

Physique Générale C
Semestre d'automne (11P090)
Notes du cours basées sur le livre
Physique
de Eugene Hecht, éditions De Boeck

Chapitre 5

Enseignante:
Anna Sfyrla

Assistant(e)s:
Mireille Conrad
Tim Gazdic
Jean-Marie Poumirol
Rebecka Sax
Marco Valente

Bibliographie

- [1] Eugene Hecht, Physique, éditions De Boeck.
- [2] Eugene Hecht, College Physics, Schaum's outlines.
- [3] Randall D. Knight, Physics for Scientists and Engineers, Pearson.
- [4] Yakov Perelman, Oh, la Physique!, Dunod.

Table des matières

5	La dynamique: Frottement et mouvement	1
5.1	Le frottement statique	1
5.2	Le frottement cinétique	3
5.3	Le frottement avec roulement	3

La dynamique: Frottement et mouvement

L'expérience quotidienne montre qu'en l'absence de force motrice, tout objet en mouvement fini par s'arrêter, en violation apparente de la première loi de Newton. La deuxième loi nous dit qu'il faut une force pour décélérer le mouvement: c'est la **force de frottement**.

Il y a deux formes principales de frottements: le **frottement cinétique** qui s'oppose à un mouvement déjà établi, et le **frottement statique** qui empêche un mouvement de démarrer.

L'origine du frottement est l'interaction électromagnétique des atomes qui forment les solides, les liquides et les gaz. Le **frottement liquide-gaz** nous évite d'être bombardés par des gouttes de pluie de grande vitesse. Il permet au vent de remuer la mer. Le **frottement liquide-solide** ralentit la circulation du sang dans les vaisseaux. Le frottement des marées contre le sol ralentit la rotation de la terre. Le **frottement solide-gaz** ralentit les voitures: à 110 km/h une voiture utilise 70% de son carburant pour vaincre la résistance de l'air. Le **frottement solide-solide** nous permet d'agir: sans lui on ne pourrait ni porter des vêtements, ni marcher, ni manger.

Dans la suite de la discussion, nous nous intéressons au frottement sec (non lubrifié) et nous limiterons la discussion aux solides immobiles, glissants ou roulants sur d'autres solides. Attention: l'analyse du frottement est difficile et sa base expérimentale est limitée par les contaminations (e.g. traces de liquide entre les surfaces).

5.1 Le frottement statique

Un bloc de poids \vec{F}_W est posé sur une table qui lui oppose une force normale \vec{F}_N , toutes deux verticales (figure 5.1). Une force horizontale \vec{F} est appliquée et mesurée par un dynamomètre à ressort. Si cette force est faible, le bloc ne bouge pas. Il y a donc une force vers la gauche égale et opposée à \vec{F} , parallèle à la surface, qui s'oppose au mouvement. C'est la force de frottement statique \vec{F}_f .

Si \vec{F} augmente sans que le bloc bouge, \vec{F}_f doit aussi augmenter. Quand \vec{F} dépasse une valeur limite, le bloc finit par se mettre en mouvement. Cette limite correspond au maximum du frottement statique \vec{F}_f^{max} .

La force de frottement maximum \vec{F}_f^{max} est proportionnel à la force normale:

$$\vec{F}_f^{max} = \mu_s \vec{F}_N$$

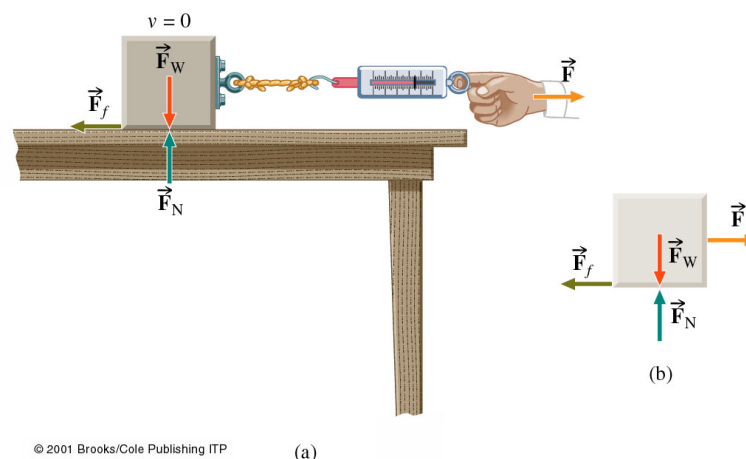


Figure 5.1: (a) Une force horizontale F agissant par l'intermédiaire d'un dynamomètre sur un bloc immobile de poids F_W . Le frottement statique s'oppose au démarrage du mouvement avec une force F_f . (b) La représentation de corps isolé indique qu'il n'y a aucune accélération tant que $F < F_f$. Pour calculer la force totale on peut dessiner les forces originant toutes du même point. Cette approche est valable que pour les mouvements rectilignes qu'on étudie ici.

Le coefficient de proportionnalité μ_s est le coefficient de frottement statique et dépend des deux matériaux en contact. Quelques exemples qualitatifs de μ_s sont donnés dans le tableau 5.1. \vec{F}_f^{max} est indépendante de l'étendue de la surface de contact entre les deux corps. Ainsi la force de frottement maximum d'un parallélépipède rectangle posé sur une table est la même pour toutes ses faces.

Matériaux	μ_s	μ_c
Acier sur glace	0.1	0.05
Acier sur acier, sec	0.6	0.4
Acier sur acier, lubrifié	0.1	0.05
Bois sur bois	0.5	0.3
Téflon sur acier	0.04	0.04
Chaussures sur glace	0.1	0.05
Bottes de montagne sur rocher	1.0	0.8
Pneus de voiture sur béton sec	1.0	0.7
Caoutchouc sur asphalte	0.6	0.4

Tableau 5.1: Exemples qualitatifs de coefficients de frottement statique, μ_s et de frottement cinétique, μ_c . Ce dernier sera discuté dans la suite.

Exemple 5.1.1. Une alpiniste est debout sur la face rocheuse d'une montagne. Les semelles et les talons de ses chaussures ont un coefficient de frottement statique égal à 1.0. (a) Quelle est la plus grande pente du rocher sur lequel elle peut se maintenir sans glisser? (b) Supposant que ses habits ont un coefficient de frottement statique 0.3, que se passe-t-il si elle s'assoit sur la pente pour se reposer?

Solution (a) Le poids de l'alpiniste, \vec{F}_W , agit verticalement. Sa composante normale à la surface est compensée par la force de réaction normale du sol. La composante parallèle

à la surface rocheuse est compensée par la force de frottement. L'alpiniste est immobile selon les deux directions parallèles et perpendiculaires:

$$\sum F_{\perp} = 0 = F_N - F_W \cos \theta \Rightarrow F_N = F_W \cos \theta$$

$$\sum F_p = 0 = F_f - F_W \sin \theta \Rightarrow F_f = F_W \sin \theta$$

Donc:

$$\begin{aligned} \frac{F_f}{F_N} = \tan \theta &\Rightarrow \frac{F_f^{max}}{F_N} = \tan \theta_{max} = \mu_s \\ &\Rightarrow \theta_{max} = \arctan \mu_s \end{aligned}$$

ce qui vaut 45° pour $\mu_s = 1.0$.

(b) Si l'alpiniste s'assied avec des habits dont le coefficient de frottement vaut 0.3, l'angle maximum se réduit à $\theta_{max} = 17^\circ$. Elle glissera donc pour tout angle supérieur à 17° . Elle va chuter si elle commet l'imprudence de s'asseoir.

5.2 Le frottement cinétique

Si la force sur un objet au repos dépasse \vec{F}_f^{max} , l'objet se met à glisser dans la direction de la force appliquée. La force de frottement cinétique est égale et opposée à la force motrice que l'on doit appliquer pour maintenir l'objet en mouvement uniforme. L'expérience montre que les lois citées pour le frottement statique restent valables, mais avec un coefficient de frottement cinétique, μ_c , inférieur et qui de plus diminue légèrement avec la vitesse de glissement:

$$F_f = \mu_c F_N$$

Le tableau 5.1 montre que le frottement statique est habituellement supérieur au frottement cinétique, ce qu'on peut facilement sentir lorsqu'on pousse un corps lourd. En pratique, le frottement cinétique diminue lorsque la vitesse de glissement augmente.

5.3 Le frottement avec roulement

La roue facilite considérablement le transport des charges par rapport au glissement. La raison est qu'en roulant sans glisser sur une surface, on élimine le frottement statique et le frottement cinétique. Mais comme il y a aussi propulsion, il y a forcément frottement. L'effet peut être décrit d'une manière analogue aux autres effets de frottement:

$$F_f = \mu_r F_N$$

avec un coefficient de frottement avec roulement, μ_r , bien inférieur à μ_s et μ_c .

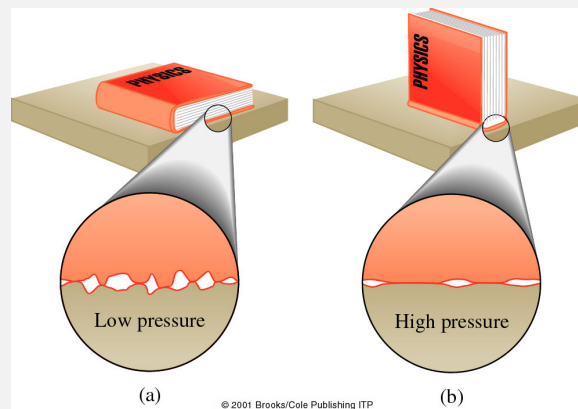
La force de frottement est encore une fois égale et opposée à la force motrice nécessaire pour que l'objet conserve une vitesse uniforme. Le frottement est dû à la déformation de la roue et de la surface de support. Si la roue et la surface sont dures, la déformation est faible, comme dans le cas des roues d'acier sur des rails d'acier, avec un μ_r qui ne dépasse guère 0.001. Un pneu sur du béton a un coefficient de l'ordre de 0.01 à 0.02 (avantage du rail sur la route).

Origine du frottement

Le frottement provient de l'attraction électromagnétique entre les atomes qui constitue la force de cohésion de la matière solide. Elle est de courte portée et devient négligeable à des distances de l'ordre de 10 rayons atomiques. À cette échelle, les surfaces de matériaux courants, mêmes polies, sont rugueuses.

Deux surfaces apparemment lisses ne se touchent en réalité que sur une petite fraction de leur surface apparente. D'autre part, la surface se déforme quand la pression, i.e. la force par unité de surface, est suffisamment grande. La surface effective est augmentée par la pression, et le frottement aussi, jusqu'à un certain équilibre. A poids constant, la pression est inversement proportionnelle à la surface apparente de contact. Si la surface apparente diminue, la pression augmente et la surface effective reste à peu près constante. Ceci explique que le frottement est indépendant de la surface (apparente) de contact pour un corps donné.

Les forces de frottement statiques apparaissent entre deux surfaces en contact. Deux pièces de métal, tel que l'or, pressées ensemble, fondent littéralement aux points de contact, et sont soudées à froid. En gardant les surfaces séparées, on réduit la cohésion et le frottement. C'est le rôle de l'huile et de la graisse pour les machines, du talc pour les sportifs et du liquide synovial pour les articulations.



(a) Si le charge est répartie sur une grande surface de contact, la pression est faible et il y a beaucoup de zones de contact réel. (b) Si la charge est concentrée, la pression est plus grande et il y a moins de zones de contact mais elles sont plus grandes. Ainsi, la superficie totale de contact réel est la même dans (a) et dans (b). Sur ces zones de contact réel, les deux corps sont littéralement soudés ensemble et des forces doivent être exercées pour les séparer.

L'adhérence est réduite si les deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre; donc en général, $\mu_c < \mu_s$. Lorsqu'il n'y a aucun mouvement relatif des deux corps, leurs surfaces viennent en contact étroit. Mais quand ils glissent l'un sur l'autre, les surfaces se touchent surtout aux points saillants. Par contre, en roulant, les soudures de frottement sont arrachées plutôt qu'abrasées ou déchirées, ce qui nécessite moins de force. De plus, pendant le glissement, des couches de saleté, d'oxydes et de graisse peuvent s'interposer entre les corps, ce qui peut réduire le frottement. Cela ne se produit pas dans le cas de corps en roulement où l'adhérence est encore plus faible $\mu_c > \mu_r$.

Exercices

Exercice 5.1. Une caisse en bois de masse totale de 100 kg doit être déplacée sur un plancher en chêne. On la tire avec une corde qui fait un angle de $\theta = 30^\circ$ avec le plan horizontal. Le coefficient de frottement statique est 0.5. (a) Quelle est la force minimale pour la mettre en mouvement ? (b) Est-elle plus grande ou moins grande si $\theta = 0$?

Exercice 5.2. Un camp est à flanc de montagne incliné à 30° . Quelqu'un doit tirer une luge de 200 kg vers le haut en la faisant glisser sur une surface dont le coefficient de frottement cinétique est 0.1. Si la personne peut exercer une force de traction de 200 N parallèlement au plan incliné, calculer l'accélération de la luge.

Exercice 5.3. Une malle de 100 kg remplie de vieux livres est traînée sur le plancher par une jeune femme qui exerce une force de 300 N vers le bas à 30° avec le plan horizontal. (a) Sachant que $\mu_c = 0.40$ et $\mu_s = 0.50$, calculer l'accélération résultante. (b) Supposons que la femme mette de côté certains livres, réduisant la charge à 50 kg. Que devient l'accélération? (c) Dans ce dernier cas et comme elle a un peu de mal, elle verse de l'huile sous la malle, de façon à ce que $\mu_s = 0.40$ et $\mu_c = 0.30$. Quelle est alors l'accélération?