

EP20 - Frottements

Introduction

Au XVII^e siècle, Galilée a l'intuition du principe d'inertie qui sera reformulé plus tard par Newton comme sa première loi : « tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite, à moins qu'il ne soit contraint, par des forces s'imprimant sur lui, à changer cet état » [1].

Cette loi ne peut s'observer dans la nature. Par exemple, lorsqu'on fait glisser un objet sur une table, il finit par s'arrêter. Les corps subissent toujours des forces et l'objet qui glisse sur la table subit une force : il frotte contre la table. Cette force de frottement correspond à la force qu'il faudrait appliquer à l'objet en sens inverse pour qu'il maintienne son mouvement rectiligne uniforme.

Les forces de frottements se manifestent lorsque deux corps sont en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elles s'opposent au mouvement relatif des deux corps. On peut distinguer deux cas selon que les corps en contact soit solides (on parlera de **frottement sec**) ou un solide et un fluide (**frottement fluide**).

Dans les deux cas, ces forces ne sont pas élémentaires et on ne s'attend pas à ce qu'elles suivent des lois simples.

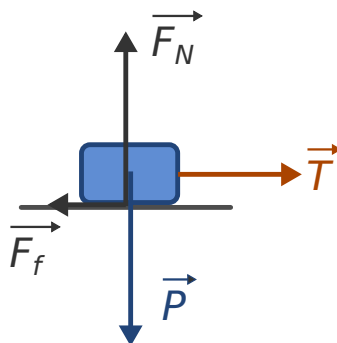
Les frottements secs sont dus à la présence d'irrégularités microscopiques. Pour que le corps puisse glisser, il faut le soulever pour passer les irrégularités mais cela le déforme, déplaçant des atomes, créant des ondes et donc dissipant de l'énergie sous forme thermique.



Figure 1

Malgré la complexité du phénomène, des lois phénoménologiques assez simples permettent tout de même de prédire la valeur de la force de frottement (lois de Coulomb). Elle est proportionnelle à la force normale avec un coefficient de proportionnalité μ qui dépend des matériaux en contact, de l'état des surfaces, et du type de frottement (statique, cinétique, roulement) [2].

$$F_f = \mu F_N$$



Remarque : si la vitesse de mouvement devient trop grande ou si la force normale est trop importante, la loi ne fonctionne plus (il y a trop d'énergie dissipée sous forme thermique).

Les frottements fluides sont également dus à des phénomènes complexes. Le fluide entre en contact avec l'objet, le contourne, crée des remous à l'arrière, etc. L'interaction d'une partie de l'objet sur le fluide va modifier le comportement du fluide et donc son effet sur le reste de l'objet.

Malgré cette complexité, on peut également prédire les valeurs de cette force de frottement par des lois phénoménologiques assez simples en se plaçant dans certaines conditions. C'est ce qu'on va voir dans la partie post-bac de l'exposé.

Dans l'enseignement, les frottements sont très souvent négligés pour simplifier les problèmes et permettre une meilleure compréhension des phénomènes principaux qui entrent en jeu. Néanmoins, les frottements étant omniprésents dans la réalité, certaines lois vues en classe peuvent se heurter aux conceptions des élèves. C'est ce qu'on verra dans la partie pédagogique dans le cadre de la conservation de l'énergie au collège.

Dans la pratique, on essaie souvent de réduire les frottements autant que possible. Ceux-ci sont responsables de la dissipation d'une certaine quantité d'énergie (thermique) qui doit être compensée par un travail supplémentaire. Ils sont également à l'origine de l'usure des pièces dans un système mécanique [3].

Dans certains cas au contraire, les frottements sont indispensables : freinage et modification de trajectoire, roue, amortisseurs ou vitesse limite lors d'une chute, etc.

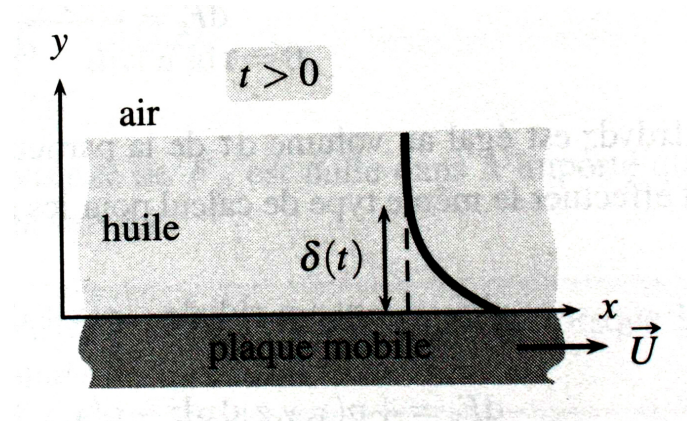
Partie post-bac : déplacement d'un objet dans un fluide

Prérequis :

- équation de Navier-Stokes ;
- équation de diffusion.

Transport de quantité de mouvement

On peut montrer qu'il existe deux modes de transport de la quantité de mouvement dans un fluide [4]. Si on considère un fluide newtonien de viscosité dynamique η entraîné par une plaque mobile selon (Ox) .



L'équation du mouvement d'une particule de ce fluide est donnée par l'équation de Navier-Stokes :

$$\mu \frac{d\vec{v}(M,t)}{dt} = -\overline{\text{grad}} p(M,t) + \vec{f}_{\text{vol}}(M,t) + \eta \Delta \vec{v}(M,t)$$

En projetant selon (Ox) (on suppose qu'on applique pas de gradient de pression selon x et on néglige le poids), on trouve :

$$\mu \frac{\partial v_x(y,t)}{\partial t} = \eta \frac{\partial^2 v_x(y,t)}{\partial y^2}$$

soit :

$$\frac{\partial p_x(y,t)}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu} \frac{\partial^2 p_x(y,t)}{\partial y^2}$$

On reconnaît une équation de diffusion, avec comme coefficient de diffusion, la **viscosité cinématique** $\nu = \eta/\mu$.

On peut alors définir un vecteur densité de courant de diffusion de quantité de mouvement :

$$\vec{j}_{p_x, \text{diff}} = -\frac{\eta}{\mu} \overline{\text{grad}} p_x(y,t)$$

qui permet de réécrire l'équation précédente sous forme d'équation de conservation locale de la quantité de mouvement.

Le déplacement des particules de fluide dans l'écoulement est également responsable du transport de quantité de mouvement mais sous forme de convection.

On considère un tube de fluide et on cherche la quantité de mouvement selon (Ox) qui va traverser la surface orientée dS_M , en M on trouve :

$$d^2 p_x = p_x(M,t) \vec{v}(M,T) \cdot d\vec{S}_M dt$$

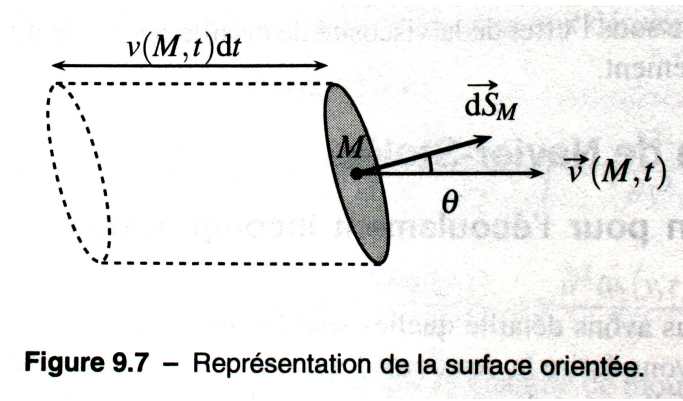


Figure 9.7 – Représentation de la surface orientée.

donc la quantité de mouvement selon (Ox) qui traverse la surface orientée dS_M pendant une durée dt vaut :

$$dp_x = \frac{d^2 p_x}{dt^2} = p_x(M,t) \vec{v}(M,T) \cdot \overrightarrow{dS_M} = \vec{j}_{p_x, \text{conv}} \cdot \overrightarrow{dS_M}$$

En définissant un vecteur densité de courant de convection de quantité de mouvement :

$$\vec{j}_{p_x, \text{conv}} = p_x(M,t) \vec{v}(M,T)$$

Nombre de Reynolds

En général, les deux modes de transport coexistent dans le fluide et on peut évaluer un ordre de grandeur de leur importance relative.

$$\dot{j}_{p_x, \text{conv}} \sim \mu V^2$$

$$\dot{j}_{p_x, \text{diff}} \sim \frac{\eta V}{L}$$

où V et L sont les vitesses et distances caractéristiques du système.

Le rapport des vecteur densité de courant de quantité de mouvement est donc de l'ordre de :

$$\frac{\dot{j}_{p_x, \text{conv}}}{\dot{j}_{p_x, \text{diff}}} \sim \frac{\mu V^2}{\frac{\eta V}{L}} = \frac{\mu V L}{\eta} = \mathbf{Re}$$

Ce nombre s'appelle le **nombre de Reynolds**.

Si Re est grand, le transport convectif prédomine par rapport à la diffusion. La viscosité joue donc un rôle négligeable à l'échelle des distances du système.

Si Re est petit, le transport diffusif prédomine par rapport à la convection. La viscosité joue donc un rôle important à l'échelle des distances du système.

Déplacement d'une sphère dans un fluide

Par un changement de référentiel, on peut ramener la situation d'une sphère qui se déplace dans un fluide à la vitesse $\vec{V}$ à celle d'un fluide qui se déplace à la vitesse autour d'une sphère immobile et dont la vitesse à grande distance de la sphère est $\vec{U} = -\vec{V}$.

Le fluide va exercer une force sur la sphère dont la composante orientée dans le sens inverse du déplacement, la **traînée** correspond à la force de frottement (la composante normale dans le plan vertical s'appelle la portance et celle dans le plan horizontal la dérive).

Comme l'écoulement du fluide est caractérisé par son nombre de Reynolds, on va chercher d'établir un lien entre la force F de traînée et Re par analyse dimensionnelle.

Les paramètres du système sont : F (MLT^{-2}), U (LT^{-1}), D (L), μ (ML^{-3}) et η ($ML^{-1}T^{-1}$).

Ici $Re = \mu U D / \eta$ est sans dimension. On peut établir un autre nombre sans dimension qui comprend la force F : $F / \mu U^2 D^2$. On cherche donc une fonction f telle que :

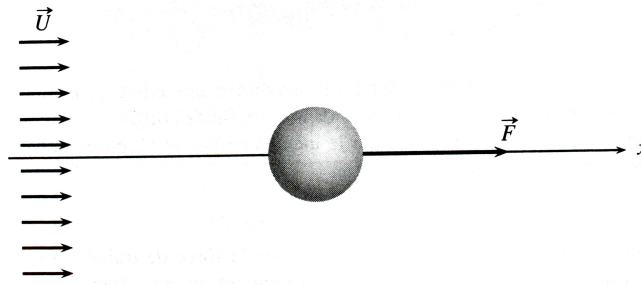


Figure 9.10 – Sphère placée dans un écoulement uniforme.

$$\frac{F}{\mu U^2 D^2} = f(Re)$$

Relation qui est généralement écrite sous la forme :

$$C_x(Re) = \frac{8F}{\mu \pi D^2 U^2}$$

où la fonction C_x est appelée **coefficient de traînée**.

L'intérêt de cette relation sans dimension est qu'elle permet de modéliser en laboratoire l'écoulement d'un fluide autour d'une maquette à condition de faire en sorte que le nombre de Reynolds dans la maquette soit le même que celui du phénomène à taille réel.

Voici les résultats de mesures expérimentales du coefficient de traînée [4] :

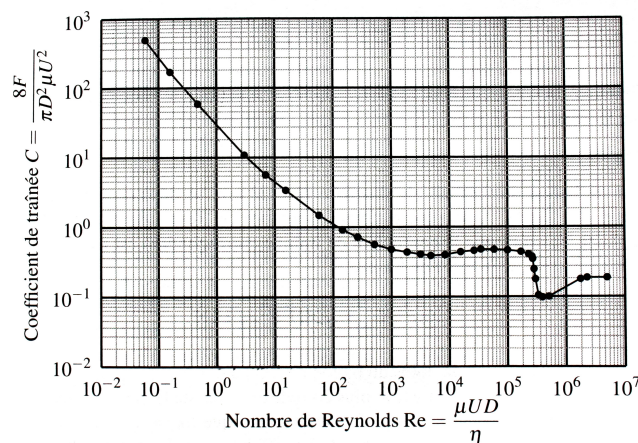


Figure 9.11 – Coefficient de traînée C_x d'une sphère en fonction du nombre de Reynolds.

Quand Re est petit ($Re < 1$), on observe une droite sur l'échelle logarithmique dont les paramètres donnent $C_x = 24Re^{-1}$.

En remplaçant dans l'expression de F , on trouve :

$$F = \frac{1}{2} \frac{24}{Re} \mu \frac{\pi D^2}{4} U^2 = 6\pi\eta R U$$

Dans le cas où la sphère se déplace par rapport au fluide avec la vitesse $\vec{V} = -\vec{U}$:

$$\vec{F} = -6\pi\eta R \vec{V}$$

On trouve ainsi une loi phénoménologique assez simple de la force de frottement fluide : elle est proportionnelle à la vitesse.

Quand Re est plus grand ($10^3 < Re < 10^5$), le coefficient de traînée devient indépendant de Re . Graphiquement, on trouve ici qu'il vaut environ 0,4.

On trouve alors pour une sphère se déplaçant à la vitesse $\vec{V}$:

$$\vec{F} = -\frac{1}{2}C_{x\mu\pi}R^2\|\vec{V}\|\vec{V}$$

On trouve à nouveau une loi phénoménologique assez simple de la force de frottement fluide : elle est proportionnelle à la vitesse au carré.

Pour les autres cas intermédiaires, on ne trouve pas de loi phénoménologiques simples de ce type.
Remarque : un phénomène intéressant se produit pour un certain nombre de Reynolds qui se traduit par une chute importante de la force de traînée. On peut forcer son apparition à des Re plus faibles en jouant sur les aspérités de la surface (balle de golf par exemple).

Partie pédagogique : conservation de l'énergie lors d'une chute

Le programme du collège n'aborde pas explicitement la notion de frottements.

Une part importante des programmes de cycle 3 et 4 est consacrée aux mouvements (description du mouvement, modélisation de forces, aspects énergétiques). Dans la très grande majorité des cas, les problèmes ou exemples traités au collège sont simplifiés en négligeant les effets dus aux frottements. Bien que cela permette de mieux se focaliser sur les phénomènes principaux qui agissent sur le mouvement, il est souvent indispensable de tout de même discuter avec les élèves des effets additionnels des frottements. En effet, les conceptions des élèves qui sont basées sur leur vécu quotidien intègrent les frottements et les empêche parfois d'intégrer certaines notions qui leurs paraissent contraire au bon sens.

Dans cette partie, je vais donc présenter une activité expérimentale mettant en évidence les frottements et leur effet sur le mouvement d'une bille, ainsi que sa conséquence sur la conservation de l'énergie.

Puis je présenterai une application sous forme de tâche complexe qui va permettre remettre en cause une idée reçue des élèves en se servant des frottements.

Bilan énergétique de la chute d'une bille

L'activité se déroule sur une séance en classe entière avec des élèves de troisième, plus un travail à faire à la maison suivi d'une mise en commun en classe. Les élèves ont déjà vu en classe comment calculer la valeur de l'énergie cinétique d'un objet et la valeur de son énergie potentielle de pesanteur. Les objectifs de l'activité sont les suivants :

- mettre en évidence les frottements et leur effet sur le mouvement
- tracer un graphique et l'interpréter

Les élèves vont déterminer la variation d'énergie mécanique d'une bille au cours de sa chute libre dans l'air, puis dans la glycérine. Pour cela on filme la chute de la bille dans les deux cas et une acquisition permet de relever les altitudes de la bille en fonction du temps. Les élèves vont ainsi constater que l'énergie mécanique de la bille se conserve dans le premier cas mais pas de le second.

Le cas de la chute dans l'air est réalisé en classe. Avant de réaliser l'expérience, on demande aux élèves de réfléchir afin de savoir si on peut prédire le résultat avec nos connaissances actuelles.

On essaie de se rappeler quelles sont les énergies que la bille possède (énergies cinétique et potentielle de pesanteur), on essaie de retrouver les relations mathématiques qui permettent de les calculer et on les notes au tableau. Puis on essaie de deviner comment ces grandeurs vont varier. En général, les élèves ont assez facilement l'intuition que l'énergie potentielle va diminuer et que l'énergie cinétique va augmenter.

Pour le vérifier, on va effectuer les mesures et les calculs. Pour que les élèves s'approprient plus facilement l'expérience, on leur demande comment faire pour réaliser les mesures (en leur rappelant que pour voir l'évolution de l'énergie, il faudra réaliser plusieurs mesures pour pouvoir tracer un graphique). L'idée de départ qui correspond à des mesures qu'ils ont déjà pu faire consiste à prendre une règle et un chronomètre mais un rapide essai montre que la chute est trop rapide. Les élèves pensent généralement à filmer mais ils ne connaissent pas encore le logiciel de pointage.

Selon que le temps et la classe le permettent ou pas, on peut réaliser la mesure en classe et faire le pointage au vidéoprojecteur puis projeter les valeurs obtenus. On obtient les altitudes, les temps correspondant (en expliquant rapidement qu'on le déduit du nombre d'image par seconde prises par la caméra) et une interrogation rapide des élèves devrait permettre de retrouver comment calculer la vitesse, ce qui est fait au vidéoprojecteur dans un tableau.

Les élèves travaillent ensuite en autonomie avec un sujet et des questions pour les guider dans la démarche. Ils disposent aussi d'une fiche réponse au bureau qu'ils peuvent consulter. Cela permet aux élèves les plus rapides d'avancer à leur rythme tout en permettant au professeur d'apporter son aide aux élèves les plus en difficulté.

Les difficultés rencontrées sont souvent les suivantes :

- difficulté à réaliser les calculs (donner les grandeurs dans les bonnes unités permet de simplifier cette partie) ;
- difficultés à tracer le graphique (on peut proposer une échelle simple, proposer une fiche méthode ou donner un graphique prétracé où il n'y a plus qu'à placer les points ; souvent le fait de tracer un point avec un élève l'aide à faire les suivants) ;
- très grande hétérogénéité dans la vitesse avec laquelle les élèves vont réaliser les calculs et tracer le graphique (il faut proposer des exercices d'approfondissement pour les plus rapides) ;

Pour ne pas présenter l'énergie mécanique comme une simple énergie de plus à connaître, on part des résultats obtenus sur le graphique en constatant que les deux courbes (E_c et E_{pp}) semblent être symétriques et que peut-être une évolution compense l'autre. Pour le vérifier on calcule la somme et c'est cette somme qu'on appellera **énergie mécanique**.

En fin de séance, on fait le bilan oralement sans le noter dans le cahier car il reste à exploiter la chute dans la glycérine : au cours de la chute, l'énergie potentielle de pesanteur de la bille se transforme en énergie cinétique de sorte que l'énergie mécanique se conserve.

L'exploitation de l'expérience dans la glycérine sera à faire selon le même principe à la maison pour la séance suivante avec quelques variantes selon les difficultés rencontrées par les élèves lors de la séance. On peut ainsi redemander le tracé de la courbe uniquement pour les élèves qui n'ont pas réussi à le faire en classe ; de même pour les calculs...

À la fin du travail, l'élève doit exploiter ses résultats et conclure sur la différence entre les deux expériences, d'une part sur le mouvement, d'autre part sur l'énergie en essayant de justifier sa conclusion.

À la séance suivante, on met les résultats en commun. La plupart des élèves remarque que la bille est freinée dans la glycérine mais ont parfois du mal à interpréter la partie du mouvement où la vitesse est constante (la bille est-elle freinée ou pas...) ; il faut donc préciser cette notion de forces ou d'effets qui se compensent. En général, les élèves évoquent la notion de frottement.

Ils remarquent facilement que l'énergie mécanique ne se conserve plus avec les frottements mais ont plus de mal à l'interpréter. Quelques élèves supposent que l'énergie se perd à cause des frottements mais très peu s'imaginent que l'énergie perdue est en fait transformée en énergie thermique.

Dans certains groupes, il arrive que des élèves constatent la présence de légers frottements dans l'air dont on pourra discuter.

Suit la mise au propre dans le cahier du résultat de l'expérience, à savoir la conservation de l'énergie mécanique en l'absence de frottements.

Tâche complexe

La situation déclenchante de la tâche complexe est la question suivante : « quelle sera la vitesse d'une balle de golf que je lâcherais de la fenêtre de la salle de classe au moment où elle touche le sol ? ».

Les élèves ont à leur disposition la balle de golf, un mètre et une photo du collage.

L'avantage de cette tâche complexe est qu'elle peut être exploitée de différentes façons. Sous forme d'évaluation, elle permettra d'évaluer plusieurs compétences (mesures, calculs d'échelle, raisonnement, application numérique, analyse du résultat, etc.). Il faudra toutefois prévoir quelques pistes pour aiguiller les élèves dans les grandes étapes de la résolution.

Sous forme de travail en groupe, on pourra laisser les élèves en autonomie et leur apporter une aide spécifique au fur et à mesure des besoins. Il faudra peut-être aiguiller les élèves au départ sur la piste de la conservation de l'énergie cinétique car la plupart parte sur l'idée de calculer la vitesse moyenne en chronométrant la chute.

La dernière approche consiste à résoudre le problème en classe entière en questionnant les élèves au fur et à mesure de l'avancement.

Le problème est assez difficile à résoudre par les élèves sans aide. Il faut d'abord trouver les données du problème (les élèves mesurent directement la masse de la balle, doivent trouver une échelle qui

leur permettra de mesurer la hauteur de la chute sur la photo du collègue, appliquer la conservation de l'énergie mécanique à la balle pour trouver sa vitesse puis vérifier que la vitesse est plausible).

Ceux qui y parviennent trouvent une valeur de la vitesse de la balle correcte mais la quasi totalité des élèves passe à côté du résultat important à cause de leur difficulté à raisonner sur des résultats littéraux plutôt que numériques. Aussi, le point important sera souvent vu lors de la correction.

Lorsque l'on résout le problème, on trouve que l'expression de la vitesse de la balle vaut $v = \sqrt{2gh}$. Elle ne dépend pas de la masse ! Cela surprend les élèves et la majorité ont l'intuition que ce résultat est faux. Tous sont persuadés qu'en lâchant un objet plus lourd, il aura une vitesse plus élevée et tombera plus vite.

Certains élèves vont alors spontanément invoquer les frottements que l'on n'a pas pris en compte et qui pourraient expliquer le résultat surprenant.

Dans ce cas on leur suggère que si les frottements étaient identiques (en prenant par exemple une balle de golf et une balle de ping-pong qui ont la même forme et taille), les balles devraient toucher le sol en même temps... Ils sont en général dubitatifs mais la réalisation de l'expérience filmée au ralenti par le téléphone d'un élève prouve que c'est bien le cas !

Bibliographie

- [1] R. Feynman, *Le cours de physique de Feynman, Mécanique 1* (Dunod, Paris, 2018).
- [2] E. Hecht, *Physique* (De Boeck Université/ITP, Paris Bruxelles, 1999).
- [3] G. Dhont, D. Braquart, et É. Pennacin, *Physique-chimie Capes & agrégation, Plans d'exposés et de montages*, 1 édition (De Boeck, 2018).
- [4] M.N. Sanz, *Physique : tout-en-un : PC-PC** (Dunod, Malakoff, 2016).

Commentaires

- La science qui étudie les frottements s'appelle la tribologie.
- Ne pas entrer dans les détails microscopiques des forces de frottement dans l'introduction et garder l'explication pour les questions (peut-être parler de lois phénoménologiques simples et contre-intuitives).
- Accélérer sérieusement la partie transport en identifiant directement la partie $(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{V}$ de l'équation de Navier-Stokes à la contribution convective et le terme $\eta \Delta \vec{V}$ à la contribution diffusive.
- Attention, dans la présentation, la simplification de la dérivée particulaire de la vitesse en dérivée partielle par rapport au temps (mise en place de l'équation de diffusion) suppose de faire l'approximation $v_y = 0$.
- Le temps gagné sur la partie « transport » permet de terminer la partie post-bac par deux exemples dans chacun des cas où les frottements sont proportionnels à la vitesse ou à la vitesse au carré.
- Il faut se focaliser davantage sur les frottements dans la partie pédagogique (éventuellement se focaliser sur la chute dans la glycérine).
- Une alternative pour la partie pédagogique est de traiter le pendule avec frottement fluide au lycée.