

Frottements entre sciences de l'ingénieur et physique : des ancrages théoriques communs, des éclairages différents.

**Congrès international AREF 2007 (Actualité de la
Recherche en Education et en Formation)**

Pascale Hannoun-Kummer

UMR STEfENS Cachan, INRP, Universud

RÉSUMÉ. La recherche présentée explore le cloisonnement existant entre deux disciplines scolaires a priori proches que sont la physique et les sciences de l'ingénieur, toutes deux enseignées à des lycéens français en série scientifique. Le cloisonnement est analysé à propos du concept de frottement à la fois en termes de contenus prescrits dans les deux disciplines et d'effets produits sur les élèves. Nos résultats mettent en évidence des divergences fortes au niveau des situations et des modèles envisagés. Ils révèlent aussi que l'absence de coordination entre les deux disciplines enseignées ne permet pas aux élèves d'identifier clairement ces différences.

MOTS-CLÉS : Mécanique, sciences de l'ingénieur, physique, frottement, modèles, contexte disciplinaire, lycée.

1. Introduction

Quels sont les dangers ou les obstacles possibles pour les élèves confrontés à des disciplines voisines mais qui se méconnaissent, c'est-à-dire qui présentent de forts contrastes malgré certaines ressemblances ou points communs ? Pour discuter cette question, nous nous appuyons sur les résultats d'une exploration réalisée dans un contexte classique d'enseignement disciplinaire « compartimenté » en France, au lycée.

Dans un parcours à dominante sciences de l'ingénieur en série scientifique, sont au programme deux disciplines scientifiques qui traitent toutes deux de questions de mécanique : la physique et les sciences de l'ingénieur. Les contextes spécifiques d'enseignement c'est-à-dire les cadres épistémologiques impliqués et les mises en œuvre pédagogiques confèrent à des concepts qui paraissent proches *a priori* des rôles spécifiques, voire des significations différentes. Ils portent la même étiquette mais n'ont pas les mêmes attributs.

La recherche présentée ici est centrée sur une analyse des concepts et des phénomènes liés aux frottements enseignés dans les deux disciplines. Elle nous permet d'explorer les questions suivantes : Quels sont les effets sur les élèves du cloisonnement constaté ? Quels liens établissent-ils ? Quelles confusions font-ils ?

Après une présentation du contexte qui engendre le cloisonnement disciplinaire, la nature et les effets de ce cloisonnement sont décrits autour de deux axes. Nous présentons tout d'abord une analyse comparative des programmes sur le concept de frottement et puis nous donnons quelques résultats issus de l'analyse d'un questionnaire soumis à des élèves de terminale pour tester leur construction du concept de frottement.

2. Continuité des cadres théoriques, ruptures épistémologique et pédagogique

Les sciences de l'ingénieur et la physique sont toutes les deux des sciences du monde inanimé, et elles se rapprochent par leurs emprunts à des domaines communs dont celui de la mécanique. Ce qui les distingue, d'un point de vue épistémologique, ce sont des objets d'études de nature différente : des solutions constructives pour l'une, des phénomènes physiques pour l'autre. Mais aussi des visées et des pratiques de références spécifiques, qui conditionnent les méthodes, les outils, en particulier les relations aux mathématiques.

D'après les documents d'accompagnement (CNDP, 2002 p.41), les sciences de l'ingénieur au lycée visent à familiariser l'élève avec « les outils et les démarches de conception de produits », en particulier en « associant une solution constructive à son comportement à l'aide de modèles scientifiques ». Dans cette logique de conception et de production, « les théories scientifiques [sont employées pour] prédire le comportement du produit » à la fois en termes de performances et de défaillances, et « permettre une évaluation quantifiée des solutions constructives

concurrentes », (Y. Cartonnet, 2002, p.172). Ainsi, les mathématiques et la physique sont avant tout des outils.

D'après les programmes de la classe de terminale (BOEN, 2001, p.75), la physique du lycée vise à « sensibiliser les élèves aux ordres de grandeurs du monde observable », en se centrant sur l'étude de « l'évolution temporelle des systèmes physiques » afin de montrer que des mouvements d'objets et de systèmes très divers peuvent être « formalisés dans un même cadre théorique ». La logique est celle d'une rationalisation et d'une généralisation. En effet, il s'agit « de traiter un problème jusqu'au bout grâce à l'analyse mathématique, le résultat numérique final n'ayant le plus souvent qu'une importance tout à fait secondaire » (Voss, 1991, p.14). Les phénomènes physiques enseignés au lycée sont choisis pour leur proximité avec le modèle ou la loi (véritable objet d'enseignement) qu'ils doivent illustrer, et pour lesquels ils tendent à devenir une référence.

Ces différences de nature épistémologique étant posées, rien n'empêcherait que les contenus à enseigner, relevant dans les deux cas de la mécanique rationnelle (Mariac, 1980) soient coordonnés. Si la physique enseignée aux élèves de SI avait le statut d'une « discipline de service » (Martinand, 1994, p.71) pour les sciences de l'ingénieur alors, on trouverait dans les théories et concepts mécaniques, objets d'enseignement en physique, des outils adaptés aux sciences de l'ingénieurs. Mais le programme de physique, discipline obligatoire, n'est pas pensé en fonction de l'enseignement de sciences de l'ingénieur qui ne concerne qu'une partie des élèves de la série S.

Ainsi en physique, le programme se limite à la mécanique du point, dont le cadre général est l'étude du mouvement du centre de gravité d'un solide unique. Les sciences de l'ingénieur enseignées sont basées sur la mécanique du solide, cadre dans lequel sont étudiés des systèmes à plusieurs solides reliés entre eux. Ces deux cadres (mécanique du point, mécanique du solide) ne sont pas contradictoires, et il importe que les limites de leur domaine de validité et leur légitimité soient clairement explicitées (ce qui n'est pas forcément le cas). Les élèves sont ainsi confrontés à deux démarches divergentes susceptibles d'engendrer des conflits de sens, ce que précisément nous souhaitons identifier.

3. Analyse comparative des programmes sur le concept de frottement.

En ce qui concerne les programmes, si une lecture rapide fait apparaître un certain nombre de termes communs à ces deux enseignements comme « mouvement », « vitesse », « force », « énergie », « frottement », il s'agit de préciser dans quelle mesure les contextes d'emplois font diverger des concepts *a priori* voisins de sorte qu'ils prennent des sens spécifiques dans les deux enseignements. Nous avons choisi le concept désigné par l'étiquette « frottement » parce qu'il nous semblait porteur de significations fortes et contradictoires, comme le montre l'histoire de la mécanique. Les lois de la mécanique classique, par exemple celle de la chute des corps, n'ont pu être élaborées correctement qu'à partir du moment où le frottement a été envisagé comme un phénomène à négliger. A

L'inverse, la conception ou la production en mécanique industrielle nécessite la prise en compte du phénomène de frottement que ce soit dans les cas où il est gênant pour le mouvement, comme dans les cas où il est utile à l'équilibre ou au freinage du système considéré.

Une analyse comparée des programmes de physique et de sciences de l'ingénieur (BOEN 2000, 2001) révèle ces divergences (Hannoun, 2005). Elle est basée sur les occurrences du mot « frottement » et sur l'ensemble des situations et des objets dans lesquels le phénomène de frottement entre en jeu de façon implicite ou explicite. Elle fait apparaître des différences sous plusieurs aspects :

- le statut des frottements : dans l'enseignement de la physique, l'entrée est une situation modélisée qui inclut ou non les frottements ; ils sont donc pris en compte ou négligés suivant les modèles utilisés. En sciences de l'ingénieur, le programme prévoit d'aborder la « résistance aux mouvements » et ses implications dans les cas de mouvements de : « glissement et roulement ». Les frottements peuvent alors avoir des rôles variés (actif, gênant) et sont donc étudiés plus en détails avec les lois qui les régissent.

- les situations traitées en physique et en sciences de l'ingénieur impliquent des modèles physiques et des lois mathématiques différentes. En physique, mis à part de rares exemples de frottements entre solides et qui ne donnent pas lieux à modélisation, l'étude porte sur les frottements entre solides et fluides (chutes verticales dans un fluide plus ou moins visqueux). En SI, le frottement est étudié principalement entre les surfaces de deux solides, pour tous les cas de mouvements possibles, mais plus particulièrement dans le cas d'équilibre statique.

L'ensemble des situations étudiées dans les deux contextes disciplinaires donne donc lieu à peu de recouvrement si ce n'est pour le cas du mouvement de glissement, présent dans les deux cas mais associé à des modèles de frottement régis par des lois très différentes qui nécessitent plutôt l'étude des frottements secs en SI et privilégient celle des frottements visqueux en physique.

C'est sur cette base qu'un questionnaire a été élaboré et soumis aux élèves afin de tester s'ils prennent spontanément en compte le frottement, de quelle manière et en utilisant quel modèle ; quels sont les éléments qui favorisent sa prise en compte ; quel repérage ils font des différences entre les lois de frottement solide/solide et fluide/solide et quelles confusions sont faites.

4. Quelles sont les articulations, liens, confusions faits par les élèves à propos des frottements ?

L'exploration a eu lieu dans deux classes de terminale scientifique du même lycée avec l'option sciences de l'ingénieur (SI) pour l'une (30 élèves) et avec l'option sciences de la vie et de la terre (SVT) pour l'autre (20 élèves). Le programme de physique pour ces deux classes est identique. La progression suivie dans les deux classe a été la même. La classe d'option SVT nous sert donc de

témoin pour identifier ce qui serait spécifique aux élèves de l'option sciences de l'ingénieur.

Les élèves des deux classes ont été soumis à un même questionnaire dont la formulation est volontairement ni typiquement physique ni typiquement sciences de l'ingénieur et ne comporte aucun schéma ni symbolisme mathématique. Les situations nécessitent de considérer un contact entre solides alors qu'en physique les mouvements étudiés s'affranchissent du frottement. La plupart nécessitent l'articulation de connaissances prises dans les deux champs, (par exemple la deuxième loi de Newton et la loi de frottement de Coulomb). Le terme de frottement n'est pas utilisé dans le questionnaire, bien qu'il ne soit pas négligeable dans ces situations de glissement relatif entre caisses et sol. C'est aux élèves de l'introduire éventuellement.

4.0. Les réponses possibles

Nous analysons ici les résultats pour un seul groupe de questions qui porte sur le maintien d'une caisse à une vitesse constante. Les réponses attendues sont données en caractères latins à la suite des questions (cf. encadré 1).

On déplace une caisse à vitesse constante en la poussant sur le sol horizontal. La force de poussée dépend-elle de :

- 1 Sa masse ? - (Oui, si modèle frottement Coulomb)
- 2 La dimension de la surface de contact ? - (Non, si modèle Coulomb)
- 3 Sa vitesse ? - (Non, si modèle Coulomb)

Encadré 1. Question 2, maintien d'une vitesse constante

Pour répondre à la question 1, l'élève doit se positionner par rapport à l'hypothèse de non frottement qui l'amènerait à conclure, en utilisant le principe d'inertie, à une force de poussée nulle, ce qui contredit l'expérience quotidienne dans laquelle le frottement ne peut pas être négligé. En effet, le principe d'inertie s'écrit en projection sur l'axe horizontal : $F_p - F_f = F_p - f \cdot mg = 0$, donc la force de poussée est proportionnelle à la masse uniquement en présence de frottement, sinon elle est nulle.

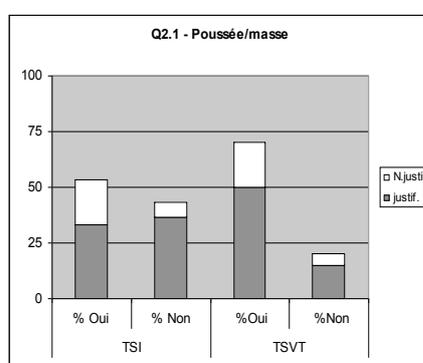
Bien sûr, si l'élève ne dispose pas de la loi de Coulomb (ce qui est le cas des élèves de l'option SVT) ou ne pense pas à l'utiliser, il n'aura pas d'arguments mathématiques pour justifier une réponse positive et pourra avoir recours à l'analogie ou au raisonnement intuitif du type « plus c'est lourd, plus la force doit être grande » lié à l'expérience quotidienne (Potvin et Riopel, 2006).

Les questions 2 et 3 doivent permettre d'identifier quel modèle de frottement les élèves utilisent (plutôt solide ou plutôt fluide) ou quelles références pragmatiques ils ont. En effet, seule la force de frottement fluide dépend de la « dimension de la surface de contact » et de la « vitesse »

4.1. Les premiers résultats

Les résultats obtenus laissent entrevoir des tendances présentant de forts contrastes. Dans un souci de comparaison, les effectifs des classes ont été ramenés à cent pour la présentation graphique. Dans le texte et dans les tableaux, la quantification des réponses est faite en terme d'occurrences réelles.

Ces deux classes se distinguent par la répartition différente entre le oui et le non. Pour la question 2.1, les élèves de l'option SI se répartissent de façon assez équilibré (16 oui et 13 non) tandis que les élèves de SVT répondent oui plus massivement et sont donc les plus nombreux à donner les réponses attendues (cf. graphique 1).



Question 1	SI	SVT
Total oui	16	14
Justifié	10	10
Non justifié	6	4
Total non	13	4
Justifié	11	3
Non justifié	2	1

Graphique 1. résultats question n°1 en pourcentage et tableau des valeurs réelles.

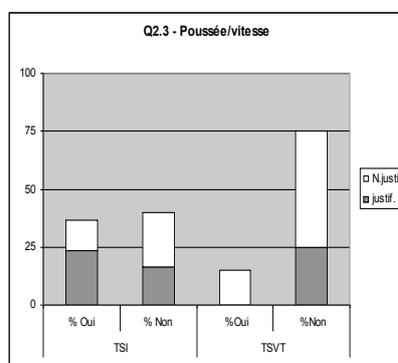
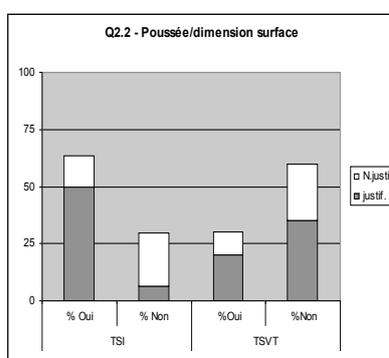
La réponse « oui » ne peut se justifier qu'en présence de frottement. Or, aucun élève de l'option SVT n'y fait allusion, ce qui ne permet donc pas d'expliquer leur oui majoritaire. Pour comprendre la logique des réponses, il nous faut analyser les justifications données, en tenant compte du registre de réponse et des outils mathématiques utilisés par les deux populations.

4.2. Analyse des justifications

À la question 1, une majorité d'élèves de l'option SI (6 élèves) justifient le « non » en projetant la première loi de Newton sur l'horizontale ce qui élimine le poids, donc aussi la masse. Trois autres considèrent que la poussée peut prendre n'importe quelle valeur car « c'est une force extérieure ». Parmi les dix élèves de SI qui répondent « oui », la moitié donne une relation à deux termes entre masse et force de poussée (plus c'est lourd, plus la force est grande) dont deux qui introduisent les frottements ou la résistance du sol. Les autres soit n'ont pas projeté l'équation (3 élèves) soit ont fait une erreur de projection (1 élève) soit ont écrit la 2ème loi au

lieu de la première dans laquelle la masse est présente. Les élèves de l'option SVT justifient le « oui » majoritairement (6 élèves) par une relation à deux termes ou une analogie pour deux d'entre eux, tandis que les autres (4 élèves) écrivent la 2ème loi brute (et non la première). Ainsi la différence entre les deux classes n'est pas relative à la prise en compte ou non du frottement mais à des niveaux de maîtrise différents des lois et des équations vectorielles utilisées.

Pour les questions 2 et 3, les élèves de SVT répondent majoritairement « non » tandis que les élèves de l'option SI eux, répondent « oui » bien plus fréquemment. (cf. graphique 2).



Question 2	SI	SVT
Total oui	19	6
Justifié	15	4
Non justifié	4	2
Total non	9	12
Justifié	2	7
Non justifié	7	5
Question 3	SI	SVT
Total oui	11	3
Justifié	7	0
Non justifié	4	3
Total non	2	5
Justifié	5	5
Non justifié	7	0

Graphique 2. Réponses aux questions 2 et 3

Ainsi du point de vue des élèves de SVT, la dimension de la surface de contact ainsi que la vitesse n'influent pas sur la force de poussée nécessaire pour maintenir la caisse à vitesse constante, ce qui correspond à la réponse attendue, mais ils ont peu d'arguments. Bien que le taux de réponses justifiées diminuent, c'est à partir des

questions 2 et 3 et des suivantes (troisième groupe de question) que la référence au frottement devient fréquente pour les élèves de SI alors qu'elle reste rare pour les élèves de SVT.

Pour la question 2, la référence explicite au frottement n'apparaît qu'une seule fois en SVT. Elle est très fréquente chez les élèves de SI (13 sur 18 justifications) qui estiment majoritairement que la force due au frottement augmente avec la surface. La variable « dimension de la surface de contact » semble servir de déclencheur alors qu'elle est presque sans effet pour les élèves de l'option SVT. Il peut s'agir de raisonnement intuitif, ou bien d'une confusion avec le modèle de frottement fluide. Pour la question 3, la référence au frottement est absente en SVT. Elle apparaît dans 3 réponses en SI (sur les 11 justifiées), qui supposent que le frottement augmente avec la vitesse et explicitent le modèle de frottement fluide (sous la forme $F = kV$ ou $F = kV^2$). Mais les élèves ne précisent pas s'ils considèrent le frottement de l'air entourant la caisse ou bien réellement le frottement au contact caisse/sol : dans ce cas, il est difficile de conclure quant à une confusion entre les modèles.

4.3. Interprétations

Les différences entre les deux classes dans la prise en compte du frottement semblent indiquer que les élèves de SI auraient une plus grande familiarité avec le frottement que les élèves de SVT. Par contre, le modèle de Coulomb n'est jamais cité. Soit les élèves ne se sont pas appropriés ce modèle, soit ils ne pensent pas à l'utiliser dans un cas qu'ils n'ont pas étudié en sciences de l'ingénieur. En effet, en SI, ils utilisent cette loi dans des situations d'équilibre statique et non en dynamique.

Les différences en termes de maîtrise des outils mathématiques sont à relier avec les pratiques en sciences de l'ingénieur : la « manipulation » des solides en deux ou trois dimensions, les résolutions graphiques familiarisent les élèves de SI avec les vecteurs et les projections. Leur pratique régulière de la mécanique les amène à se fier plus volontiers aux calculs qu'à leur intuition première. Ils ont accepté que les résultats de la physique enseignée contredisent leurs intuitions. À l'inverse, les élèves de l'option SVT vont chercher dans les lois un argument en cohérence avec leur intuition première. Ils se contentent alors de vérifier dans les « formules » qu'ils connaissent la présence des variables sur lesquelles porte la question.

5. Discussion

Cette recherche pose la question des relations prescrites et effectives entre disciplines scientifiques voisines mais qui s'ignorent le plus souvent alors qu'elles parlent de choses différentes avec des mots similaires. Dans le cas abordé des sciences de l'ingénieur et de la physique, malgré l'injonction des programmes à concevoir la mécanique du solide comme un prolongement de la mécanique du point, il existe une disjonction au niveau des contenus prescrits. Le cloisonnement est renforcé par l'absence de relation entre enseignants des deux disciplines. Il

semble qu'il y ait une volonté pour chaque discipline d'affirmer sa spécificité pour conserver son identité. Le prix à payer va de la similitude voire de la redondance pour une partie du contenu à des divergences pour d'autres qui paraissent proches a priori.

Les résultats de l'analyse des concepts prescrits mettent en évidence des malentendus programmés pour le concept de frottement qu'il peut être intéressant de développer pour d'autres concepts. Ces résultats montrent la nécessité et l'intérêt d'une analyse détaillée des concepts qui portent la même étiquette avant d'envisager des enseignements qui articulent des disciplines voisines et des concepts proches car ils peuvent s'avérer en fait distincts.

L'investigation menée avec les élèves de l'option SI a mis en évidence certains effets que l'on peut attribuer soit aux liens faits par les élèves entre les deux disciplines soit au contraire à des malentendus. Par exemple, la prise en compte du frottement plus fréquente (par rapport aux élèves de l'option SVT), peut s'expliquer par une familiarité plus grande avec un concept qui a une place importante en sciences de l'ingénieur. Par contre, les difficultés repérées pour identifier les différences entre frottement fluide et frottement solide peuvent être rattachées au cloisonnement disciplinaire et au manque d'explicitation des limites des modèles utilisés dans chaque champ disciplinaire.

Nous prévoyons de poursuivre ce questionnement en nous intéressant aux représentations qu'ont les enseignants de physique et de SI de leur propre discipline et de celle de leur collègue et aux articulations qu'éventuellement ils proposent.

5.0. Bibliographie

- Accompagnement de programme. (2002). Sciences de l'ingénieur, cycle terminal série scientifique.
- B.O.E.N. (2001). Programme de sciences de l'ingénieur, *Bulletin officiel de l'éducation nationale, Hors Série N°3*, 71-82.
- B.O.E.N. (2000). Programme de l'enseignement de physique chimie en classe de première de la série scientifique, *Bulletin officiel de l'éducation nationale, Hors Série N°7*, 187-190.
- B.O.E.N. (2001). Programme de l'enseignement de physique chimie en classe terminale de la série scientifique, *Bulletin officiel de l'éducation nationale, Hors série N°4*, 84-89.
- Cartonnet, Y. (2002). Proposition d'un schéma d'organisation des formations de concepteurs à l'analyse de systèmes techniques : Pystile. *Aster*, 34, Paris : INRP, 157-180.
- Hannoun, P. (2005). « Frottements » entre physique et mécanique, dans A. Giordan, J.-L. Martinand, D. Raichvarg (Eds.), *Par les mots et par les choses, Actes des vingt septièmes Journées Internationales sur la Communication, l'Éducation et la Culture Scientifique, Technique et Industrielle*. [ressource électronique] Paris : DIRES.
- Malafosse, D. et Lerouge, A. (2000). Ruptures et continuités entre physique et mathématiques à propos de la caractéristique des dipôles électriques linéaires. *Aster*, 30, Paris : INRP, 66-85.
- Mariac L. (1980). *Introduction à l'étude du frottement*. Paris : Carima.

Martinand, J.-L. (1994). La didactique des sciences et de la technologie et la formation des enseignants. *Aster*, 19, Paris : INRP, 61-75.

Potvin, P. et M. Riopel, (2006). « More C ; less B » : étude d'intuitions mobilisées par des élèves du secondaire en contexte d'exploration libre des lois de la mécanique. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 6(3), 246-266.

Voss, V. (1991). Principes de la mécanique rationnelle, traduction Cosserat E. et Cosserat F., in J. Molk et P. Appell (Eds.), *Encyclopédie des sciences mathématiques pures et appliquées*. 2ème éd, tome IV, volume 1, Sceaux, J. Gabay.