droite →	26 %

Tableau 2 : **Sens des forces de frottement lorsqu'il est identique dans les deux cas**

Pour ces étudiants, la force de frottement s'oppose toujours à l'un des mouvements des solides. Les justifications données par les étudiants se partagent de la façon suivante :

– a) le mouvement de référence considéré est, dans les deux cas, celui de translation de la voiture : les étudiants dessinent les forces de frottement toujours vers « la gauche » et déclarent que les forces de frottement **s'opposent toujours au mouvement de translation** de la voiture, ainsi que l'indiquent ces citations.

« Si la voiture est en panne ou en état de marche, les forces de frottement seront identiques dans le cas où la voiture doit avancer dans la même direction et dans le même sens. Les forces de frottement s'opposent au déplacement, donc elles sont en sens opposé au mouvement de la voiture. »

« Les forces de frottement freinent le mouvement ; elles sont donc en sens inverse du mouvement dans les deux cas. »

« Les forces de frottement sont des forces résistantes. Leur sens est donc toujours opposé à celui du mouvement. » ;

– b) le mouvement de référence considéré est celui de la rotation des roues de la voiture : les étudiants dessinent les forces de frottement toujours orientées vers « la droite » et déclarent que, dans les deux cas, les forces de frottement **s'opposent toujours au mouvement de rotation** des roues.

« Les forces de frottement s'opposent au glissement donc elles ont pour effet d'inverser le sens de rotation de la roue sur le sol. »

glissement



« Les forces de frottement s'opposent au mouvement de rotation des roues. »

« Quelle que soit la façon dont la voiture avance, les frottements sont les mêmes en direction et sens : opposés au mouvement de rotation. »

Ainsi, pour une écrasante majorité de la population interrogée :

– le sens de la force de frottement statique exercée sur un solide est déterminé à l'aide de la donnée du sens d'un mouvement observé du solide étudié ;

– le sens de la force de frottement statique exercée sur un solide s'oppose toujours au sens du mouvement observé du solide considéré (pour les deux situations étudiées, les étudiants prennent en compte soit le seul mouvement de rotation du solide soit le seul mouvement de translation de son centre de masse).

Une très faible minorité de la population (11,5 %) accepte l'idée que des forces de frottement puissent avoir des sens différents, alors que le mouvement observé du solide étudié ne change pas. La difficulté ici est de reconnaître qu'un même mouvement puisse avoir des causes différentes. Parmi la population qui a justifié les réponses (8,5 %), les justifications fournies sont de deux types :

– pour 3 %, la force de frottement s'oppose au mouvement de translation de la voiture dans le cas A (voiture en panne) et au mouvement de rotation des roues dans le cas B (voiture qui démarre) :

« Cas A : la force de frottement s'oppose au déplacement de la voiture. Cas B : la force de frottement s'oppose au déplacement des roues. »

Aucun de ces étudiants n'explique pourquoi la force de frottement s'oppose, dans un cas, au déplacement de la voiture et, dans l'autre, au mouvement de rotation des roues, alors que, dans les deux situations, les roues tournent toujours dans le même sens et le centre de masse de la voiture se déplace toujours dans le même sens ;

– les 5,5 % restant écrivent :

« Cas A : les roues ne sont pas motrices : frottement en sens inverse de la marche de la roue. Cas B : les roues sont motrices, les frottements sont vers l'avant car sinon les roues patineraient s'il n'y avait pas de frottement. »

« Cas A : pas de patinage car le conducteur pousse. Cas B : la roue tourne dans le sens des aiguilles d'une montre. Donc, pour que la roue ne patine pas, il faut que la force de frottement soit en sens identique à celui de la marche de la voiture ».

Pour certains, le rôle moteur des roues et/ou leur éventuel patinage est déterminant pour justifier le sens différent attribué aux forces de frottement. Ces étudiants envisagent donc le cas où il n'y aurait pas de frottement pour déterminer le sens de la force de frottement : on peut, en effet, chercher le mouvement qu'aurait la voiture en absence de frottement, et en déduire ainsi le sens de la force de frottement sachant que cette dernière s'oppose à la tendance au glissement ainsi déterminé. Dans notre cas, s'il n'y avait pas de frottement, la voiture poussée aurait un mouvement de translation, les roues ne tournant pas (la voiture glisserait) et, dans le cas B, elle ne se translaterait pas, les roues tournant « dans le vide » (la voiture patinerait).

2.2. Le questionnaire de la sphère (V_2)

Pour ce questionnaire, nous nous sommes inspirées d'une situation physique de frottement statique proposée par Donald E. Shaw (1979) qui fait rouler sans glisser un cylindre sur une table en modifiant le point d'application de la force extérieure appliquée. D.E. Shaw montre expérimentalement que, le mouvement de translation du centre de masse du cylindre restant toujours de même sens, la force de frottement qui s'exerce sur le cylindre change de norme et de sens selon le moment de la force appliquée, c'est-à-dire selon la position, par rapport à l'axe du cylindre, du point d'application de la force extérieure. L'auteur déclare que ses étudiants ont été très étonnés par les résultats obtenus.

Ce type de situation nous a semblé intéressant à étudier car il montre bien que le sens d'une force de frottement statique ne dépend pas du sens de déplacement de l'objet sur lequel elle agit : ce sens *a priori* « inconnu » dépend des forces et couples extérieurs qui créent des déplacements microscopiques relatifs locaux. Une situation similaire avec une sphère a été proposée à des étudiants de deuxième année d'université ayant étudié la mécanique du solide et, en particulier, le frottement statique ainsi que la notion de vitesse relative de glissement. La situation proposée est celle d'une sphère sur laquelle un expérimentateur imaginaire exerce une force, constante en norme et sens, dans plusieurs cas, chaque cas différant par le point d'application de cette force. L'énoncé donne des résultats obtenus par un étudiant fictif pour chaque point d'application de la force extérieure. Ces résultats indiquent que la norme et le sens de la force de frottement qui s'exerce sur la sphère changent avec le point d'application de la force exercée par l'expérimentateur, alors que la sphère roule toujours sans glisser et dans la même direction. Les personnes interrogées doivent dire si ce qui est affirmé dans l'énoncé par cet étudiant fictif est sérieux ou farfelu, en justifiant leurs réponses. L'objectif de ce questionnaire n'est pas d'exiger

des étudiants une résolution mathématique et complète du problème (bien qu'ils aient tous les connaissances nécessaires pour le faire), mais seulement de dire si les résultats proposés dans le questionnaire (alors que le sens du mouvement du mobile ne change pas, la force de frottement change au départ de norme et de sens, avec le point d'application de la force extérieure) sont possibles ou non. La réponse correcte attendue suppose que le lecteur sache qu'il n'est pas possible de déduire le sens et la norme d'une force de frottement statique du sens de déplacement de l'objet sur lequel elle s'exerce mais qu'elle dépend du point d'application de la force extérieure puisque les rapports entre les moments de la force extérieure et de la force de frottement vont également varier.

Quarante huit étudiants ont été interrogés dont 24 sont des étudiants français de deuxième année de DEUG scientifique, spécialité sciences physiques (Paris 7), 12 des étudiants brésiliens de deuxième année de l'université de Sao Paulo (sections de génie électrique et mécanique) et 12 des étudiants brésiliens de première année de l'université de Vitoria, appartenant aux mêmes sections que les étudiants précédents.

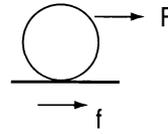
Là encore, la population semble hétérogène, mais tous ces étudiants ont suivi des enseignements de mécanique du solide équivalents (Caldas, 1994). Les résultats sont éloquentes : **aucun** étudiant n'accepte l'idée que le sens de cette force puisse changer alors que le sens du mouvement de translation du centre de masse de la sphère ne change pas (justification donnée par 35,5 % des étudiants) ou que le sens du mouvement de rotation de la sphère ne change pas (justification donnée par 46 % des étudiants), comme l'indiquent ces citations. Pour tous ces étudiants (81,5 %), le sens de la force de frottement s'oppose toujours au sens du mouvement considéré (soit le sens de la translation du centre de masse, soit celui du mouvement de rotation au contact).

« Non, la force de frottement ne peut pas changer de sens ; s'il y a un frottement entre la surface et un point de la sphère en contact, il sera toujours opposé au mouvement du centre de masse. »

« Dès que la sphère se déplace toujours vers l'avant, la réaction du plan de contact sera toujours en sens opposé donc la force de frottement ne pourra pas changer de sens. »

« La force de frottement seulement changera de sens quand la force F appliquée changera aussi de sens. Les différents points d'application de F ne changent en rien le sens de la force de frottement. Cette force sera toujours opposée au mouvement vers l'avant de la sphère. »

« La force de frottement a la caractéristique de s'opposer à la tendance au mouvement. Ainsi quand la sphère est tirée vers la droite, elle «pousse» le sol vers la gauche et il apparaît, par conséquent, une force de frottement vers la droite. »



Il ressort de ces résultats que les étudiants n'acceptent pas l'idée qu'une force de frottement statique, dans un roulement sans glissement, puisse changer de sens, voire s'annuler, sans que le sens du déplacement de l'objet considéré change.

3. DISCUSSION

Les tableaux 3 et 4 regroupent les réponses fournies aux questions des questionnaires de la sphère et de la voiture qui concernent le sens de la force de frottement statique par rapport à celui du mouvement du mobile étudié, quel que soit le mouvement considéré par l'étudiant : le mouvement de rotation (au contact) de la sphère ou des roues de la voiture ou le mouvement de translation de la sphère ou de la voiture.

Sens de la force de frottement statique	Questionnaire de la sphère N = 48	Questionnaire de la voiture N = 124		Total N = 172
		Étudiants	Professeurs	
La force de frottement s'oppose au mouvement.	81,5 %	80 %	84 %	81,5 %
La force de frottement est de même sens que le mouvement.	0 %	13,5 %	8 %	8 %
Aucune réponse ou réponse inclassable.	18,5 %	6,5 %	8 %	10,5 %

Taleau 3 : **Sens de la force de frottement par rapport au sens du mouvement considéré**

Il est possible de regarder les résultats précédents sous un angle différent : pour un mouvement du solide considéré par les étudiants, le sens de la force de frottement statique est-il toujours parfaitement connu ou peut-il changer selon les forces en jeu ? C'est ce qui a été mis en évidence dans le tableau 4, où nous avons réuni les réponses fournies par les professeurs et les étudiants.

Sens de la force de frottement	Questionnaire de la sphère N=48	Questionnaire de la voiture N=124	Total N=172
Sens de la force toujours le même.	81,5 %	81,5 %	81,5 %
Sens de la force peut changer.	0 %	11,5 %	8 %
Aucune réponse ou réponse inclassable.	18,5 %	7 %	10,5 %

Tableau 4 : Le sens de la force de frottement peut-il changer ?

La force de frottement statique (soit pour le roulement sans glissement, soit pour la translation) est, pour la grande majorité de la population interrogée, une force qui a un sens que l'on connaît dès lors que le sens de déplacement de l'objet sur lequel elle agit est connu : elle s'oppose toujours au mouvement « observé » (« effectif », « donné ») du solide considéré (sans aucune référence à l'éventuel mouvement de glissement relatif des surfaces en contact, en l'absence de frottement, et encore moins de la prise en compte des déplacements relatifs locaux). La minorité restante se comporte différemment selon le questionnaire (cf. les deux dernières lignes du tableau 4), la situation de la sphère étant beaucoup plus difficile à analyser qualitativement que celle de la voiture.

Ces résultats, qui rejoignent ceux obtenus pour le frottement cinétique (Caldas & Saltiel, 1995), peuvent se résumer ainsi :

- une écrasante majorité considère que les forces de frottement statique ont un sens qui dépend du sens du mouvement donné du solide étudié ;
- le sens attribué à cette force de frottement statique est toujours opposé à celui du mouvement donné ou observé du solide, le mouvement de référence considéré (dans le cas du roulement sans glissement) pouvant être aussi bien le mouvement de translation du centre de masse que celui de la rotation autour du centre de masse.

Il ressort que la force de frottement statique n'est nullement perçue comme une force qui peut **dépendre** des conditions dynamiques de chaque situation physique et dont le sens n'est pas connu ou déterminé à l'aide de la seule donnée des mouvements effectifs des solides en présence. De ce point de vue, il semble que les étudiants appliquent les lois du frottement cinétique au cas du frottement statique, comme s'il existait (au moins lorsque les solides sont mobiles dans un référentiel donné) un phénomène unique de frottement entre les solides en contact.

4. SUGGESTIONS PÉDAGOGIQUES – CONCLUSION

Les phénomènes de frottement intervenant sans cesse dans notre vie quotidienne, il paraît souhaitable d'en parler dans l'enseignement. Cependant, les objectifs de l'enseignement dépendent bien sûr de la nature du message que nous voulons faire passer et du public auquel on s'adresse. Il est possible, dans un premier temps, d'uniformiser le vocabulaire en appelant, force de frottement, la composante tangentielle de la force de contact, que cette composante soit résistante ou motrice. Il est fréquent, en effet, de rencontrer dans des manuels qui étudient le problème de la voiture deux termes différents pour la force tangentielle : elle est appelée force motrice lorsqu'elle est dans le même sens que le mouvement de la voiture et force de frottement lorsqu'elle est de sens contraire à celui du mouvement ! De même, il est fréquent de trouver des exercices où il est demandé de calculer «la force motrice» d'une voiture, alors que les frottements sont négligés, ce qui suggère qu'une voiture (comprenant carrosserie, moteur, roues, conducteur, etc.) qui démarre est soumise **de la part de l'extérieur** à une « force motrice développée » par le moteur de la voiture ! Par conséquent, il n'est pas inutile de montrer qu'une force de frottement ne se réduit pas à une unique force de freinage et qu'elle peut être à l'origine d'un mouvement. En revanche, il est également utile de montrer que, malgré cette propriété de freinage ou de propulsion, cette force s'oppose à des déplacements relatifs locaux : cette approche aidera peut-être les étudiants à traiter de problèmes d'énergie lorsqu'il y a des frottements ; mais ceci est une autre histoire.

Compte tenu des difficultés connues à ce jour lors de cette étude (et de celle sur le frottement cinétique) nous pouvons isoler quelques points essentiels sur lesquels il est souhaitable d'insister quand on enseigne ce phénomène.

1) Les lois de Newton : les forces de frottement exercées sur les solides en contact sont des forces comme les autres vis à vis des lois de Newton. En ce qui concerne, en particulier, la loi des actions réciproques, à un contact donné correspondent **deux forces** : les résultantes des actions de contact s'exercent ainsi sur **chacun des solides** concernés. Des schémas éclatés préconisés par Viennot (1996) participent à aider les étudiants à maîtriser ce problème ;

2) Vitesse relative de glissement : savoir reconnaître parmi toutes les situations où des solides se déplacent dans un référentiel donné celles pour lesquelles la vitesse relative de glissement au contact d'un solide par rapport à l'autre est nulle, en particulier, reconnaître qu'il existe des situations de « mouvement », pour lesquelles cette vitesse est nulle.

3) Frottement solide et vitesse relative de glissement

Frottement statique : associer ce phénomène à des situations physiques pour lesquelles la vitesse relative de glissement des zones de contact les unes par rapport aux autres est **nulle**, à condition qu'une force extérieure soit exercée sur l'un des solides en jeu.

Frottement cinétique : associer ce phénomène à des situations où obligatoirement la vitesse relative de glissement au contact n'est pas nulle ;

4) Les lois du frottement solide sec : les lois macroscopiques, pour ces deux types de frottement, sont différentes. Les forces de frottement cinétique exercées sur chaque surface de contact sont parfaitement définies en norme et sens alors que les forces de frottement statique sont inconnues *a priori*. Ces dernières, en s'opposant aux déplacements relatifs locaux au niveau du contact, ne dépendent que des autres forces en jeu : le sens de ces forces, contrairement aux forces de frottement cinétique, ne peut pas être déterminé à l'aide de la seule donnée des mouvements effectifs, observés, des solides considérés ;

5) Forces de frottement, forces résistantes ou propulsives ?

Les forces de frottement, par définition, ne s'opposent pas au « mouvement » : elles s'opposent, soit au mouvement relatif de glissement au contact des solides les uns par rapport aux autres (frottement cinétique), soit à l'éventuel mouvement de glissement relatif des solides les uns par rapport aux autres qui se produirait en absence de frottement (frottement statique). Cependant, pour les deux types de frottement, une force de frottement s'exerçant sur un objet s'oppose toujours aux déplacements relatifs locaux (Baumberger et al., 1994). Ainsi, ces forces peuvent toutes les deux avoir un rôle de **force** motrice ou de propulsion.

Tous ces points ne peuvent évidemment être développés à n'importe quel niveau d'étude : les premier et dernier peuvent être développés dès la classe de troisième, comme le préconise le groupe technique qui a modifié, en France, les programmes des collèges en 1993 ; en revanche, tous les autres ne peuvent être développés qu'au lycée, voire durant les premières années d'université.

L'ensemble du travail réalisé sur le frottement solide sec (cinétique et statique) dépasse un peu le cadre strict du frottement solide sec, puisqu'il montre aussi que les étudiants ont des problèmes avec les forces de contact, quelles qu'elles soient (qu'il y ait ou non frottement). Finalement, si on doit parler mécanique, autant traiter les forces de contact comme des forces qui obéissent aux lois de Newton ; si on doit parler de frottement solide, autant en parler correctement sans escamoter ou « simplifier » les lois qui régissent ce phénomène !

Ce travail de recherche ouvre de nombreuses perspectives. Il serait, par exemple, intéressant d'interroger des élèves plus jeunes (une enquête préliminaire (Bernard, 1994) indique que des élèves plus jeunes dessinent des forces de frottement normales à la surface de contact et non tangentielles) et de faire une étude systématique auprès des maîtres. Par ailleurs, on a l'habitude de dire que les forces de frottement sont dissipatives et donc que le travail des forces de frottement est « négatif ». Or, si nous prenons le cas du roulement sans glissement, le travail de la force de frottement est nul ; dans le cas d'un bloc qui glisse sur un autre, le travail de la force de frottement qui s'exerce sur l'un des blocs est positif, le travail de la force qui s'exerce sur l'autre bloc étant négatif. Que disent les manuels ? Comment raisonnent les étudiants, les maîtres ?

BIBLIOGRAPHIE

- BARQUINS M. (1991). La tribologie ou l'art de froter. *Revue du Palais de la Découverte*, vol. 19, n° 186, pp. 43-63.
- 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.
- BERNARD J.-C. (1994). *Le frottement solide sec : étude de difficultés et/ou de raisonnements d'étudiants et de lycéens*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- BESSON U. (1997). *Le frottement solide sec de glissement*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- BOWDEN F.P. & TABOR D. (1964). *The friction and lubrication of solids*. Oxford, Clarendon Press.
- CALDAS H. (1994). *Le frottement solide sec : le frottement de glissement et de non glissement. Etude des difficultés des étudiants et analyse de manuels*. Thèse, Université Paris 7.
- CALDAS H. & SALTIEL E. (1995). Le frottement cinétique : analyse des raisonnements des étudiants. *Didaskalia*, n° 6, pp. 55-71.
- GRUPE TECHNIQUE DISCIPLINAIRE DE PHYSIQUE (1993). *Document d'accompagnement pour la classe de troisième*. Paris, Ministère de l'Éducation nationale et de la Culture.
- RICHOUX H. (1996). *Le frottement solide statique*. Mémoire de tutorat, DEA, Université Paris 7.
- SHAW D.E. (1979). Frictional force on rolling objects. *American Journal of Physics*, vol. 47, n° 10, pp. 887-888.
- VIENNOT L. (1996). *Raisonnement en physique : la part du sens commun*. Louvain-la-Neuve, De Boeck.

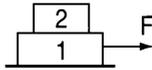
REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier Bernard Perrin pour les nombreuses discussions que nous avons eues sur le frottement solide, Daniel Gil-Perez qui a très gentiment accepté de faire passer des questionnaires et tous ceux et celles qui ont accepté de jouer le jeu de répondre aux questions embarrassantes.

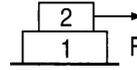
ANNEXE

Questionnaire des deux blocs

Questionnaire A₁



Questionnaire A₂



Un bloc de masse m_1 repose sur une table horizontale parfaitement lisse. Un autre bloc de masse m_2 repose sur le premier. On exerce sur le bloc de masse m_1 (resp. m_2) une force \vec{F} constante. Il existe un frottement entre les deux blocs, alors que le coefficient de frottement entre le bloc 1 et la table sera supposé nul. On constate que le bloc (2) reste lié au bloc (1), c'est-à-dire reste **immobile** par rapport au bloc (1).

1- Quelles sont, dans le référentiel de la table, les forces qui s'exercent sur le bloc (1), sur le bloc (2) ?

2- Existe-t-il une force de frottement appliquée au bloc de masse m_1 ? Si oui, pouvez-vous préciser son sens. Si non, pourquoi ?

3- Existe-t-il une force de frottement appliquée au bloc de masse m_2 ? Si oui, pouvez-vous préciser son sens. Si non, pourquoi ?

4- En mettant un peu de graisse entre les blocs 1 et 2, on constate que le bloc 2 (resp. 1) se déplace toujours vers la droite et que les deux blocs ont un mouvement **relatif non nul**. Le bilan de forces de la première question est-il inchangé ou différent ? Justifiez votre réponse.

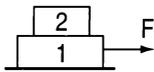
Si on s'intéresse aux *seules forces horizontales*

– il s'exerce sur le bloc «passif» (c'est-à-dire le bloc sur lequel la force \vec{F} n'est pas appliquée : bloc 2 pour le questionnaire A₁ et bloc 1 pour le questionnaire A₂) une force de frottement qui est de même sens que \vec{F} ;

– il s'exerce sur le bloc actif (celui sur lequel la force \vec{F} est appliquée, c'est-à-dire le bloc 1 pour le questionnaire A₁ et le bloc 2 pour le questionnaire A₂) une force de frottement qui est de sens contraire à \vec{F} .

Nous avons représenté ces forces sur une figure, où nous avons « éclaté » le schéma (c'est-à-dire séparé artificiellement les deux blocs) afin que l'on voit bien sur quel objet s'exerce chaque force dessinée.

Questionnaire A₁



Situation A1

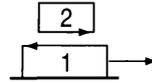
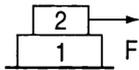


schéma éclaté

Questionnaire A₂



situation A2

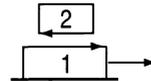


schéma éclaté

Cet article a été reçu le 28/07/98 et accepté le 10/02/99.