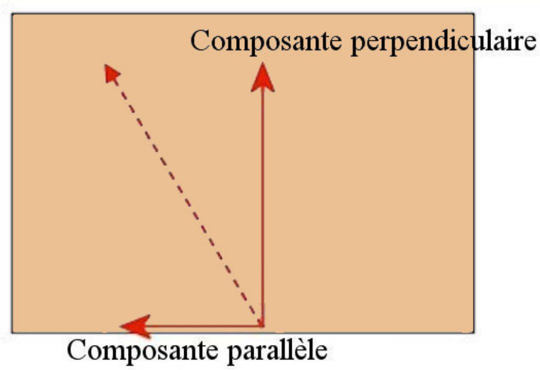
# 5 LES FORCES, 2$^{E}$ PARTIE

***Julie est en route vers le Saguenay dans son véhicule se déplaçant à 126 km/h. Soudainement, elle aperçoit un orignal sur la route et elle doit s'arrêter sur une distance de 100 m. Quelle est la valeur minimale du coefficient de friction statique entre le sol et les pneus si elle veut s'arrêter avant de frapper l'orignal et que les roues ne sont pas bloquées ?***

***wot.motortrend.com/animals-rejoice-volvo-developing-animal-detection-safety-technology-231543.html***

**Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.**

# 5.1 LA FORCE DE FRICTION ENTRE DEUX SURFACES

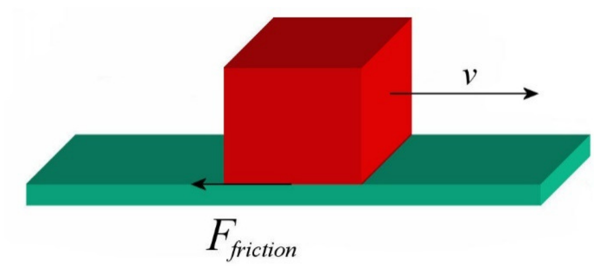



Retournons à la force de contact entre deux objets vue au chapitre précédent. Nous avions alors séparé cette force en deux composantes : une composante perpendiculaire (la normale) et la composante parallèle. C'est cette composante qui sera notre force de friction.

Il y a deux types de force de friction : le frottement cinétique et le frottement statique.

## La force de friction cinétique

La force de friction cinétique agit sur un objet qui glisse sur une surface. Souvent, cette force s'oppose au mouvement.



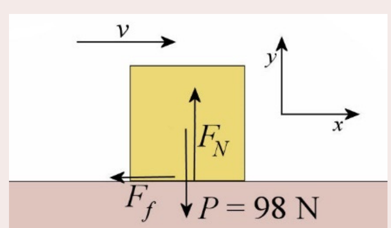

Cette force de friction est donnée par la formule suivante.

$$F_f = \mu_c F_N$$

où $\mu_c$ est un coefficient appelé le *coefficient de friction cinétique* et $F_N$ est la normale entre les deux objets en contact. La valeur de $\mu_c$ dépend seulement de la nature des surfaces en contact. Nous donnerons des valeurs typiques un peu plus loin.

### Exemple 5.1.1

Une boite de 10 kg glisse sur un plancher. Le coefficient de friction cinétique entre le plancher et la boite est de 0,4. Quelle est la force de friction qui s'exerce sur la boite ?




Pour trouver la force, on doit premièrement calculer la valeur de la normale entre le sol et la boite. Les forces sur la boite sont indiquées sur la figure. La somme des forces en $y$ est

$$\sum F_y = -98N + F_N$$

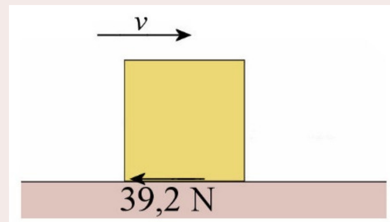
Puisque l'accélération en $y$ est nulle, on a

$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad -98N + F_N = 0$$

De là, on obtient $F_N = 98$ N.

On peut maintenant trouver la valeur de la force de friction.

$$\begin{aligned} F_f &= \mu_c F_N \\ &= 0,4 \cdot 98N \\ &= 39,2N \end{aligned}$$




La force est opposée au mouvement de la boite.

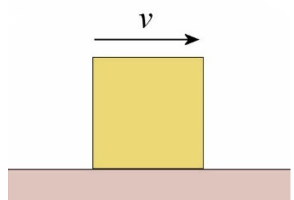
Il ne faut pas croire que la friction s'oppose toujours au mouvement. Si on tire une nappe et qu'il y a des assiettes sur la table, vous remarquerez que les assiettes initialement au repos se mettent en mouvement pendant que la nappe passe sous elles.
https://www.youtube.com/watch?v=T9KPwNeCdSg
Ce qui met les assiettes en mouvement, c'est la force de friction entre la nappe et les assiettes. Dans ce cas, la friction ne s'oppose pas au mouvement, elle cause le mouvement des assiettes. En tirant la nappe assez rapidement, la force agit sur les assiettes pendant un très court instant et les assiettes gagnent très peu de vitesse. S'il n'y avait pas de friction du tout entre la nappe et les assiettes, elles resteraient exactement à la même place.

Si on ne tire pas assez vite sur la nappe, la force de friction agit plus longtemps sur les assiettes, ce qui leur donne une vitesse assez grande pour qu'elles tombent au sol.
https://www.youtube.com/watch?v=AcaSt5xD9Is

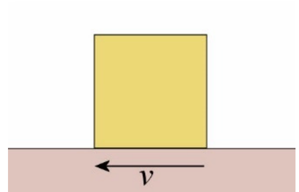
(Parfois, on rate ce truc, mais pour d'autres raisons
https://www.youtube.com/watch?v=O3_51pXJ00M)

On peut même avoir ce truc en version plus imposante.
https://www.youtube.com/watch?v=vfnt8Sdj7cs
Ici, la force agit quand même assez longtemps sur la dernière assiette au bout de la table. Pour réussir le truc, il a donc fallu réduire la friction entre la table et les objets sur la table. Voir le vidéo de Mythbuster sur ce sujet pour le connaitre.
https://www.youtube.com/watch?v=lK1ci50DUgc

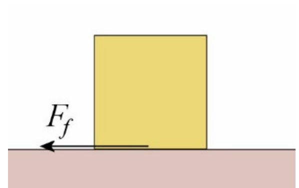
Pour déterminer correctement la direction de la force de friction, il faut prendre le point de vue de l'objet que l'on étudie et regarder dans quelle direction se déplace l'autre surface. Commençons par le cas le plus courant : l'objet qui glisse sur un sol immobile.



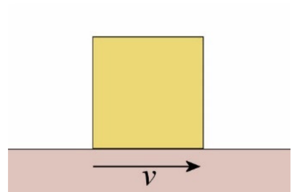

Prenons le point de vue du bloc. Cela veut dire qu'on considère que le bloc est immobile et que c'est le sol qui se déplace. On a alors



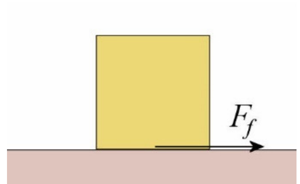

On obtient alors la direction du mouvement relatif de l'autre surface (ici le sol). Cette direction est la direction de la force de friction.



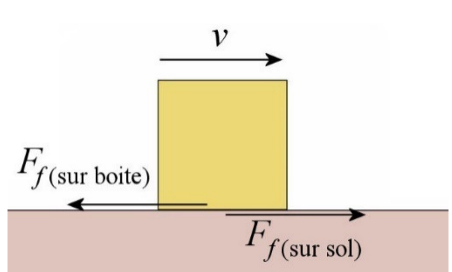

Prenons un autre cas, un objet immobile sur une surface qui se déplace (comme les assiettes sur une nappe qu'on retire). On a alors




Dans cette situation, on a déjà le point de vue du bloc puisqu'il est immobile. La direction du mouvement relatif est donc vers la droite et la force de friction est donc aussi vers la droite.




Petite remarque concernant la troisième loi de Newton : si le sol fait une force de friction sur un bloc, alors le bloc fait une force de friction sur le sol dans la direction opposée.



On peut donc résumer ainsi.

**La force de friction cinétique ($F_f$)**

1) Grandeur de la force

$$F_f = \mu_c F_N$$

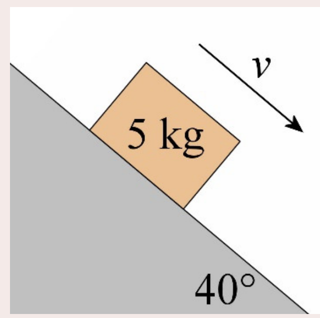
2) Direction de la force

Parallèle à la surface de contact,
dans la direction du mouvement relatif de l'autre surface.

3) Point d'application de la force

Surface de contact entre les objets.

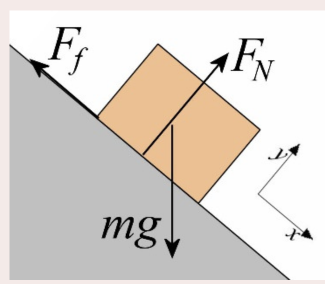
## Exemple 5.1.2




Un bloc glisse vers le bas d'un plan incliné de 40°. Le coefficient de friction cinétique entre la pente et le bloc est de 0,4. Quelle est l'accélération du bloc ?

On trouve l'accélération avec la 2e loi de Newton en examinant les forces qui s'appliquent le bloc.

*<u>Les forces agissant sur l'objet</u>*

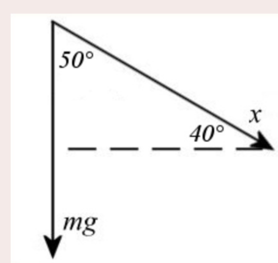



Les forces sur le bloc sont :

1) Le poids ($mg$) vers le bas
2) La normale ($F_N$) faite par la pente.
3) La friction ($F_f = \mu_c F_N$) faite par la pente et dirigée vers le haut de la pente.

(On a mis $mg$ pour le poids plutôt que 49 N pour montrer quelque chose d'intéressant à la fin.)

*<u>Somme des forces</u>*




La normale et la friction sont alors directement dans la direction d'un axe et il n'est pas difficile de trouver leurs composantes. Par contre, la situation est plus compliquée pour le poids. Traçons la force et l'axe des $x$ ensemble. L'angle entre l'axe des $x$ et la force de gravitation est de -50°.

Les composantes des forces sont donc

| Forces | *x* | *y* |
|---|---|---|
| **Poids** | $mg$ cos(-50°) | $mg$ sin(-50°) |
| **Normale** | 0 | $F_N$ |
| **Friction** | $-\mu_c F_N$ | 0 |

Les sommes des forces sont donc

$$\sum F_x = mg\cos(-50°) - \mu_c F_N$$
$$\sum F_y = mg\sin(-50°) + F_N$$

*2^e loi de Newton*

Comme toute l'accélération est en *x*, on a $a_x = a$ et $a_y = 0$.

Alors, la deuxième loi de Newton nous donne

$$\sum F_x = ma_x \quad \rightarrow \quad mg\cos(-50°) - \mu_c F_N = ma$$
$$\sum F_y = ma_y \quad \rightarrow \quad mg\sin(-50°) + F_N = 0$$

*Solution de l'équation*

On peut trouver l'accélération avec la première équation. Toutefois, nous devons premièrement connaitre la normale pour trouver *a*. On la trouve avec la deuxième équation.

$$mg\sin(-50°) + F_N = 0$$
$$F_N = -mg\sin(-50°)$$
$$F_N = mg\sin(50°)$$
$$F_N = 5kg \cdot 9,8\tfrac{N}{kg} \cdot \sin(50°)$$
$$F_N = 37,54N$$

On peut alors trouver l'accélération.

$$mg\cos(50°) - \mu_c F_N = ma$$
$$\cancel{m}g\cos(50°) - \mu_c \cancel{m}g\sin(50°) = \cancel{m}a$$
$$a = g\cos(50°) - \mu_c g\sin(50°)$$
$$a = 9,8\tfrac{m}{s^2} \cdot \cos(50°) - 0,4 \cdot 9,8\tfrac{m}{s^2} \cdot \sin(50°)$$
$$a = 3,296\tfrac{m}{s^2}$$

Deux remarques sur cet exemple.

1) Puisque l'accélération est positive, et donc dans le même sens que la vitesse, l'objet va de plus en plus vite. Avec un $\mu$ assez grand, l'accélération aurait pu être négative et donc dans le sens contraire de la vitesse. Le bloc aurait alors ralenti.

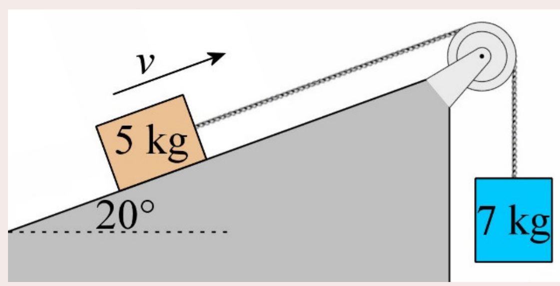
2) On a remplacé la normale par $\mu mg sin(50°)$ dans la première équation, mais on aurait pu la remplacer par 37,54 N. J'ai utilisé la formule pour illustrer quelque chose d'intéressant. On a obtenu l'accélération suivante.

$$a = g\cos(50°) - \mu_c g\sin(50°)$$

L'accélération d'un objet qui glisse sur une pente ne dépend donc pas de sa masse. Elle dépend uniquement de $g$ et de $\mu$. Ceci montre que dans une course de glissade, tous auront la même accélération, les gros comme les maigres, même si on tient compte de la friction entre la glissade et la luge. S'ils glissent sur les fesses, alors il pourra y avoir un gagnant selon la valeur du coefficient de friction entre la neige et l'habit du glisseur.

## Exemple 5.1.3

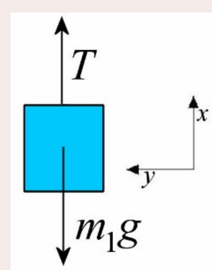
Dans la situation illustrée sur la figure, quelle est l'accélération des blocs si le bloc de 5 kg est en train de monter la pente et que le coefficient de friction cinétique entre le bloc de 5 kg et la pente est de 0,7 ? (On néglige la masse de la poulie.)




On trouve l'accélération avec la 2e loi de Newton en examinant les forces qui s'appliquent sur chacun des blocs.

**Bloc de 7 kg**

*Les forces agissant sur l'objet*




Il y a 2 forces sur le bloc de 7 kg.

1) Le poids (68,6 $N$) vers le bas.
2) La tension de la corde ($T$) vers le haut.

*Somme des forces*

La somme des forces est

$$\sum F_x = -68,6N + T$$

*2^e^ loi de Newton*

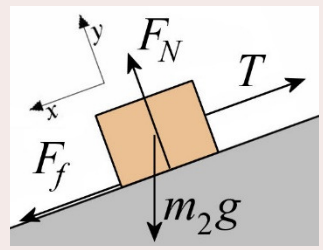
Comme toute l'accélération est en $x$, on a $a_x = a$ et $a_y = 0$. Alors, la deuxième loi de Newton nous donne

$$\sum F_x = ma_x \quad \rightarrow \quad -68,6N + T = 7kg \cdot a$$

**Bloc de 5 kg**

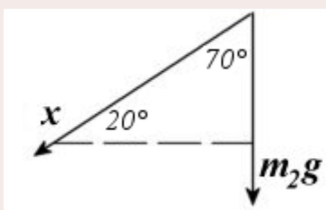
*Les forces agissant sur l'objet*

Il y a 4 forces sur le bloc de 5 kg.




1) Le poids (49 $N$) vers le bas.
2) La tension de la corde ($T$) vers le haut de la pente.
3) La normale ($F_N$) faite par la pente.
4) La friction ($F_f = \mu_c F_N$) vers le bas de la pente.

*Somme des forces*




L'angle entre le poids et l'axe des $x$ étant de -70°, le tableau des forces de ce bloc est

| Forces | *x* | *y* |
|---|---|---|
| **Poids** | 49 N·cos(-70°) | 49 N·sin(-70°) |
| **Tension** | -$T$ | 0 |
| **Normale** | 0 | $F_N$ |
| **Friction** | $\mu_c F_N$ | 0 |

La somme des forces est donc

$$\sum F_x = 49N \cdot \cos(-70°) - T + \mu_c F_N$$
$$\sum F_y = 49N \cdot \sin(-70°) + F_N$$

*2^e^ loi de Newton*

Comme toute l'accélération est en $x$, on a $a_x = a$ et $a_y = 0$.

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\sum F_x = ma_x \qquad \rightarrow \qquad 49N \cdot \cos(-70°) - T + \mu_c F_N = 5kg \cdot a$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad 49N \cdot \sin(-70°) + F_N = 0$$

**Solution des équations**

On a donc un système de trois équations à résoudre.

$$-68,6N + T = 7kg \cdot a$$
$$49N \cdot \cos(-70°) - T + \mu_c F_N = 5kg \cdot a$$
$$49N \cdot \sin(-70°) + F_N = 0$$

On commence par trouver la normale avec la troisième équation.

$$49N \cdot \sin(-70°) + F_N = 0$$
$$F_N = -49N \cdot \sin(-70°)$$
$$F_N = 49N \cdot \sin(70°)$$
$$F_N = 46,04N$$

On remplace ensuite dans la deuxième équation.

$$-68,6N + T = 7kg \cdot a$$
$$49N \cdot \cos(-70°) - T + \mu_c \cdot 46,04N = 5kg \cdot a$$

Si on additionne ces deux équations, les tensions s'éliminent et on a

$$(-68,6N + T) + (49N \cdot \cos(70°) - T + \mu_c \cdot 46,04N) = 7kg \cdot a + 5kg \cdot a$$
$$-68,6N + 49N \cdot \cos(70°) + \mu_c \cdot 46,04N = (7kg + 5kg) \cdot a$$
$$-68,6N + 49N \cdot \cos(70°) + 0,7 \cdot 46,04N = 12kg \cdot a$$
$$a = -1,63 \tfrac{m}{s^2}$$

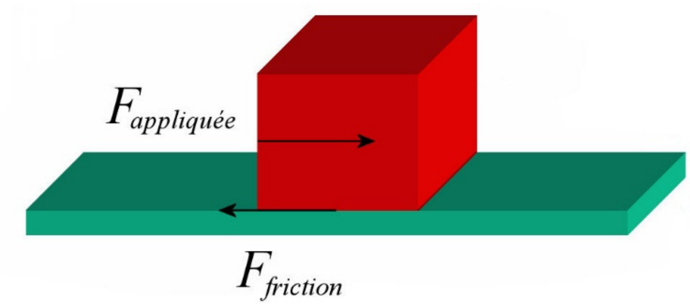
L'accélération est négative parce qu'elle est vers le haut de la pente pour le bloc de 5 kg. Comme c'est dans le même sens que la vitesse, la vitesse des blocs augmente avec une accélération de 1,63 m/s².

## La force de friction statique

*Le calcul de la force de friction statique*

Quand on pousse faiblement sur une caisse très lourde arrêtée sur le sol, elle ne bouge pas. Si on augmente graduellement la force, la caisse ne bougera pas jusqu'à ce que la force appliquée atteigne une certaine valeur. Alors seulement, la caisse commencera à bouger. Dans cette section, on s'intéresse à la situation quand la caisse ne bouge pas.

Si la caisse reste en place, c'est qu'elle n'accélère pas et donc que la somme des forces sur la caisse est nulle. Cela veut donc dire qu'une force de friction vient exactement annuler la force appliquée. Cette force de friction qui s'applique sur un objet qui ne glisse pas sur une surface est appelée la *force de friction statique*.




Ainsi, si la force appliquée est de 10 N et que la caisse ne bouge pas, alors la force de friction doit aussi être de 10 N dans la direction opposée. Si la force appliquée est de 20 N et que la caisse ne bouge toujours pas, alors la force de friction doit être 20 N dans la direction opposée. Et si la force appliquée est de 30 N et que la caisse ne bouge pas, alors la force de friction doit être 30 N dans la direction opposée.

Il y a toutefois un maximum à la force de friction statique. Des études, commencées par Guillaume Amontons en 1699, ont montré que la force de friction statique ne peut pas dépasser la valeur donnée par la formule suivante.

$$F_{f\,\max} = \mu_s F_N$$

Dans cette formule, $\mu_s$ est un coefficient appelé le *coefficient de friction statique* et $F_N$ est la normale entre les deux objets en contact. La valeur de $\mu_s$ dépend seulement de la nature des surfaces en contact.

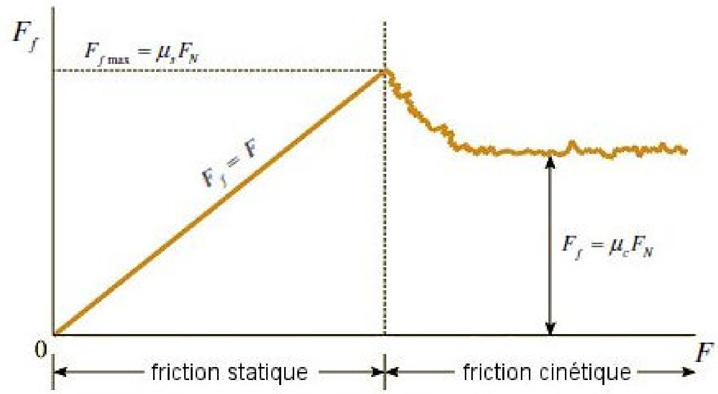
Les valeurs de $\mu_s$ et de $\mu_c$ ne sont pas forcément les mêmes. Voici maintenant quelques valeurs de coefficient de friction entre diverses surfaces.

| **Surface** | **$\mu$ (statique)** | **$\mu$ (cinétique)** |
|---|---|---|
| Acier sur acier | 0,74 | 0,57 |
| Verre sur verre | 0,94 | 0,40 |
| Glace sur glace | 0,10 | 0,03 |
| Téflon sur téflon | 0,04 | 0,04 |
| Pneus sur asphalte sec | 0,8 à 0,9 | 0,7 à 0,8 |
| Pneu sur asphalte mouillé | 0,5 à 0,7 | 0,4 à 0,5 |
| Pneus sur neige | 0,3 | 0,2 |
| Pneus de F1 sur piste sèche | 1,7 | |

Évidemment, ces valeurs sont approximatives, surtout pour les derniers parce qu'il y a plusieurs types de pneus. Vous pouvez trouver plusieurs coefficients de friction sur ce site :
https://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm#coef

Les coefficients de friction statique sont presque toujours plus grands que les coefficients de friction cinétique. Ainsi, il y a une baisse de la force de friction quand l'objet commence à glisser sur une surface.

Supposons qu'on applique une force horizontale de plus en plus grande sur un objet initialement au repos sur une surface horizontale. Le graphique de droite montre la force de friction en fonction de la force appliquée sur l'objet.




www.kshitij-school.com/Study-Material/Class-11/Physics/Laws-of-motion/Forces-of-friction.aspx

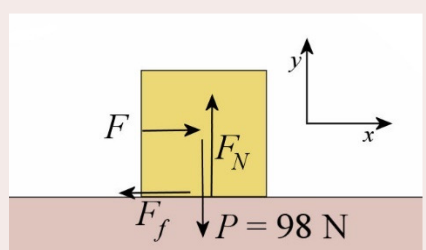
Au départ, la force de friction augmente à mesure que la force appliquée augmente. Elle augmentera ainsi jusqu'à ce que le frottement statique atteigne sa valeur maximale ($\mu_s F_N$). Alors, l'objet commencera à glisser et on aura alors du frottement cinétique ($\mu_c F_N$). Comme $\mu_c < \mu_s$, il y aura alors une diminution de la force de friction dès que l'objet commence à glisser. Le graphique montre cette baisse de la force de friction.

Dans ce vidéo, on peut bien voir cette baisse de friction, qui n'est pas énorme, quand l'objet commence à glisser.
https://www.youtube.com/watch?v=p7zMifirHLE

## Exemple 5.1.4

Une boite de 10 kg est sur un plancher. Le coefficient de friction statique est de 0,5 et le coefficient de friction cinétique est de 0,4. Quelle est la force de friction qui s'exerce sur la boite si on pousse sur la boite avec une force horizontale de a) 20 N b) 40 N c) 60 N ?

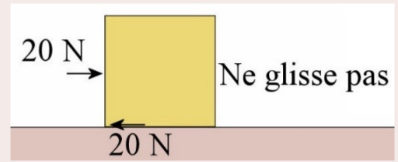
Calculons la valeur maximale de la force de friction statique. Pour y arriver, on doit premièrement calculer la valeur de la normale entre le sol et la boite. Les forces sur la boite sont indiquées sur la figure. Comme les forces en $y$ sont les mêmes qu'à l'exemple 5.1.1, on a la même normale $F_N$ = 98 N.



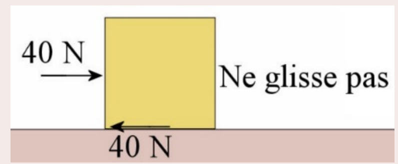

On peut alors trouver le maximum de la force de friction statique.

$$
\begin{aligned}
F_{f\max} &= \mu_s F_N \\
&= 0{,}5 \cdot 98N \\
&= 49N
\end{aligned}
$$

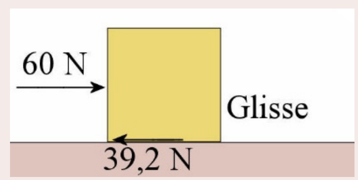
On sait maintenant que si la force appliquée ($F$) est de 20 N, la force de friction sera de 20 N et l'objet reste en place.




Si la force appliquée est de 40 N, la force de friction sera de 40 N et la boite ne glisse pas.




Si la force est de 60 N, alors l'objet glisse puisqu'on a dépassé le maximum de la force de friction statique. On tombe alors avec la force de friction cinétique. Le coefficient descend alors à 0,4 et on obtient la même force de friction qu'au premier exemple.




On peut donc résumer ainsi ce qu'on sait sur la force de friction statique.

**La force de friction statique ($F_f$)**

1) Grandeur de la force

S'ajuste pour que les surfaces ne glissent pas l'une sur l'autre.

Comme la valeur maximale de cette force est $F_{f\max} = \mu_s F_N$, on a

$$F_f \leq \mu_s F_N$$

2) Direction de la force

Parallèle à la surface de contact,
dans la direction nécessaire pour que les surfaces ne glissent pas l'une sur l'autre.

3) Point d'application de la force

Surface de contact entre les objets

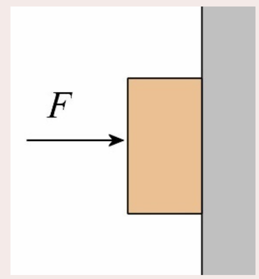
Les problèmes avec de la friction statique sont un peu plus difficiles à résoudre parce qu'on ne sait pas la valeur de la force de friction. On ne peut pas remplacer la force de friction par $\mu_s F_N$ parce que, dans le cas de la friction statique, la friction peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et $\mu_s F_N$.

Pour résoudre les problèmes de friction statique, on fait la 2e équation de Newton pour chaque objet en supposant que l'objet a une certaine accélération (souvent celle qu'il doit avoir pour qu'il ne glisse pas sur la surface, mais pas toujours comme on verra avec l'exemple du freinage de l'automobile). Ensuite, **on doit isoler $F_f$ et $F_N$** dans les équations de Newton et finalement utiliser ces résultats dans l'équation

$$F_f \leq \mu_s F_N$$

On résout ensuite cette équation pour trouver la réponse à la question demandée. Cela nous donne en fait la condition pour que l'objet ait l'accélération supposée.

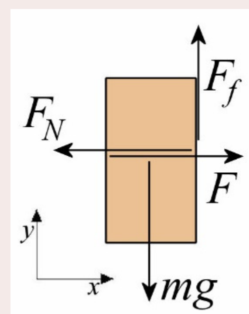
## Exemple 5.1.5




Un bloc de 1 kg est maintenu en place sur un mur quand on appuie dessus. Avec quelle force minimale doit-on appuyer pour que l'objet ne glisse pas si le coefficient de friction statique entre le bloc et le mur est de 0,8 ?

On trouve le coefficient avec la 2e loi de Newton en examinant les forces qui s'appliquent sur le bloc tout en supposant qu'il ne glisse pas.

*Les forces agissant sur l'objet*




Il y a 4 forces sur le bloc.

1) Le poids (9,8 N) vers le bas.
2) La normale ($F_N$) faite par le mur vers la gauche.
3) La friction ($F_f$) faite par le mur vers le haut.
4) La force ($F$) exercée sur le bloc vers la droite.

On voit que la friction est nécessaire pour maintenir le bloc en place, c'est la seule force qui peut s'opposer à la gravitation.

*Somme des forces*

La somme des forces est

$$\sum F_x = F - F_N$$
$$\sum F_y = -9,8N + F_f$$

*2e loi de Newton*

Si le bloc ne glisse pas, l'accélération est nulle. (On va alors obtenir la condition pour que l'objet ne glisse pas.)

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\sum F_x = ma_x \qquad \rightarrow \qquad F - F_N = 0$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad -9,8N + F_f = 0$$

*Solution des équations*

Pour résoudre les problèmes de frottement statique, on isole $F_f$ et $F_N$.

On trouve $F_f$ avec l'équation des forces en $y$. On a alors

$$-9,8N + F_f = 0$$
$$F_f = 9,8N$$

On trouve $F_N$ avec l'équation des forces en $x$. On a alors

$$F - F_N = 0$$
$$F_N = F$$

On remplace ensuite $F_f$ et $F_N$ dans $F_f \leq \mu_s F_N$, on a alors

$$F_f \leq \mu_s F_N$$
$$9,8N \leq 0,8 \cdot F$$

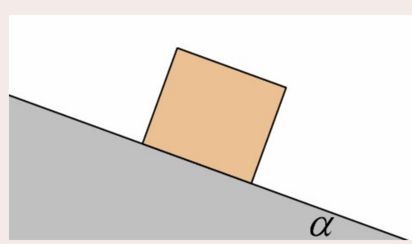
On peut maintenant résoudre pour trouver $F$.

$$9,8N \leq 0,8 \cdot F$$
$$\frac{9,8N}{0,8} \leq F$$
$$12,25N \leq F$$

On doit donc appliquer une force minimale de 12,25 N pour que l'objet ne glisse pas.

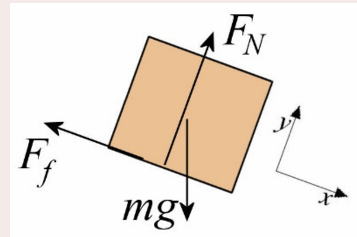
## Exemple 5.1.6

Un bloc est sur un plan incliné. On augmente graduellement l'angle $\alpha$. À partir de quel angle le bloc va-t-il commencer à glisser si le coefficient de friction statique entre le bloc et la pente est de 0,6 ?




On trouve l'angle avec la 2e loi de Newton en examinant les forces qui s'appliquent sur le bloc tout en supposant qu'il ne glisse pas.

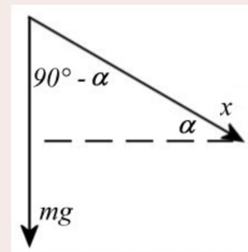
*Les forces agissant sur l'objet*




Il y a 3 forces sur le bloc.

1) La gravitation ($mg$) vers le bas.
2) La normale ($F_N$) perpendiculaire à la pente.
3) La friction ($F_f$) vers le haut de la pente.

*Somme des forces*




Avec l'angle de –(90° - $\alpha$) entre le poids et l'axe des $x$, le tableau des forces est

| Forces | $x$ | $y$ |
|---|---|---|
| **Poids** | $mg\cos(-(90° - \alpha))$ | $mg\sin(-(90° - \alpha))$ |
| **Normale** | 0 | $F_N$ |
| **Friction** | $-F_f$ | 0 |

Les sommes des forces sont donc

$$\sum F_x = mg\cos(90° - \alpha) - F_f$$
$$\sum F_y = -mg\sin(90° - \alpha) + F_N$$

*2e loi de Newton*

Si le bloc ne glisse pas, l'accélération est nulle. (On va alors obtenir la condition pour que l'objet ne glisse pas.)

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\sum F_x = ma_x \qquad \to \qquad mg\cos(90° - \alpha) - F_f = 0$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad \to \qquad -mg\sin(90° - \alpha) + F_N = 0$$

*Solution des équations*

Avec des identités trigonométriques, ces équations sont

$$mg\sin\alpha - F_f = 0$$
$$-mg\cos\alpha + F_N = 0$$

On trouve $F_f$ avec l'équation des forces en $x$. On a alors

$$F_f = mg\sin\alpha$$

On trouve $F_N$ avec l'équation des forces en $y$. On a alors

$$F_N = mg\cos\alpha$$

Si on remplace ensuite dans $F_f \leq \mu_s F_N$, on a,

$$\begin{aligned} F_f &\leq \mu_s F_N \\ mg\sin\alpha &\leq \mu_s mg\cos\alpha \end{aligned}$$

On peut maintenant résoudre pour trouver $\alpha$.

$$\begin{aligned} mg\sin\alpha &\leq \mu_s mg\cos\alpha \\ \sin\alpha &\leq \mu_s\cos\alpha \\ \tan\alpha &\leq \mu_s \\ \alpha &\leq \arctan\mu_s \end{aligned}$$

Puisque le coefficient de friction statique est de 0,6, on arrive à

$$\begin{aligned} \alpha &\leq \arctan 0,6 \\ \alpha &\leq 30,96° \end{aligned}$$

Cela veut dire que l'angle doit être inférieur à 30,96° pour que l'objet puisse être au repos (car on avait mis des accélérations nulles). Ainsi, si l'angle est supérieur à 30,96°, l'objet va glisser.

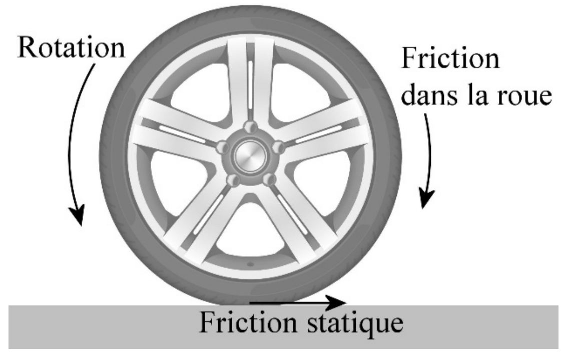
Remarquez que ce résultat nous donne une façon simple de connaitre le coefficient de friction statique entre deux surfaces. On incline la surface jusqu'à ce qu'il y ait glissement. Le coefficient de friction statique se trouve alors avec $\mu_s = \tan\alpha_{max}$. Vous voyez que ça ne dépend que de l'angle et pas des autres éléments tels que la masse. C'est ce qu'on montre dans ce vidéo.
https://www.youtube.com/watch?v=3miOIZKKYHs

*La force de friction statique et les automobiles*

La force de friction n'est pas qu'une force nuisible au mouvement des automobiles. En fait, la force de friction statique entre les pneus et la route est pratiquement responsable de tous les mouvements de votre automobile : accélération, freinage et changement de direction dans les virages (la gravitation peut aussi accélérer votre voiture, mais seulement dans des côtes).

*Mouvement sans frein et sans force faite par le moteur*

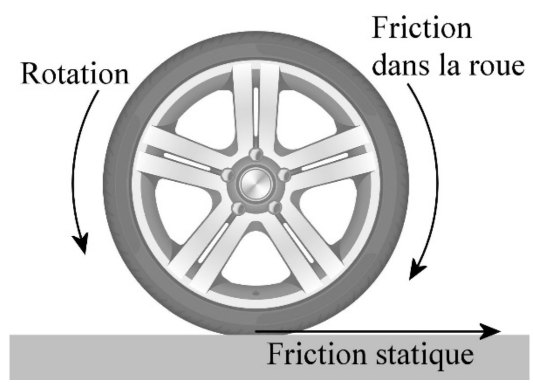
Quand une roue tourne, il n'y a qu'une petite force de friction dans l'essieu qui s'oppose à la rotation de la roue. Normalement, cela ferait ralentir le mouvement de rotation de la roue. Toutefois, pour une voiture, la vitesse de rotation ne peut pas diminuer parce que la roue doit continuer de tourner pour éviter que le pneu ne glisse sur la route. C'est la force de friction statique faite par la route qui va s'opposer à la friction dans l'essieu et maintenir la rotation de la roue. Pour maintenir la rotation de la roue, cette force de friction statique doit être dirigée vers l'arrière de la voiture. Comme la friction dans la roue n'est pas très grande, la friction statique faite par la route n'est pas très grande non plus. Il y a donc une petite force de friction statique qui s'oppose au mouvement de la voiture et la voiture ralentit lentement.



www.vectorstock.com/royalty-free-vector/car-wheel-vector-34385

*Le freinage*

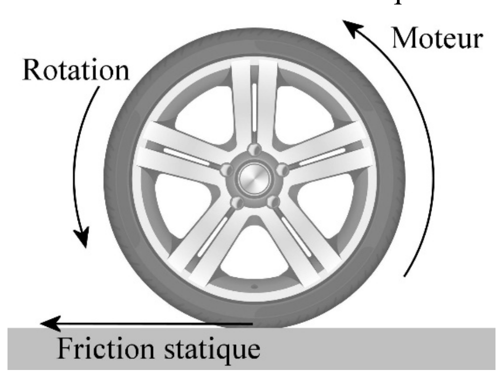
Quand on freine, on augmente considérablement la force qui s'oppose à la rotation de la roue. C'est comme si la friction dans la roue devenait très grande. Comme la roue ne glisse pas sur la route, la friction statique faite par la route doit aussi augmenter pour maintenir la roue en rotation. Cela signifie que la force de friction statique dirigée vers l'arrière de la voiture devient plus grande et la voiture ralentit plus rapidement. Cette force de friction qui fait ralentir votre voiture est répartie sur les 4 roues de votre voiture (pas nécessairement également, la force étant souvent plus grande sur les roues avant).




En freinant plus, on augmente la force qui s'oppose à la rotation de la roue. Pour que la roue ne glisse pas, la force de friction statique doit alors augmenter et la voiture ralentit encore plus rapidement. Si on freine trop, la force de friction statique nécessaire au maintien de la rotation de la roue pourrait devenir plus grande que le maximum de la friction statique. Si cela se produit, la friction ne pourra pas maintenir la roue en rotation et la roue va commencer à glisser sur la route. On passera alors à la friction cinétique.

*L'accélération*

Quand on appuie sur l'accélérateur, le moteur veut faire augmenter la vitesse de rotation de la roue. Si la roue ne glisse pas, c'est parce que la friction statique s'oppose à cette augmentation de la vitesse de rotation.



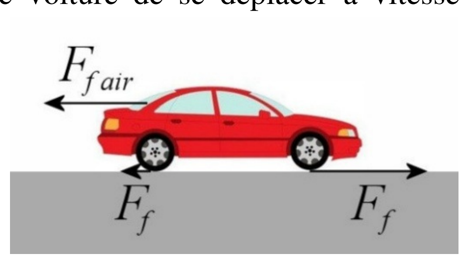
Pour s'opposer à l'augmentation de la vitesse de rotation, la friction statique faite par le sol doit être dirigée vers le devant de la voiture. C'est cette force de friction vers l'avant de la voiture qui permet à la voiture d'accélérer. Si on appuie encore plus sur l'accélérateur, la vitesse de rotation de la roue cherche à augmenter encore plus rapidement et la force de friction statique doit augmenter encore plus pour s'opposer à cette augmentation. Ainsi, en appuyant davantage sur l'accélérateur, la friction statique vers l'avant de la voiture augmente et la voiture accélère plus rapidement.

Si vous appuyez trop sur l'accélérateur, la force de friction statique nécessaire pour s'opposer à l'augmentation de la vitesse de rotation pourrait devenir plus grande que le maximum de la friction statique. Dans ce cas, il n'y aura pas assez de force qui s'oppose à l'augmentation de la vitesse de rotation et la roue va commencer à glisser sur la route. C'est ce qui se produit quand on fait crisser ses pneus au démarrage. On passera alors à la friction cinétique.

On constate que la friction statique faite par la route n'est pas du tout nuisible dans ce cas. S'il n'y avait pas de friction, votre voiture ne pourrait pas accélérer. Sans friction, les roues tourneraient sur place en glissant sur la route quand on appuierait sur l'accélérateur. C'est d'ailleurs ce qui arrive quand on tente d'accélérer sur la glace. Dans ce cas, la force de friction statique maximale est très petite et les roues glissent dès qu'on appuie un peu trop sur l'accélérateur. Remarquez finalement que cette force de friction statique vers l'avant s'applique uniquement aux roues reliées à votre moteur. Pour une traction avant, la force est sur les roues avant. Pour une voiture à propulsion (faussement appelée traction arrière), la force est sur les roues arrière. Pour une voiture à 4 roues motrices, la force est répartie sur les 4 roues.

*Mouvement à vitesse constante en ligne droite*

C'est la force de friction statique qui permet à une voiture de se déplacer à vitesse constante. Pour une voiture à traction avant (le moteur fait tourner les roues avant), il y a une friction vers l'avant qui s'exerce sur les roues avant. Comme le moteur cherche à faire tourner ces roues plus rapidement, il y a une friction qui s'oppose à cette augmentation de la vitesse de rotation des roues et cette friction est dirigée vers l'avant de la voiture.




C'est cette force qui va s'opposer à la force de friction faite par l'air et à la petite force de friction statique qu'il y a entre le sol et les roues arrière. La somme de toutes ces forces est nulle, ce qui signifie que la vitesse de la voiture est constante. On doit bien ajuster la pression qu'on fait sur l'accélérateur pour que la force de friction statique vers l'avant annule exactement toutes les forces qui s'opposent au mouvement de la voiture. C'est quand même surprenant de constater que c'est la force de friction qui permet à la voiture d'avancer à vitesse constante ! Comme on l'a dit plus tôt, la friction ne s'oppose pas toujours au mouvement.

Au chapitre suivant, on verra que la force de friction est aussi responsable des changements de direction de votre voiture. Sans friction, impossible de prendre un virage !

Tout cela signifie aussi que la force de friction statique agit sur une voiture même si elle se déplace par rapport à la route (à condition de ne pas bloquer les roues).

## Exemple 5.1.7

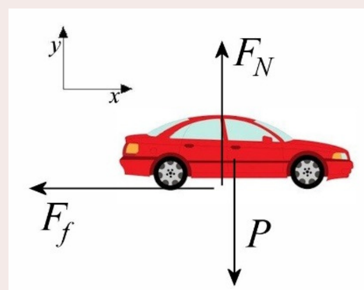
Julie est en route vers le Saguenay dans son véhicule se déplaçant à 126 km/h. Soudainement, elle aperçoit un orignal sur la route et elle doit s'arrêter sur une distance de 100 m. Quelle est la valeur minimale du coefficient de friction statique entre le sol et les pneus si elle veut s'arrêter avant de frapper l'orignal et que les roues ne sont pas bloquées ?

On trouve le coefficient avec la 2e loi de Newton en examinant les forces qui s'appliquent sur la voiture tout en supposant que les pneus ne glissent pas.

*__Les forces agissant sur l'objet__*

Les forces sur la voiture sont :

1) Le poids ($mg$) vers le bas.
2) La normale ($F_N$) vers le haut.
3) La friction ($F_f$) vers la gauche.



fr.depositphotos.com/2577683/stock-illustration-Car.html

(Sur la figure, on a mis le point d'application de la friction un peu n'importe où, mais en réalité la friction est répartie sur les 4 roues.)

*__Somme des forces__*

Les sommes des forces sont

$$\sum F_x = -F_f$$
$$\sum F_y = -mg + F_N$$

*__2e loi de Newton__*

On suppose ici que l'accélération est exactement celle qu'on doit avoir pour s'arrêter tout juste à l'orignal. On va donc obtenir la condition pour que l'auto puisse s'arrêter tout juste avant l'orignal.

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\sum F_x = ma_x \qquad \rightarrow \qquad -F_f = ma$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad -mg + F_N = 0$$

*Solution des équations*

Pour résoudre les problèmes de frottement statique, on isole $F_f$ et $F_N$.

On trouve $F_f$ avec l'équation des forces en $x$. On a alors

$$-F_f = ma$$
$$F_f = -ma$$

On trouve $F_N$ avec l'équation des forces en $y$. On a alors

$$-mg + F_N = 0$$
$$F_N = mg$$

On remplace ensuite $F_f$ et $F_N$ dans $F_f \leq \mu_s F_N$. On a alors

$$F_f \leq \mu_s F_N$$
$$-ma \leq \mu_s mg$$

On peut maintenant résoudre cette équation pour trouver $\mu_s$.

$$-\cancel{m}a \leq \mu_s \cancel{m}g$$
$$-a \leq \mu_s g$$
$$\frac{-a}{g} \leq \mu_s$$

Il faut maintenant trouver l'accélération. Selon les lois de la cinématique on a

$$2a\left(x - x_0\right) = v^2 - v_0^2$$
$$2 \cdot a \cdot \left(100m - 0m\right) = 0 - \left(35\tfrac{m}{s}\right)^2$$
$$a = -6,125\tfrac{m}{s^2}$$

On a alors

$$\mu_s \geq \frac{-a}{g}$$
$$\mu_s \geq \frac{-\left(-6,125\tfrac{m}{s^2}\right)}{9,8\tfrac{m}{s^2}}$$
$$\mu_s \geq 0,625$$

Le coefficient minimum est donc de 0,625 pour qu'on puisse s'arrêter juste avant l'orignal. Si le coefficient de friction est inférieur à cette valeur, il ne pourra pas y avoir assez de friction pour arrêter le véhicule sur une distance si courte.

*Un objet va-t-il glisser sur une surface ?*

Si on demande si un objet va glisser ou non sur une surface, on procède un peu de la même façon. On calcule encore $F_f$ et $F_N$ avec les équations en supposant que l'objet ne glisse pas (on suppose que l'objet ne glisse pas dans le but de connaitre la force de friction qu'on doit avoir pour que l'objet ne glisse pas.)

On fait ensuite la vérification suivante.

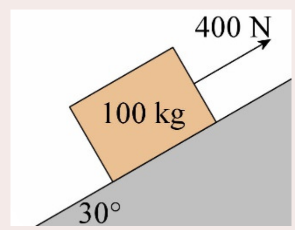
Si $F_f \leq \mu_s F_N$ , alors l'objet ne glisse pas.

Dans ce cas, la friction statique nécessaire pour empêcher l'objet de glisser est sous le maximum possible, ce qui signifie qu'on peut avoir assez de force de friction pour empêcher l'objet de glisser.

Si $F_f > \mu_s F_N$ , alors l'objet glisse.

Dans ce cas, la friction statique nécessaire pour empêcher l'objet de glisser est plus grande que le maximum possible et on ne peut pas voir une force de friction assez grande pour empêcher l'objet de glisser.

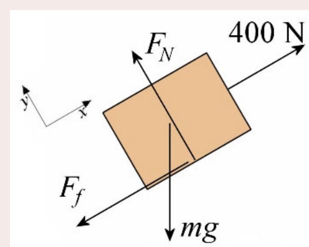
## Exemple 5.1.8




Ce bloc initialement au repos va-t-il bouger ? Le coefficient de friction statique entre le bloc et la pente est de 0,2.

*Les forces agissant sur l'objet*

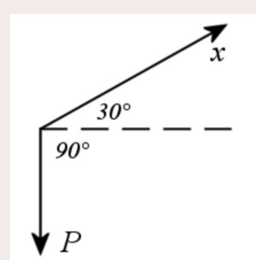
Il y a 4 forces sur le bloc de 100 kg.




1) Le poids (980 N) vers le bas.
2) La normale ($F_N$) perpendiculaire à la pente.
3) La friction ($F_f$) vers le bas de la pente.
4) La force de 400 N vers le haut de la pente.

En fait, on ne sait pas si la friction est véritablement dans cette direction, elle est peut-être vers le haut de la pente. Ici, on a choisi une direction au hasard. Si la valeur de la force de friction qu'on obtiendra est positive, alors on saura qu'on a choisi la bonne direction. Si la valeur obtenue est négative, alors on saura qu'on a choisi la mauvaise direction et que la friction est plutôt dirigée vers le haut de la pente.

*Somme des forces*




On observe que l'angle entre le poids et l'axe des $x$ est de -120°.

Le tableau des forces est donc

| Forces | *x* | *y* |
|---|---|---|
| **Poids** | 980 $N$·cos (-120°) | 980 $N$·sin (-120°) |
| **Normale** | 0 | $F_N$ |
| **Friction** | -$F_f$ | 0 |
| **400 N** | 400 N | 0 |

Les sommes des forces sont alors

$$\sum F_x = 980N \cdot \cos(-120°) - F_f + 400N$$
$$\sum F_y = 980N \cdot \sin(-120°) + F_N$$

*2e loi de Newton*

Les composantes de l'accélération sont nulles puisqu'on suppose que le bloc ne glisse pas sur la surface.

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\sum F_x = ma_x \qquad \rightarrow \qquad 980N \cdot \cos(-120°) - F_f + 400N = 0$$
$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad 980N \cdot \sin(-120°) + F_N = 0$$

*Solution des équations*

On trouve $F_f$ avec l'équation des forces en $x$. On a alors

$$980N \cdot \cos(-120°) - F_f + 400N = 0$$
$$F_f = 980N \cdot \cos(-120°) + 400N$$
$$F_f = -90N$$

Comme c'est négatif, notre supposition pour la direction de la force de friction était incorrecte. La force de friction est donc dans le sens inverse de celle indiquée sur la figure.

Ainsi, on sait qu'il faut une force de friction de 90 N vers le haut de la pente pour garder ce bloc en place.

On trouve $F_N$ avec l'équation des forces en $y$. On a alors

$$980N \cdot \sin(-120°) + F_N = 0$$
$$F_N = 980N \cdot \sin(120°)$$
$$F_N = 848,7N$$

Une fois qu'on a obtenu $F_f$ et $F_N$, on compare $F_f$ et $\mu_s F_N$.

$$F_f = 90N \qquad \mu_s F_N = 0,2 \cdot 848,7N$$
$$= 169,7N$$

Comme $F_f \leq \mu_s F_N$, alors le bloc ne glisse pas.

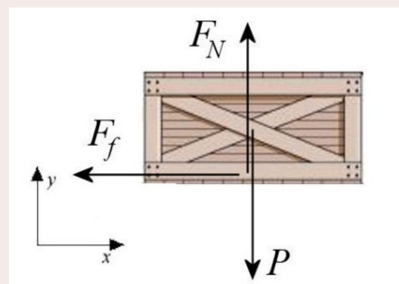
Avec une friction statique maximale de 169,7 N, il est possible que la force de friction statique soit de 90 N. Si le coefficient de friction n'avait été que de 0,1, alors la friction maximale aurait été de 84,9 N et elle n'aurait donc pas pu fournir les 90 N nécessaires pour garder le bloc en place. Le bloc aurait alors glissé sur la pente.

## Exemple 5.1.9

Ce camion ayant une vitesse de 90 km/h freine sur une distance de 50 m avec une décélération constante. La caisse dans la boite du camion va-t-elle glisser si le coefficient de friction entre la caisse et le plancher de la boite est de 0,4 ?

www.canstockphoto.com/delivery-cargo-truck-13682465.html

*Les forces agissant sur l'objet*




Il y a 3 forces sur la caisse.

1) Une force de gravitation de *mg* vers le bas.
2) Une force normale ($F_N$) vers le haut.
3) Une force de friction ($F_f$) vers la gauche.

Quand le camion freine, la caisse doit aussi freiner puisqu'on suppose qu'elle ne glisse pas. La force de friction étant la seule force horizontale, c'est elle qui va freiner la caisse. La force doit donc être vers la gauche puisque la caisse se déplace vers la droite.

*Somme des forces*

Les sommes des forces sont

$$\sum F_x = -F_f$$
$$\sum F_y = -mg + F_N$$

*2e loi de Newton*

Comme toute l'accélération est en *x*, on a $a_x = a$ et $a_y = 0$.

Ne pas glisser sur une surface ne veut pas obligatoirement dire que l'accélération doit être nulle. Dans cet exemple, cela signifie plutôt que les deux surfaces doivent avoir la même accélération. Comme le camion décélère, la caisse doit avoir la même décélération pour qu'elle ne glisse pas.

La deuxième loi de Newton nous donne alors les équations suivantes.

$$\begin{aligned} \sum F_x = ma_x \qquad &\rightarrow \qquad -F_f = ma \\ \sum F_y = ma_y \qquad &\rightarrow \qquad -mg + F_N = 0 \end{aligned}$$

*Solution des équations*

On trouve $F_f$ avec l'équation des forces en $x$. On a alors

$$F_f = -ma$$

On va devoir trouver l'accélération de la caisse, donc celle du camion. Cette accélération est

$$\begin{aligned} 2a\left(x - x_0\right) &= v^2 - v_0^2 \\ 2 \cdot a \cdot \left(50m - 0m\right) &= \left(0\tfrac{m}{s}\right)^2 - \left(25\tfrac{m}{s}\right)^2 \\ a &= -6,25\tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Il nous faudrait aussi la masse de la caisse, mais elle n'est pas donnée. On a donc

$$\begin{aligned} F_f &= -ma \\ &= -m\left(-6,25\tfrac{m}{s^2}\right) \\ &= m \cdot 6,25\tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

On trouve $F_N$ avec l'équation des forces en $y$. On a alors

$$\begin{aligned} F_N &= mg \\ &= m \cdot 9,8\tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Une fois qu'on a obtenu $F_f$ et $F_N$, on compare $F_f$ et $\mu_s F_N$.

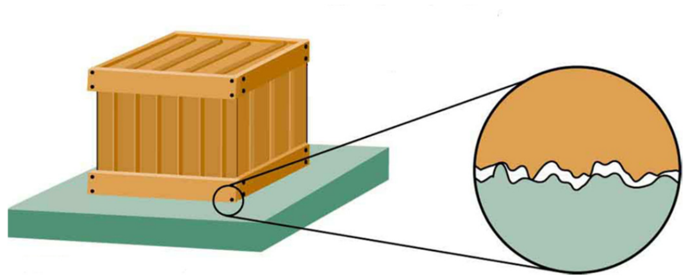
$$F_f = m \cdot 6,25\tfrac{m}{s^2} \qquad\qquad \begin{aligned} \mu_s F_N &= 0,4 \cdot m \cdot 9,8\tfrac{m}{s^2} \\ &= m \cdot 3,92\tfrac{m}{s^2} \end{aligned}$$

Même si on n'a pas la valeur de $m$, on constate que $F_f > \mu_s F_N$. Cela signifie que la caisse va glisser sur la surface.

Ici, on n'a pas assez de friction pour empêcher la boite de glisser. Il y aura quand même une force de friction (la friction cinétique) qui sera dirigée vers la gauche. Cette friction va faire ralentir la boite, mais avec une décélération plus petite que celle du camion. Si la boite ralentit plus lentement que le camion, alors cela signifie qu'elle glisse vers l'avant du camion.

## Origine de la force de friction

La force de friction vient des interactions entre certaines molécules des surfaces des deux objets en contact. Il n'y a pas des interactions entre toutes les molécules des surfaces des objets, car les surfaces sont loin d'être lisses au niveau moléculaire. En zoomant beaucoup, on aurait des surfaces plutôt irrégulières comme l'illustre la figure.



cnx.org/content/m42139/latest/?collection=col11406/latest

Ces irrégularités font que les deux objets ne se touchent pas partout et que seulement quelques molécules sont assez près les unes des autres pour qu'il y ait des interactions entre elles. Si on compte seulement l'aire où les deux objets se touchent réellement, on obtient l'aire réelle de contact. Pour vous donner une idée, si on place un cube de cuivre de 22 cm de côté sur une plaque de cuivre, l'aire réelle de contact n'est que de 1 mm² alors que l'aire de la surface du dessous du cube est de 48 400 mm² ! On voit que ça ne se touche pas souvent.

Si on veut déplacer une surface par rapport à l'autre, il va falloir briser toutes ces interactions moléculaires. Il faudra une force minimale pour faire bouger l'objet. Ces interactions ne vont pas nécessairement se briser exactement entre les deux surfaces. Il se peut que le cassage arrache des morceaux d'une des surfaces. C'est ce qui se passe si on passe une craie sur un tableau ou qu'on passe du papier sablé sur du bois.

Même quand l'objet glisse, de nouvelles liaisons entre atomes se reforment continuellement, ce qui fait que la force de friction demeure toujours présente.

Les valeurs de coefficient de friction du téflon sont basses parce que les molécules de téflon ont peu d'interaction avec d'autres types de molécules.

## Pourquoi $\mu_c$ est-il plus petit que $\mu_s$?

Il y a une différence entre les deux types de friction parce qu'il y a bien souvent une troisième substance entre les deux objets. Ce peut être simplement de l'air ou encore une mince couche d'oxyde qu'on retrouve à la surface de beaucoup de métaux.

Quand les deux objets sont au repos l'un par rapport à l'autre, il y a suffisamment de temps pour que les impuretés entre les deux surfaces se déplacent pour que les surfaces entrent directement en contact aux endroits où ils se touchent. Mais quand les surfaces glissent l'une sur l'autre, la substance présente entre les deux surfaces n'a pas toujours le temps de laisser la place aux aspérités des deux objets. Il y a donc moins de contacts directs entre les deux objets et donc moins de contacts moléculaires. La force de friction est donc moins grande que quand les deux objets étaient au repos l'un par rapport à l'autre.

Cela voudrait donc dire que si on parvenait à éliminer complètement cette substance venue s'introduire entre les deux surfaces, on ne verrait pas de différence entre la friction statique et la friction cinétique. Des tests effectués dans le vide avec des métaux parfaitement propres montrent effectivement qu'il n'y a pas de différence entre les deux types de friction dans ce cas.

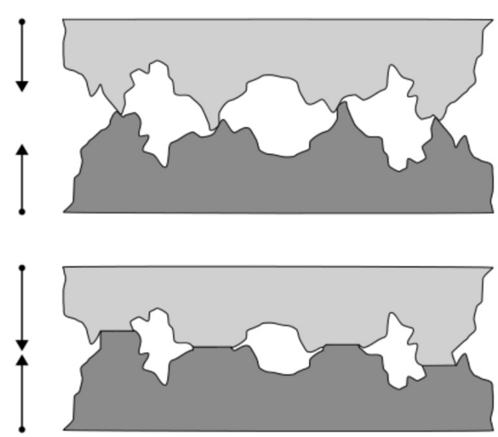
## Deux erreurs fréquentes

Deux éléments importants sont source d'erreurs fréquentes.

### Erreur fréquente : Penser que la friction dépend de l'aire de contact

Beaucoup pensent que l'aire de la surface de contact est déterminante pour la force de friction. Pourtant, c'est faux. La force de friction est indépendante de la surface de contact. C'est la deuxième loi d'Amontons.

Cette loi peut sembler contraire à ce qu'on sait de la force de friction. Si l'aire de contact est plus grande, il devrait y avoir plus de molécules qui entrent en interaction entre les objets et ça devrait prendre plus de force pour briser toutes ces interactions. La force de friction serait donc plus grande. Ce raisonnement est correct à la base, mais il faut se rappeler que les deux surfaces en contact ne se touchent pas partout et qu'elles ne se touchent véritablement qu'à quelques endroits.



en.wikipedia.org/wiki/Asperity_(materials_science)

Regardons comment change l'aire réelle de contact entre une brique et le sol si on change son orientation. Si elle repose au départ sur sa surface la plus grande (le dessous de la brique), alors elle exercera une pression sur le sol et elle touchera au sol à quelques endroits, ce qui nous donnera une certaine aire de contact (figure du haut). Si on la met maintenant sur sa surface plus petite (le bout de la brique), alors elle exercera plus de pression sur le sol puisque le poids sera réparti sur une plus petite surface. Cela signifie que la brique s'enfoncera un peu plus dans le sol, ce qui fait que les contacts réels entre les deux objets seront plus grands (figure du bas). Cependant, le nombre total de contacts sera plus petit, car la surface du bout de la brique est plus petite que la surface du dessous de la brique. Ce qui est merveilleux, c'est que ces contacts plus grands et moins nombreux donnent exactement la même aire réelle de contact entre les deux objets ! Ainsi, même si l'aire de contact semble plus petite quand on met la brique debout plutôt qu'à plat sur le sol, la véritable aire de contact est restée la même ! On comprend alors que le raisonnement était correct : plus l'aire réelle de contact est grande, plus la force de friction sera grande. Sauf que l'aire réelle de contact ne dépend que de la normale et pas de l'aire apparente de contact.

Cela vient détruire l'argument habituellement avancé pour expliquer pourquoi il est difficile de séparer deux annuaires dont les pages sont intercalées. (Voir ce vidéo)
https://www.youtube.com/watch?v=AX_lCOjLCTo
On argumente généralement que les livres sont difficiles à séparer parce qu'il y a beaucoup de friction et que cette énorme friction est due à la très grande surface de contact. Or, la force de friction ne dépend pas de la surface de contact ! En réalité, en tirant pour séparer les livres, il y a une composante de la force qui écrase les pages les unes sur les autres, ce qui augmente la normale entre les pages, ce qui augmente la friction. Plus on force, plus la normale augmente et plus la friction augmente.

Mais que se passerait-il s'il n'y avait pas d'impuretés entre les surfaces et que les objets étaient si lisses qu'il n'y avait pas ces bosses à la surface et que toutes les molécules entraient en contact ? Il y aurait alors beaucoup plus de contact entre les molécules que lorsqu'il y a des aspérités sur les surfaces et la friction deviendrait beaucoup plus grande. Cela a été fait et on obtient alors une force de friction si grande qu'il devient difficile de séparer les deux objets !

*Les pneus larges, est-ce mieux ?*

Pourquoi les automobiles ont-elles une meilleure adhérence à la route avec des pneus plus larges ? Quand ils ont diminué la largeur des pneus arrière et ajouté des sillons (image) sur les 4 pneus en Formule 1 en 1998, tous les pilotes se plaignaient que les voitures glissaient plus qu'avant.

www.goodwood.com/grr/f1/this-williams-f1-car-could-be-yours-for-150000/

Ces modifications diminuaient la surface de contact apparente entre les pneus et la route et tous disaient que cette diminution faisait baisser la friction entre les pneus et la piste, ce qui augmentait les chances de déraper. C'est certain que les voitures glissaient davantage puisque les pilotes sentaient bien la différence, mais ce n'était surement pas parce que la surface de contact avait diminué puisqu'on sait que la force de friction ne dépend pas de l'aire apparente de contact. Que s'est-il alors passé ?

Quand ils ont remplacé les pneus, ils ont dû changer la composition du pneu pour le rendre plus rigide. Des pneus plus étroits doivent avoir des côtés plus rigides pour supporter le poids de la voiture et être plus rigides pour éviter de s'user trop rapidement. Or, les caoutchoucs plus rigides collent moins bien à la route et c'est pour cela que les voitures glissaient davantage. L'avantage d'un pneu large n'est donc pas d'avoir une surface de contact plus grande, c'est de permettre d'utiliser un caoutchouc plus mou qui a un meilleur coefficient de friction avec l'asphalte. Si on fabrique deux pneus avec la même composition, mais de dimensions différentes, il n'y a pas de différence pour la force de friction.

### Erreur fréquente : Penser que la friction dépend de la vitesse de glissement

D'autres pensent que la friction entre deux surfaces dépend de la vitesse de glissement. C'est aussi faux. Des tests effectués par Augustin Coulomb et d'autres qui suivirent montrèrent que la force ne change pas quand la vitesse change. C'est la loi de la friction de Coulomb. La confusion vient peut-être du fait que la friction de **l'air** augmente bel et bien avec la vitesse (ce que nous verrons plus loin).

## Quelques exceptions

Les formules obtenues ne sont pas applicables pour toutes les situations. Disons en partant que la formule de la friction cinétique donne un résultat un peu approximatif. Quand un objet glisse, la friction varie un peu en fonction du temps. La formule de la friction cinétique ne donne que la moyenne de cette force.

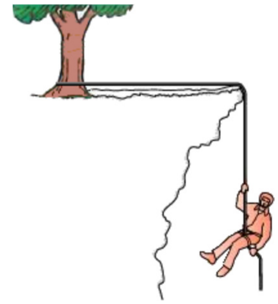
La formule de la friction cinétique devient moins applicable quand un des objets (ou les deux objets) en contact se déforme trop. Essayez de glisser avec des miniskis dans une neige un peu molle et vous irez moins vite qu'avec de longs skis. Pourtant, la normale est la même et le coefficient de friction est le même (si les skis sont faits du même matériau). La friction devrait donc être la même. C'est qu'avec des miniskis, la pression sur le sol est plus grande et si la neige est un peu molle, vous vous enfoncez plus dans la neige qu'avec de longs skis. En avançant avec de petits skis, vous allez donc créer des traces profondes en brisant la surface de la neige. Cette destruction de la surface de la neige fait augmenter considérablement la force de friction. Ainsi, quand il se forme des marques sur une des surfaces, la friction peut être beaucoup plus grande que ce que prévoit la formule.

Si la vitesse de glissement devient trop grande, la chaleur générée par la friction peut être si grande qu'une des surfaces commence à fondre. On aura alors une substance liquide entre les deux objets qui lubrifiera le glissement. La friction pourrait alors diminuer. Ce n'est pas ce qui se passe avec la glace. On peut lire parfois qu'il n'y a pas beaucoup de friction quand on glisse sur la glace, car la friction fait fondre la glace ce qui fait apparaitre une mince couche d'eau. On lit aussi parfois que la pression des patins exerce une pression sur la glace qui la fait fondre, créant ainsi une mince couche d'eau. Ces deux affirmations sont fausses. En vérité, il y a toujours une mince couche d'eau à la surface de la glace. Plus il fait froid, plus cette couche est mince. Elle disparait pour des températures inférieures à -157 °C. (La couche est en fait un mélange d'eau et de petites particules de glace, comme un granité.) C'est cette couche d'eau, toujours présente pour la glace de la vie de tous les jours, qui lubrifie le glissement et qui rend la glace si glissante.

## Note sur la tension des cordes

La friction peut changer la tension d'une corde. C'est ce qui arrive dans la situation montrée sur la figure.

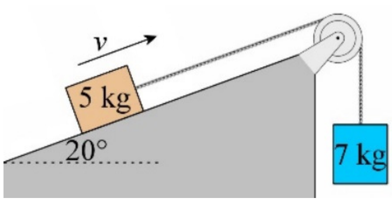
La tension de la corde va changer au point de contact avec le sol sur le bord de la falaise. Puisque la force de friction peut exercer une force dans le sens de la corde, la tension de la corde peut changer. Il y a donc une certaine tension dans la partie verticale de la corde, et une autre tension dans la partie horizontale de la corde.



Ainsi, ce n'est plus vrai que la tension d'une corde est la même partout dans la corde. Chaque fois que la corde touche à quelque chose et qu'on tient compte de la friction, la tension peut changer.

Par exemple, dans la situation suivante, la tension de la corde n'est pas la même dans les deux sections de la corde. La force de friction faite par le harnais sur la corde change la tension. (S'il n'y avait pas de friction, la tension serait la même, mais la personne ne pourrait pas rester en équilibre à cette position. Elle glisserait jusqu'au milieu de la corde.) Pour résoudre ce genre de problème, on a qu'à considérer qu'il s'agit de deux cordes différentes.


www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/mountain-climber-process-crossing-two-cliffs-rope-pauses-rest-weighs-565-n-drawing-shows-c-q23204469




Cependant, la tension ne changera pas si la corde passe sur une poulie sans masse, même s'il y a de la friction entre la corde et la poulie. (La poulie ne tournerait pas s'il n'y avait pas de friction.)

En effet, comme la poulie n'a pas de masse, il faut une force nulle pour l'accélérer. Cela signifie que la force de friction entre la corde et la poulie est nulle et que la tension de la corde ne change pas.

Au chapitre 12, nous utiliserons des poulies ayant des masses. Dans ce cas, la tension de la corde ne sera pas la même de chaque côté de la poulie.

# 5.2 LA FORCE DE FRICTION DE L'AIR

## La formule de la force de friction

Des mesures effectuées sur des objets en mouvement dans des fluides (gaz et liquide) ont montré que la force de friction de l'air ($F_d$ pour « drag ») est

**La force de friction dans un fluide ($F_d$)**

1) Grandeur de la force

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$

2) Direction de la force

Dans la direction du mouvement du fluide par rapport à l'objet.

3) Point d'application de la force

Surface de l'objet.

$\rho$ est la masse volumique du fluide dans lequel l'objet se déplace. Dans l'air, cette masse volumique est aux alentours de 1,29 kg/m³ à 0 °C et 101,3 kPa et aux alentours de 1,20 kg/m³ à 20 °C et 101,3 kPa (elle change avec la température et la pression).

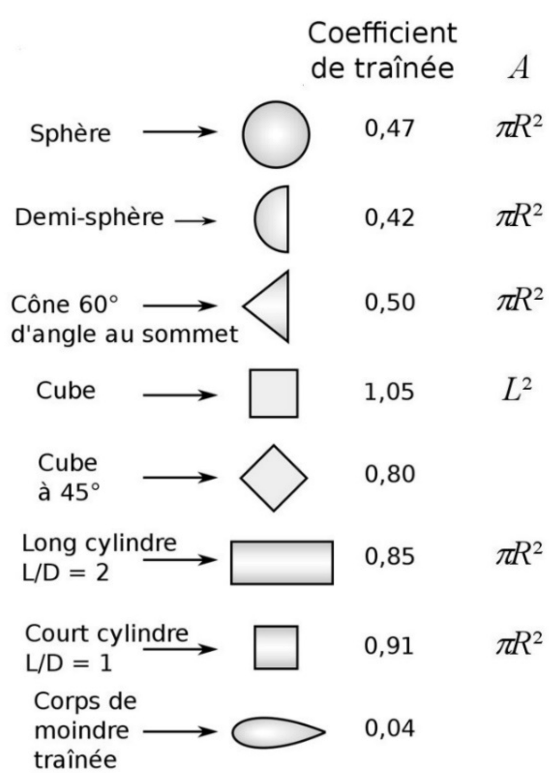
$v$ est la vitesse de l'objet dans le fluide. On remarque que la force de friction augmente rapidement avec la vitesse. Doublez votre vitesse et la force de friction sera quatre fois plus grande. Christian Huygens a découvert que la force de friction faite par les fluides augmente avec $v^2$ en 1669.

$C_d$ est le coefficient de trainée. Sa valeur dépend de la forme et de l'orientation de l'objet par rapport au mouvement du fluide.

$A$ est l'aire de référence de l'objet dont la définition varie selon la forme de l'objet. Pour les formes simples, elle correspond à l'aire de la section. Cette aire est l'aire de l'ombre projetée si la lumière arrive dans la même direction que le fluide. Par exemple, avec la sphère, on obtient une ombre de forme circulaire de même rayon que la sphère et l'aire est donc $\pi R^2$.

(Le ½ est là et n'a pas été inclus dans $C_d$ parce qu'on voulait avoir $\frac{1}{2}\rho v^2$, une quantité appelée *pression dynamique* utilisée en mécanique des fluides.)

Le tableau suivant vous donne les valeurs de $C_d$ et $A$ pour différentes formes.




en.wikipedia.org/wiki/Drag_coefficient

Notez que la force de friction de l'air ne vient pas du frottement des molécules de l'air sur l'objet ni même des collisions des molécules d'air sur l'objet. Elle vient en fait de la friction entre les couches d'air allant à des vitesses différentes près de l'objet (c'est la viscosité du fluide) et des différences de pressions entre le devant et le derrière de l'objet.

La friction de l'air est un élément important dans la conception des voitures. On a intérêt à diminuer au maximum la friction de l'air pour diminuer la consommation d'essence. Il faut évidemment tenter de diminuer la valeur de $C_dA$ au maximum. Le tableau vous donne quelques valeurs de $C_dA$ pour différents modèles de voiture.

| **Modèle** | $C_dA$ **(m²)** |
|---|---|
| Audi A4 2.0 TDI 2015 | 0,490 |
| BMW i8 2015 | 0,548 |
| Tesla Model S P85 2012 | 0,562 |
| Toyota Prius 2014 | 0,576 |
| Chevrolet Volt 2014 | 0,622 |
| Chrysler Pacifica 2016 | 0,924 |
| RAM 1500 2019 | 1,21 |
| Hummer H2 2003 | 2,46 |

Vous pouvez trouver plusieurs autres valeurs sur le site suivant.
https://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficient

## Exemple 5.2.1

Quelle est la force de friction sur une balle de baseball (masse = 145 g et rayon = 3,7 cm) se déplaçant à 90 km/h dans l'air (masse volumique = 1,20 kg/m³) ?

On va commencer par supposer que la balle est une simple sphère. Dans ce cas, la force est

$$\begin{aligned}F_d &= \frac{1}{2}C_d A\rho v^2 \\ &= \frac{1}{2}\cdot 0,47\cdot\pi\cdot(0,037m)^2\cdot 1,20\tfrac{kg}{m^3}\cdot\left(25\tfrac{m}{s}\right)^2 \\ &= 0,758N\end{aligned}$$

Toutefois, une balle de baseball n'est pas exactement une sphère lisse. La présence de coutures modifie la valeur de $C_d$ de sorte qu'on a plutôt $C_d$ = 0,31. Ainsi, la véritable force de friction est

$$\begin{aligned}F_d &= \frac{1}{2}C_d A\rho v^2 \\ &= \frac{1}{2}\cdot 0,31\cdot\pi(0,037m)^2\cdot 1,20\tfrac{kg}{m^3}\cdot\left(25\tfrac{m}{s}\right)^2 \\ &= 0,500N\end{aligned}$$

## Exemple 5.2.2

Quelle est la force de friction sur un Hummer H2 2003 se déplaçant à 160 km/h dans l'air (masse volumique = 1,20 kg/m³) ?

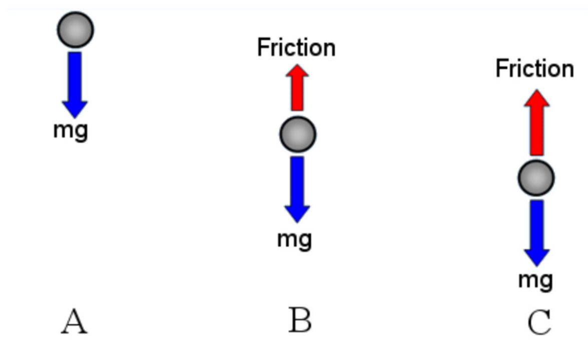
On obtient

$$\begin{aligned} F_d &= \frac{1}{2}(C_d A)\rho v^2 \\ &= \frac{1}{2}\cdot 2,46m^2 \cdot 1,20\tfrac{kg}{m^3}\cdot\left(45\tfrac{m}{s}\right)^2 \\ &= 2989N \end{aligned}$$

C'est la force nécessaire pour soulever 305 kg !

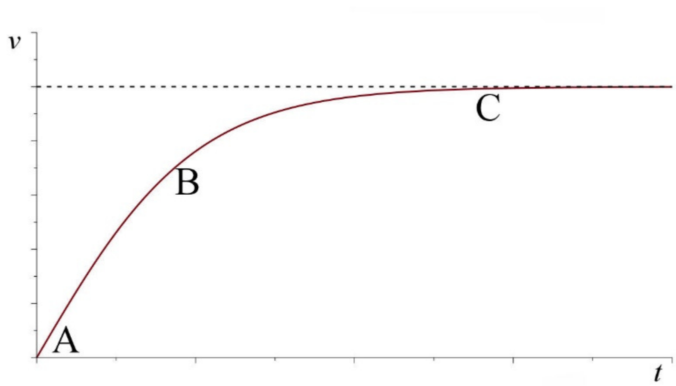
Notons en passant que la valeur de $C_d$ d'une Formule 1 est relativement grande puisqu'elle peut atteindre 1,1 sur certains circuits. C'est beaucoup quand on sait qu'un Hummer a un $C_d$ de 0,57. Ce sont les ailerons de la Formule 1 qui font beaucoup augmenter le coefficient de trainée. Nous verrons au prochain chapitre pourquoi il est nécessaire d'avoir des ailerons sur une Formule 1.

## La vitesse limite




tap.iop.org/mechanics/drag/209/page_46353.html

Si on laisse tomber un objet, il accélère vers le bas, car la force de gravitation l'attire. Au départ (A), il n'y a que la gravitation et l'objet a une accélération de 9,8 m/s². À mesure que la vitesse de l'objet va augmenter, la force de friction s'opposant à son mouvement va augmenter. Un peu plus tard (B), la friction annulera la moitié de la gravitation et l'accélération ne sera plus que de 4,9 m/s². Un peu plus tard (C), la force de friction vers le haut sera de la même grandeur que la force de gravité vers le bas et la somme des forces sera nulle. L'objet va alors aller à vitesse constante. C'est ce qu'on appelle la vitesse limite des objets qui tombent dans un fluide.




On obtient le graphique de droite pour la vitesse de chute en fonction du temps pour un objet ayant une vitesse limite de 30 m/s.

Au départ (point A), la pente est de 9,8 m/s². On voit la pente, donc l'accélération, diminuer en fonction du temps pour finalement atteindre la vitesse limite. (Pour les puristes, cette fonction est une tangente hyperbolique $v = v_L \tanh(gt/v_L)$.)

Comme on atteint la vitesse limite quand la force de friction est égale à la force de gravitation, on trouve cette vitesse avec

$$mg = \frac{1}{2} C_d A \rho v_L^2$$

En isolant la vitesse, on obtient

**Vitesse limite d'un objet qui tombe dans un fluide**

$$v_L = \sqrt{\frac{2mg}{C_d A \rho}}$$

## Exemple 5.2.3

Quelle est la vitesse limite d'une balle de baseball (masse = 145 g et rayon = 3,7 cm) qui tombe dans l'air à 20 °C (masse volumique = 1,20 kg/m³) ?

La vitesse limite est

$$\begin{aligned} v_L &= \sqrt{\frac{2mg}{C_d A \rho}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}145 kg \cdot 9{,}8 \frac{N}{kg}}{0{,}31 \cdot \pi (0{,}037 m)^2 \cdot 1{,}20 \frac{kg}{m^3}}} \\ &= 42{,}1 \tfrac{m}{s} \end{aligned}$$

Si un objet est lancé vers le bas avec une vitesse supérieure à la vitesse limite, alors la force de friction est plus grande que le poids et l'objet ralentit jusqu'à atteindre la vitesse limite.

## La chute d'un objet dans l'air

On peut maintenant reconsidérer la chute d'un objet en tenant compte de la friction de l'air. Au chapitre 1, on a dit que tous les objets, peu importe leur masse, vont tomber avec la même accélération. En tenant compte de la friction de l'air, ce n'est plus vrai.

Pour illustrer, imaginons qu'on laisse tomber deux sphères de même taille, mais de masses différentes (disons un ballon de soccer et une boule en métal de même grosseur). Pendant la chute, l'accélération des boules est (en prenant un axe vers le bas).

$$ma = mg - \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$
$$a = g - \frac{C_d A \rho v^2}{2m}$$

On remarque alors que l'accélération dépend de la masse de l'objet. L'accélération est plus petite que $g$ et ce qu'on soustrait de $g$ est divisé par la masse. Comme ce qu'on soustrait est plus petit pour l'objet plus massif, l'accélération de l'objet massif est plus grande. On peut très bien voir cela dans ce vidéo
https://www.youtube.com/watch?v=8ytIANs7Nz8
Au départ, l'accélération est pratiquement la même puisque la vitesse est petite et ce qu'on soustrait à $g$ est très petit pour les deux sphères. Mais à mesure que la vitesse augmente, le terme de friction prend de plus en plus d'importance et ce qu'on soustrait à $g$ est plus important pour le ballon de soccer. L'accélération du ballon étant plus petite, il prend du retard par rapport à la boule de métal. Pour voir cette différence, il faut une distance de chute assez importante pour que les vitesses s'approchent de la vitesse limite de chaque sphère.

Toutefois, l'accélération ne dépend pas uniquement de la masse. Elle dépend de plusieurs autres facteurs comme $C_d$ et $A$. Pour y voir plus clair, on peut écrire l'accélération sous la forme suivante.

$$a = g - \frac{C_d A \rho v^2}{2m}$$
$$a = g - g\frac{C_d A \rho}{2mg} v^2$$
$$a = g - g\frac{v^2}{v_L^2}$$
$$a = g\left(1 - \frac{v^2}{v_L^2}\right)$$

L'accélération étant toujours plus grande pour l'objet qui a la plus grande vitesse limite, c'est toujours l'objet qui a la plus grande vitesse limite qui va arriver au sol en premier si on les laisse tomber simultanément de la même hauteur. Ainsi, la forme, la taille de l'objet et sa masse sont autant de facteurs qui vont déterminer quel objet arrivera au sol en premier. Si on ajuste bien ces facteurs pour obtenir la même vitesse limite, les deux objets vont arriver au sol en même temps même s'ils ont des masses et des formes très différentes.
https://www.youtube.com/watch?v=Pgs3wv3VYy4
(En fait, dans tous les vidéos qui montrent que les objets arrivent en même temps au sol dans lesquels la distance de chute est relativement grande, on a dû tricher un peu et prendre des objets pour lesquels la vitesse limite est pratiquement identique. C'est ce que j'ai fait en laissant tomber ces citrouilles.
https://www.youtube.com/watch?v=gVAJcd4JXyE

Comme elles sont vides, la masse est pratiquement proportionnelle à $A$, ce qui fait en sorte que l'effet dû à la masse et l'effet dû à l'aire s'annulent mutuellement pour donner la même vitesse limite à toutes les citrouilles.)

On pourrait même avoir une situation dans laquelle l'objet ayant la masse la plus petite arrive en premier au sol. Si on laisse tomber simultanément d'une même hauteur une balle de baseball ($m$ = 145 g, $v_L$ = 42 m/s) et un ballon de basketball ($m$ = 600 g, $v_L$ = 20 m/s), c'est la balle de baseball qui va arriver au sol en premier, même si sa masse est plus petite ! (Clip à venir…)

## Les projectiles

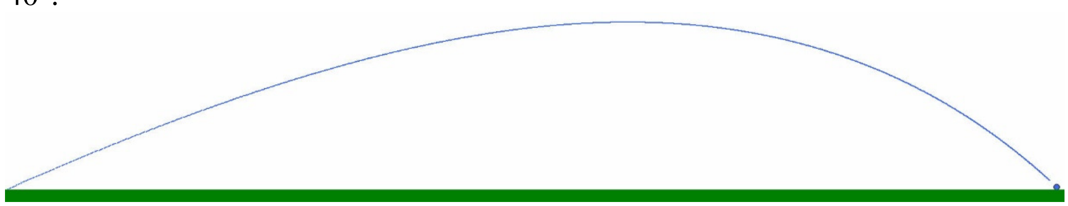
La friction de l'air peut changer considérablement les conclusions obtenues au chapitre 2 concernant les projectiles. Cependant, il est très difficile de déterminer la forme exacte de la trajectoire puisqu'il n'y a pas de solution analytique (une formule) donnant la position du projectile en fonction du temps quand il y a de la friction. On sait quand même ce qui se passe, car on peut faire des simulations sur ordinateur. Vous pouvez d'ailleurs essayer mon simulateur en le téléchargeant.
https://www.college-merici.qc.ca/professeurs/luc-tremblay/Programmes.html

Voici quelques conclusions intéressantes :

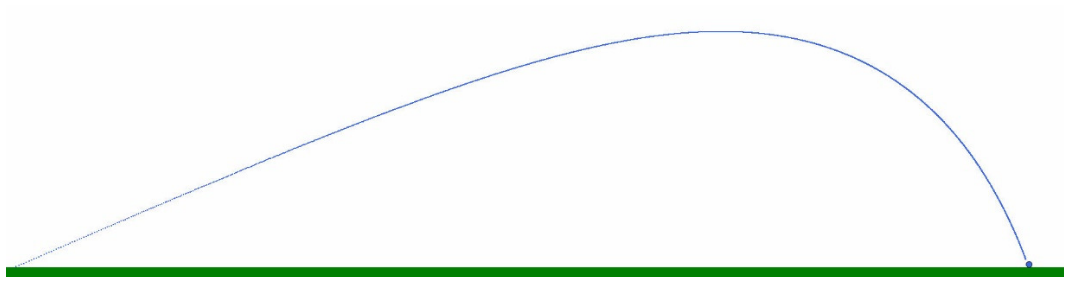
1- Il n'est plus vrai que l'angle optimal pour obtenir la plus grande portée est de 45°. L'angle devient plus petit pour diminuer le temps pendant lequel agit la friction. Par exemple, pour un objet ayant une vitesse limite de 42 m/s et ayant été lancé à 70 m/s, la portée maximale est obtenue avec un angle de départ d'environ 37,6°.

2- La portée diminue grandement, surtout si l'objet est lancé avec une vitesse beaucoup plus grande que la vitesse limite. Par exemple, pour un objet ayant une vitesse limite de 42 m/s et lancé à 70 m/s à 40°, la portée, sans friction, est de 492 m alors qu'avec la friction elle est de 186 m.

3- La forme de la trajectoire n'est plus une parabole. Voici la trajectoire d'un objet ayant une vitesse limite de 42 m/s lancé avec une vitesse de 70 m/s et un angle de 40°.

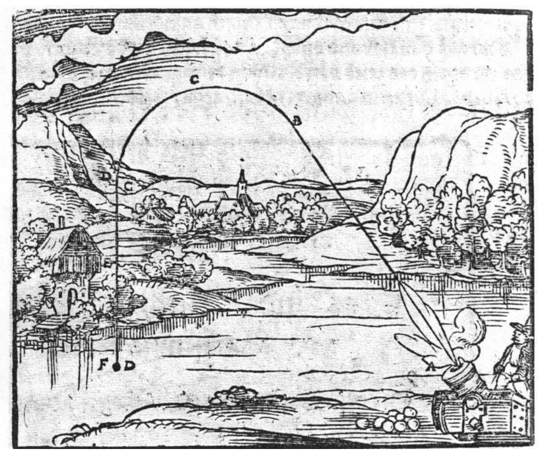


On remarque que la fin de la trajectoire est plus verticale que le début, ce qui brise la symétrie de la parabole. Si on augmente la vitesse, cet effet s'amplifie. Voici la trajectoire du même projectile, mais lancé avec une vitesse initiale de 300 m/s et un angle de 40°.



Il est retombé à 434 m du point de départ (alors qu'il serait tombé à 9044 m sans friction).

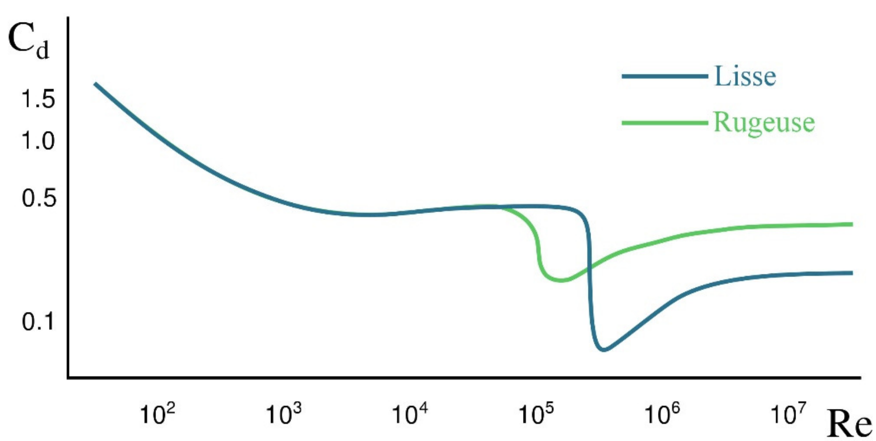
Remarquez la similarité entre cette trajectoire réelle et la trajectoire des projectiles selon la physique d'avant Galilée ! Ils n'étaient peut-être pas si fous que ça en fin de compte.



www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0893608011000852

## Véritable force de friction

En réalité, le calcul de la force de friction est un peu plus compliqué que ce qui a été montré. La force dépend de la façon dont l'air s'écoule autour de l'objet, ce qui dépend de la vitesse du fluide par rapport à l'objet, de la viscosité et de la densité du fluide et de la taille de l'objet. Par exemple, le graphique suivant montre que le coefficient $C_d$ n'est pas toujours le même pour une sphère.




commons.wikimedia.org/wiki/File:Drag_coefficient_on_a_sphere_vs._Reynolds_number_-_main_trends.svg

La valeur de $C_d$ varie selon le nombre de Reynolds qui est donné, pour une sphère, par

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D}{\mu}$$

où $\rho$ est la densité du fluide, $v$ est la vitesse de la sphère, $D$ est le diamètre de la sphère et $\mu$ est la viscosité du fluide. On voit que le coefficient $C_d$ d'une sphère lisse est près de 0,5 pour des nombres de Reynolds allant de 500 à 200 000 environ. Pour une sphère lisse se déplaçant dans l'air (dont la viscosité est d'environ 1,8 x $10^{-5}$ kg/ms), cela correspond à des vitesses allant, en gros, de 0,1 m/s à 40 m/s, une plage de vitesse qui couvre pas mal toutes les applications faites ici (où on a utilisé $C_d$ = 0,47 pour la sphère). Pour une sphère lisse, le coefficient baisse jusqu'à 0,1 (quand le nombre de Reynold est 500 000). Pour une sphère rugueuse, le coefficient baisse jusqu'à 0,15 (quand le nombre de Reynold est 100 000).

On a donc utilisé une version simplifiée ici en considérant que $C_d$ était constant. Toutefois, cela peut se justifier puisque, pour des vitesses « normales », le coefficient est à peu près constant.

## 5.3 LA FORCE FAITE PAR UN RESSORT

La force exercée par un ressort n'est pas constante, elle dépend de la compression ou de l'élongation du ressort. La loi donnant la force faite par un ressort, découverte par Robert Hooke en 1660, est

**Force exercée par un ressort ($F_R$)**

1) Grandeur de la force

$$F_R = kx$$

où $k$ est la constante du ressort
et $x$ est l'étirement ou la compression du ressort

2) Direction de la force

Vers le point d'équilibre du ressort.

3) Point d'application de la force

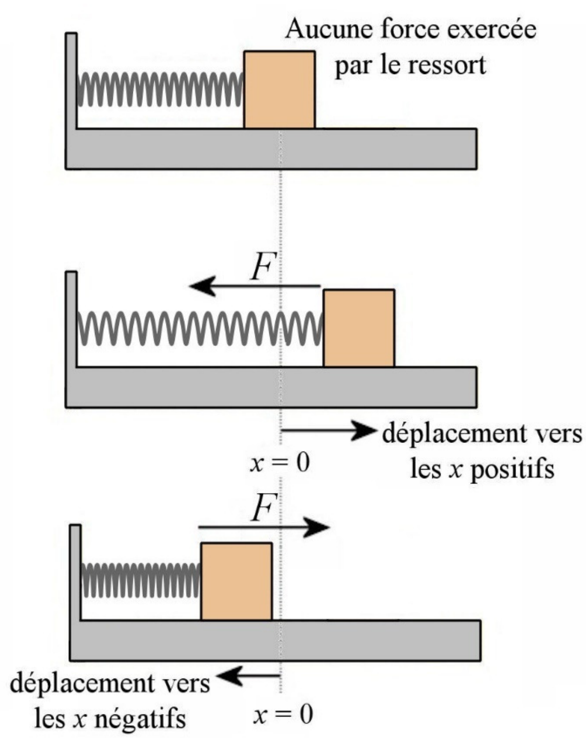
Au point d'attache du ressort sur l'objet.

Les ressorts ont une longueur d'équilibre. Quand ils ont cette longueur, les ressorts n'exercent pas de force. Par définition, $x$ = 0 est la position d'un objet quand il est fixé à un ressort et que ce dernier n'exerce pas de force. Cette position est la position d'équilibre.

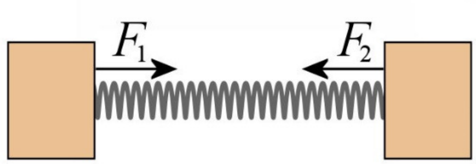
$x$ est la valeur de la compression ou de l'étirement du ressort. Cette distance est toujours mesurée à partir de la position d'équilibre, c'est-à-dire la position de l'objet quand le ressort n'exerce pas de force.

La constante du ressort $k$ est en N/m et elle dépend de la rigidité du ressort. Si le ressort est plutôt facile à compresser ou à étirer, la constante est petite et si le ressort est difficile à compresser ou à étirer, la constante du ressort est plus grande. Si la constante du ressort est de 1000 N/m, alors cela signifie qu'il faudra 1000 N pour compresser le ressort de 1 m ou pour l'étirer de 1 m et qu'il faudra 2000 N pour le comprimer ou l'étirer de 2 m.

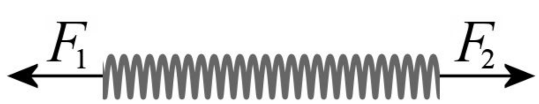
Pour comprendre la direction de la force, examinons la figure de droite dans laquelle on éloigne l'objet de la position d'équilibre. Si on déplace l'objet vers la droite par rapport à la position d'équilibre, la force faite par le ressort étiré est vers la gauche, donc vers la position d'équilibre. Si on déplace l'objet vers la gauche, le ressort compressé fait une force vers la droite, donc vers la position d'équilibre. On peut donc constater que le déplacement et la force sont toujours dans le sens contraire. C'est pour cela qu'on peut parfois voir la formule de la force des ressorts écrite sous la forme $F_R = -kx$.




Notez que la force exercée par un ressort sera la même de chaque côté du ressort si on néglige la masse du ressort. Pour le démontrer, supposons qu'un ressort étiré exerce des forces à chaque bout.




Si le ressort exerce des forces sur chaque masse, alors, selon la 3e loi de Newton, les masses exercent des forces identiques sur le ressort, mais dans des directions opposées. Les forces sur le ressort sont donc les suivantes.




Si on fait la somme des forces sur le ressort, on a

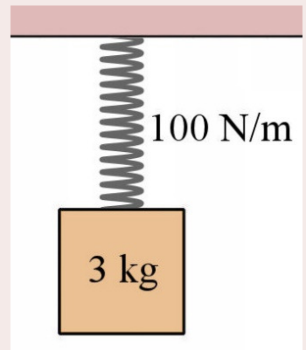
$$F_2 - F_1 = m_{ressort} a$$

Si on néglige la masse du ressort (en disant que $m_{ressort} = 0$), on arrive à

$$F_2 - F_1 = 0$$
$$F_2 = F_1$$

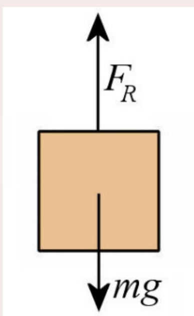
La force faite par le ressort est donc la même à chaque bout du ressort (mais uniquement si on néglige la masse du ressort ou si l'accélération du ressort est nulle).

## Exemple 5.3.1




On suspend une masse de 3 kg au plafond à l'aide d'un ressort ayant une constante de 100 N/m. Quel est l'allongement du ressort ?

*Les forces agissant sur l'objet*




Il y a deux forces sur la masse.

1) La gravitation (29,4 N) vers le bas.
2) La force faite par le ressort ($F_R$) vers le haut.

Il est quand même assez évident que le ressort étire dans cette situation et que la force exercée par le ressort est vers le haut.

*Somme des forces*

Avec un axe des $y$ vers le haut, la somme des forces est

$$\sum F_y = -29,4N + F_R$$

*2e loi de Newton*

Puisque l'accélération est nulle à la position d'équilibre, la 2e loi de Newton donne

$$\sum F_y = ma_y \qquad \rightarrow \qquad -29,4N + F_R = 0$$

*Solution de l'équation*

Puisque $F_R = kx$, on a

$$-29,4N + kx = 0$$
$$x = \frac{29,4N}{k}$$
$$x = \frac{29,4N}{100\frac{N}{m}}$$
$$x = 0,294m$$

# 5.4 LA FORCE DE PRESSION

## La pression

Quand un fluide (liquide ou gaz) exerce une pression sur une paroi, la force exercée est

**Force de pression ($F_p$)**

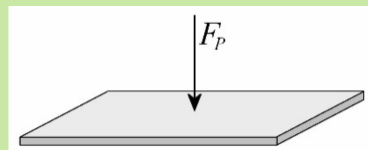
1) Grandeur de la force

$$F_p = PA$$

où $P$ est la pression en pascal (qui sont des N/m²) et $A$ est l'aire de la paroi.

2) Direction de la force

Force sur la paroi, perpendiculairement à la surface.



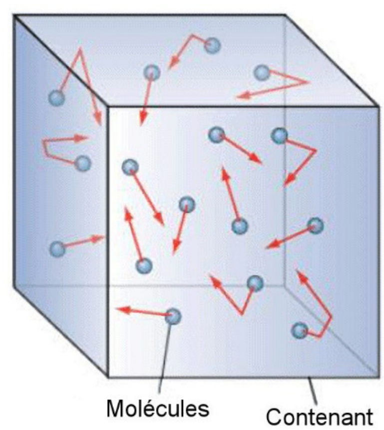

3) Point d'application de la force

Répartie également partout sur la surface de l'objet
(ce qui revient au même que de mettre le point d'application au centre de la surface).

Cette force de pression est produite par la multitude de collisions que les molécules du fluide font avec les parois du contenant dans lequel est le fluide.

Quand la pression est faite par l'air près du sol, il y a des milliards et des milliards de collisions chaque seconde (environ $10^{24}$) par cm² et les molécules ont une vitesse de l'ordre de 380 m/s.

vacaero.com/information-resources/vac-aero-training/170466-the-fundamentals-of-vacuum-theory.html

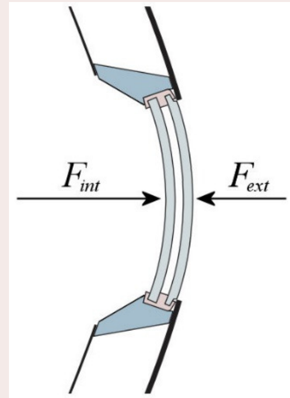



## Exemple 5.4.1

Un avion vole à une altitude de 11 000 m. À cette altitude, la pression de l'atmosphère est de 22,7 kPa. La cabine de l'avion est pressurisée à 80 kPa. Quelle est la force de pression nette sur un hublot de l'avion si le hublot est de forme circulaire et qu'il a un diamètre de 30 cm ?

L'air à l'intérieur fait une force vers l'extérieur et l'air externe fait une force vers l'intérieur. La force nette est la différence entre les deux.

*Force de pression faite par l'air à l'extérieur de l'avion*




thepointsguy.com/news/what-are-airplane-windows-made-of/

La force faite par la pression est

$$F_{ext} = PA$$

Pour trouver cette force, il nous faut l'aire du hublot. Comme c'est un cercle, l'aire est

$$\begin{aligned} A &= \pi r^2 \\ &= \pi \cdot (0{,}15m)^2 \\ &= 0{,}070686m^2 \end{aligned}$$

La force est donc

$$\begin{aligned} F_{ext} &= 22\,700Pa \cdot 0{,}070686m^2 \\ &= 1605N \end{aligned}$$

*Force de pression faite par l'air à l'intérieur de l'avion*

La force faite par la pression est

$$\begin{aligned} F_{int} &= PA \\ &= 80\,000Pa \cdot 0{,}07686m^2 \\ &= 5655N \end{aligned}$$

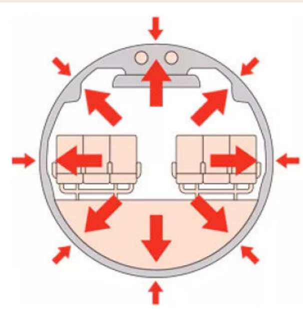
*Force nette sur le hublot*

On a donc l'air externe qui pousse sur le hublot vers l'intérieur de l'avion avec une force de 1605 N et l'air interne qui pousse sur le hublot vers l'extérieur de l'avion avec une force de 5655 N. La force nette vers l'extérieur est donc

$$\begin{aligned} F_{nette} &= 5655N - 1605N \\ &= 4050N \end{aligned}$$

C'est une force équivalente au poids d'un objet de 413 kg ! C'est beaucoup pour un petit hublot de 30 cm de diamètre.

La force n'agit pas que sur les hublots. Elle agit en fait partout sur la surface de la cabine. Avec une pression externe de 22,7 kPa et une pression interne de 75 kPa (on a habituellement une pression entre 75 et 83 kPa), il y a une force nette vers l'extérieur de près de 5 N sur chaque centimètre carré de la cabine. L'avion a intérêt à être solidement construit.



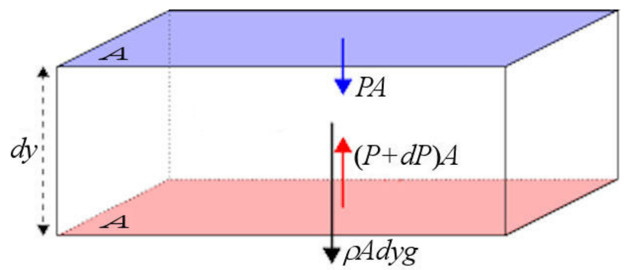
www.newsweek.com/boeings-737-airplane-prone-problems-63629

Cette force fait aussi en sorte qu'il est impossible d'ouvrir la porte d'un avion pressurisé en plein vol à haute altitude. La porte est faite pour que la pression l'écrase sur son cadre avec une force d'environ 100 000 N ! (La porte ouvre vers l'extérieur, mais il y a des extensions qui se déploient lors de la fermeture pour que la porte se colle sur le cadre avec la pression.) Ainsi, la force de 100 000 N est une force qui cherche à garder la porte fermée, pas une force qui cherche à ouvrir la porte. Mais cela signifie aussi que si vous voulez ouvrir la porte, vous allez devoir exercer une force d'au moins 100 000 N pour la décoller de son cadre. C'est comme essayer de soulever une masse de 10 tonnes.

## La pression de l'eau en fonction de la profondeur

La pression de l'eau doit changer selon la profondeur parce qu'il y a une force de gravitation. Le poids de l'eau doit être compensé par la force de pression. On dit alors que l'eau est en équilibre hydrostatique.

Prenons une couche d'eau d'épaisseur *dy* pour illustrer ce que cela signifie.




sesp.esep.pro/fr/pages_fluide-temperature/isotherm.html

Le poids de l'eau est donné par

$$\begin{aligned} mg &= \rho \cdot volume \cdot g \\ &= \rho \cdot Ady \cdot g \end{aligned}$$

Cette force est représentée par le vecteur noir dirigé vers le bas.

Il y a une force vers le bas fait par la pression de l'eau situé au-dessus de la couche. Cette force de pression est

$$\begin{aligned} F &= Pression \cdot aire \\ &= PA \end{aligned}$$

Cette force est représentée par le vecteur bleu dirigé vers le bas.

Finalement, il y a une force vers le haut faite par la pression de l'eau situé en dessous de la couche. Cette force de pression est

$$\begin{aligned} F &= Pression \cdot aire \\ &= \left(P + dP\right) A \end{aligned}$$

Cette force est représentée par le vecteur rouge dirigé vers le haut.

L'équation des forces est (on utilise un axe vers le bas pour que $y$ augmente avec la profondeur)

$$\rho Adyg + PA - \left(P + dP\right) A = 0$$

Cette équation nous amène à

$$\rho A dy g + PA - PA - AdP = 0$$
$$\rho dy g - dP = 0$$
$$dP = \rho g dy$$

Puisque la densité de l'eau est constante (elle ne l'est pas exactement, mais la variation n'est pas très grande), on peut intégrer de chaque côté pour obtenir

$$P = \rho g y + C$$

On peut trouver la constante puisqu'on sait qu'à la surface ($y$ = 0), la pression est égale à la pression atmosphérique ($P_{atm}$). En utilisant ces valeurs, on trouve que la constante doit être égale à la pression atmosphérique. On a donc

**Pression de l'eau en fonction de la profondeur**

$$P = \rho g y + P_{atm}$$

## Exemple 5.4.2

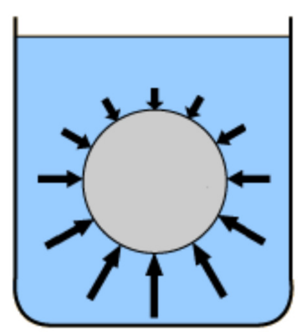
Quelle est la pression de l'eau à une profondeur de 3800 m sachant que la pression atmosphérique est de 101,3 kPa ?

La pression est

$$\begin{aligned} P &= \rho g y + P_{atm} \\ &= 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \tfrac{N}{kg} \cdot 3800 m + 101\,300 Pa \\ &= 3,734 \times 10^7 \, Pa \\ &= 37,34 MPa \end{aligned}$$

C'est une pression énorme. Une telle pression correspond à une force nette de 3724 N par centimètre carré sur toute la surface d'un sous-marin dans lequel la pression interne est égale à la pression atmosphérique. Sur un hublot de 20 cm de diamètre, la force nette est de 4,68 millions de newtons vers l'intérieur du sous-marin !

## La poussée d'Archimède



Quand un objet est dans un liquide, la force de pression qui s'exerce sur l'objet n'est pas la même partout puisqu'elle augmente avec la profondeur. Cela fait que la force de pression est plus grande sur le bas de l'objet que sur le haut de l'objet. Quand on somme toutes ces forces, on obtient une force nette vers le haut. Cette force est la poussée d'Archimède.

hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/pbuoy.html

**Poussée d'Archimède ($F_A$)**

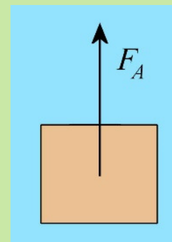
1) Grandeur de la force

$$F_A = \rho g V_f$$

où $\rho$ est la masse volumique du fluide
$g$ est l'accélération gravitationnelle
et $V_f$ est le volume que l'objet occupe dans le fluide.

2) Direction de la force

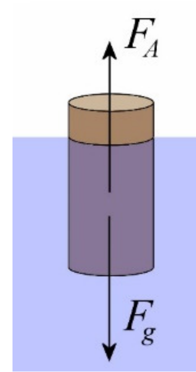
Vers le haut.




3) Point d'application de la force

Répartie partout sur la surface de la partie de l'objet qui est dans le fluide.
(Ici, on peut se contenter de mettre le point d'application au centre de la partie de l'objet qui est dans le fluide.)

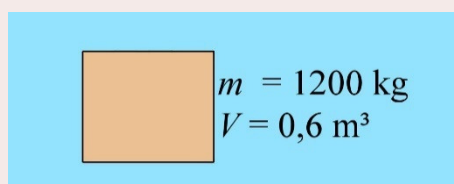
Si la poussée d'Archimède est plus grande que le poids de l'objet, la force nette sur l'objet est vers le haut et l'objet monte jusqu'à atteindre la surface. On a alors un objet qui flotte. Une fois rendu à la surface (figure), une partie de l'objet va sortir de l'eau et la poussée d'Archimède va diminuer. La partie immergée diminuera donc jusqu'à ce que la poussée d'Archimède soit égale à la force de gravitation et l'objet est maintenant en équilibre à la surface.




Si la force de gravitation est plus grande que la poussée d'Archimède, la force nette est vers le bas et l'objet coule au fond.

## Exemple 5.4.3

Un objet de 1200 kg et ayant un volume de 0,6 m³ est dans l'eau, dont la masse volumique est de 1000 kg/m³.




a) Quelle est la poussée d'Archimède sur cet objet ?

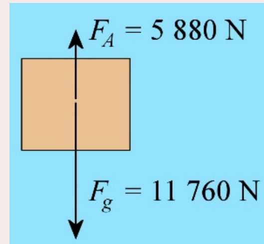
La poussée est

$$\begin{aligned} F_A &= \rho g V_f \\ &= 1000 \tfrac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \tfrac{N}{kg} \cdot 0,6 m^3 \\ &= 5880 N \end{aligned}$$

b) Cet objet va-t-il flotter ou couler ?

Le poids de cet objet est

$$\begin{aligned} F_g &= mg \\ &= 1200kg \cdot 9,8\tfrac{N}{kg} \\ &= 11760N \end{aligned}$$




Comme la force de gravitation est plus grande que la poussée d'Archimède, cet objet coule.

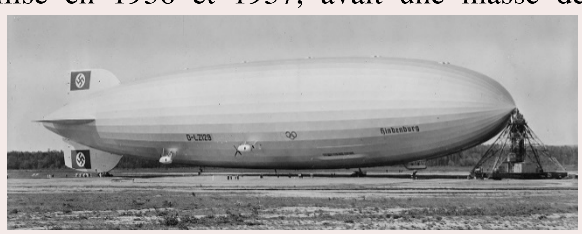
Cette poussée d'Archimède ne s'applique pas uniquement sur les objets dans des liquides. Comme les gaz sont aussi en équilibre hydrostatique, la pression des gaz doit diminuer avec l'altitude. Cette baisse de pression avec l'altitude fait en sorte que la pression en dessous d'un objet dans l'air est plus grande que la pression au-dessus de l'objet et donc qu'il y a une poussée d'Archimède. C'est cette force vers le haut qui permet aux ballons ou aux Zeppelins de voler. Si on ajuste la poussée d'Archimède pour qu'elle soit égale au poids du ballon, le ballon reste en équilibre dans l'air.


www.daysoftheyear.com/days/hot-air-balloon-day/

Pour y arriver, on doit utiliser un gaz plus léger que l'air. Ce gaz peut être simplement de l'air chaud, moins dense que l'air de l'atmosphère. On peut aussi prendre de l'hydrogène ou de l'hélium.

## Exemple 5.4.4

Le Hindenburg, un zeppelin allemand utilisé en 1936 et 1937, avait une masse de $m$ = 235 000 kg (sans l'hydrogène). Combien d'hydrogène devait-on utiliser pour le faire voler sachant que la masse volumique de l'air est de 1,3 kg/m³ et que la masse volumique de l'hydrogène est de 0,09 kg/m³ ?


fr.wikipedia.org/wiki/LZ_129_Hindenburg

Il y a 2 forces sur le Zeppelin.

1) Le poids ($(m + m_H)g$) vers le bas. (Avec l'hydrogène, on doit additionner la masse du Zeppelin et la masse de l'hydrogène.)

2) La poussée d'Archimède ($F_A$) vers le haut.

Comme il y a équilibre, ces deux forces doivent être égales. On a donc

$$F_A = (m + m_H)\,g$$

Comme $F_A = \rho g V_f$, on a

$$\rho g V_f = \left(m + m_H\right) g$$

$$\rho V_f = m + m_H$$

Le volume du Zeppelin est égal à la masse de l'hydrogène divisé par sa masse volumique (on néglige le volume des parties du Zeppelin qui ne font pas partie du « ballon »)

$$V_f = \frac{m_H}{\rho_H}$$

On a donc

$$\rho \frac{m_H}{\rho_H} = m + m_H$$

Ce qui donne

$$\rho \frac{m_H}{\rho_H} - m_H = m$$

$$\left(\frac{\rho}{\rho_H} - 1\right) m_H = m$$

$$m_H = \frac{m}{\frac{\rho}{\rho_H} - 1}$$

La masse est donc

$$m_H = \frac{235\,000 kg}{\frac{1,3}{0,09} - 1}$$

$$= 17479 kg$$

Ce qui représente un volume de 194 214 m³ d'hydrogène.

Dans les années 30, les États-Unis, seul producteur d'hélium au monde, refusaient d'en vendre à plusieurs pays, dont l'Allemagne. Les Allemands, grands amateurs de Zeppelin, ont donc été forcés d'utiliser de l'hydrogène, un gaz 4 fois plus léger que l'hélium qu'on peut facilement obtenir à partir de l'eau.

Évidemment, l'utilisation d'hydrogène n'est pas sans danger puisque ce gaz est très inflammable. Les Allemands croyaient bien avoir réussi à utiliser l'hydrogène de façon sécuritaire puisqu'il n'y avait pas eu d'incident majeur en près de 3 décennies. Jusqu'au 6 mai 1937…
https://www.youtube.com/watch?v=5Mcg0mynVXE

# 5.5 LES 4 FORCES FONDAMENTALES

Bien qu'il y ait une multitude de types de force dans la nature, on s'est rendu compte qu'on pouvait expliquer chacune de ces forces à partir de seulement 4 forces fondamentales.

## La force de gravitation

L'attraction gravitationnelle entre les masses est une des forces fondamentales de la nature. Nous connaissons déjà les caractéristiques de cette force.

## La force électromagnétique

Les objets possédant une charge électrique (positive ou négative) peuvent s'attirer ou se repousser selon le type de charges. Il y a une force de répulsion entre les objets ayant des charges de même signe et une attraction entre les objets possédant une charge de signes contraires. Elle inclut aussi les forces faites par les aimants. Nous reparlerons de cette force dans le cours « électricité et magnétisme ».

## La force nucléaire forte

Avec la découverte du noyau atomique, on se demandait ce qui peut bien garder le noyau ensemble. En effet, comme les protons du noyau ont tous une charge positive, il y a une répulsion électrique entre eux qui devrait faire éclater le noyau. Les neutrons, n'étant pas chargés, ne peuvent pas les attirer avec la force électrique pour compenser cette répulsion. La force de gravitation entre les nucléons (famille de particules formée par les protons et les neutrons) n'est vraiment pas assez grande pour annuler cette répulsion ($10^{36}$ fois trop petite !). On a donc postulé qu'il y a une force d'attraction entre les nucléons qu'on a appelée la *force nucléaire*. C'est cette attraction entre les nucléons, qui est plus grande que la répulsion électrique dans le noyau, qui maintient l'unité de ce dernier. Des expériences ont par la suite confirmé l'existence de cette force.

## La force nucléaire faible

L'étude de la radioactivité a permis de découvrir un effet qu'aucune force ne pouvait expliquer. On a donc postulé qu'il existait une deuxième force dans le noyau atomique, qu'on appela la *force nucléaire faible*. (C'est à ce moment que la force d'attraction entre les nucléons prit le nom de force nucléaire « forte ».) Encore une fois, des expériences ont confirmé l'existence de cette force. Bien que cette force ne forme pas de structure, elle est impliquée dans les transformations des protons en neutron ou de neutrons en protons qui peuvent se produire dans les noyaux.

### Pratiquement toutes les forces de la vie quotidienne viennent de la force électrique.

Les forces nucléaires n'agissant que dans le noyau, elles n'ont pratiquement pas d'impact dans les forces agissant autour de nous. La gravitation est la force qui attire tous les objets vers le centre de la Terre, mais ne fait aucune autre force autour de nous. La force électrique est donc ultimement responsable de toutes les autres forces que l'on peut observer autour de nous : la normale, la tension, la friction, les forces de pression, la force musculaire et bien d'autres. Il n'est donc pas étonnant que l'étude de la force électrique soit si importante.

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

**La force de friction cinétique ($F_f$)**

1) Grandeur de la force

$$F_f = \mu_c F_N$$

2) Direction de la force

Parallèle à la surface de contact,
dans la direction du mouvement relatif de l'autre surface.

3) Point d'application de la force

Surface de contact entre les objets.

**La force de friction statique ($F_f$)**

1) Grandeur de la force

S'ajuste pour que les surfaces ne glissent pas l'une sur l'autre.
Comme la valeur maximale de cette force est $F_{f\,\max} = \mu_s F_N$, on a

$$F_f \leq \mu_s F_N$$

2) Direction de la force

Parallèle à la surface de contact,
dans la direction nécessaire pour que les surfaces ne glissent pas l'une sur l'autre.

3) Point d'application de la force

Surface de contact entre les objets

**La force de friction dans un fluide ($F_d$)**

1) Grandeur de la force

$$F_d = \frac{1}{2} C_d A \rho v^2$$

2) Direction de la force

Dans la direction du mouvement du fluide par rapport à l'objet.

3) Point d'application de la force

Surface de l'objet.

**Vitesse limite d'un objet qui tombe dans un fluide**

$$v_L = \sqrt{\frac{2mg}{C_d A \rho}}$$

**Force exercée par un ressort ($F_R$)**

1) Grandeur de la force

$$F_R = kx$$

2) Direction de la force

Vers le point d'équilibre du ressort.

3) Point d'application de la force

Au point d'attache du ressort sur l'objet.

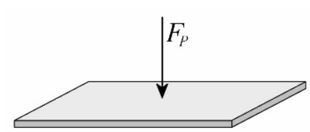
**Force de pression ($F_p$)**

1) Grandeur de la force

$$F_p = PA$$

2) Direction de la force

Force sur la paroi, perpendiculairement à la surface.



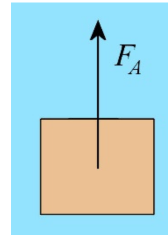

3) Point d'application de la force

Répartie également partout sur la surface de l'objet (ce qui revient au même que de mettre le point d'application au centre de la surface).

**Pression de l'eau en fonction de la profondeur**

$$P = \rho g y + P_{atm}$$

**Poussée d'Archimède ($F_A$)**




1) Grandeur de la force

$$F_A = \rho g V_f$$

2) Direction de la force

Vers le haut.

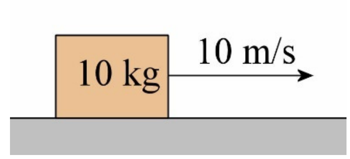
3) Point d'application de la force

Répartie partout sur la surface de la partie de l'objet qui est dans le fluide.
(Ici, on peut se contenter de mettre le point d'application au centre de la partie de l'objet qui est dans le fluide.)

# EXERCICES

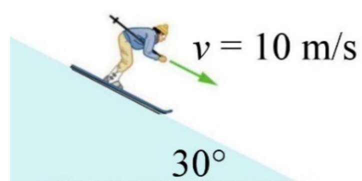
## 5.1 La force de friction entre deux surfaces

1. Un bloc de 10 kg ayant une vitesse de 10 m/s glisse sur une surface. Si ce bloc s'arrête en 4 secondes, quel est le coefficient de friction cinétique entre le bloc et le sol ?



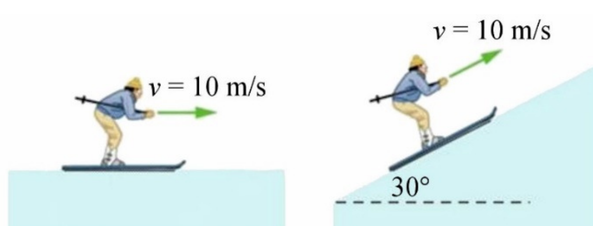

2. Guy descend une pente de ski. Le coefficient de friction cinétique entre les skis et la neige est de 0,1.

   a) Combien faudra-t-il de temps pour que Guy atteigne une vitesse de 50 m/s ?
   b) Quelle distance fera Guy en 5 secondes ?




vhcc2.vhcc.edu/ph1fall9/frames_pages/openstax_problems.htm

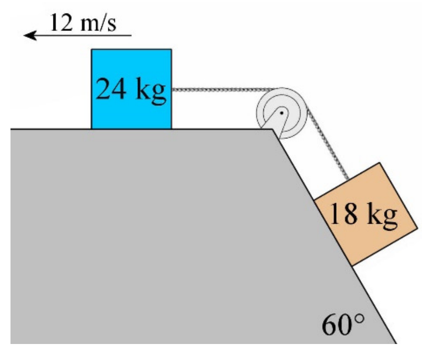
3. Quand Manon est en ski sur une surface plane, elle s'arrête sur une distance de 40 m quand elle a une vitesse initiale de 10 m/s. Quelle sera la distance d'arrêt si Manon a une vitesse initiale de 10 m/s vers le haut d'une pente inclinée de 30° ?




Distance d'arrêt = 40 m Distance d'arrêt = ?

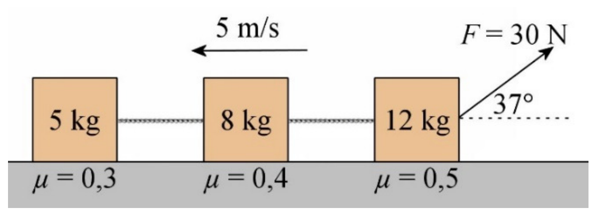
4. Dans la situation montrée sur la figure, le coefficient de friction cinétique entre les blocs et la surface est de 0,4.

   a) Quelle est l'accélération des blocs ?
   b) Quelle est la tension de la corde ?



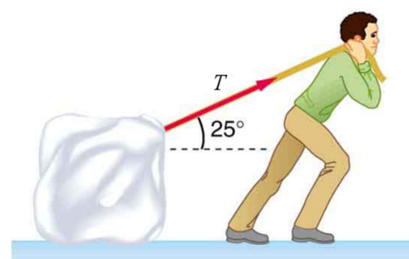

5. Voici trois blocs reliés par une corde. Les coefficients sur la figure sont les coefficients de friction cinétique.

   a) Quelle est l'accélération du système ?
   b) Quelles sont les tensions de chacune des deux cordes entre les blocs ?



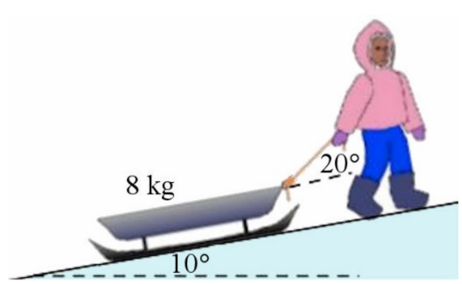

6. Ghislain tire sur un bloc de glace de 100 kg avec une corde. Le coefficient de friction cinétique entre le bloc de glace et le sol est de 0,1. Quelle est la tension de la corde si le bloc se déplace à vitesse constante ?

cnx.org/content/m42139/latest/?collection=col11406/latest

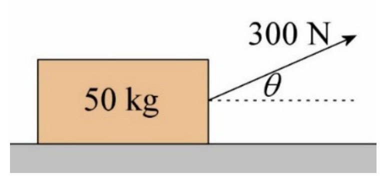



7. La petite Catherine monte sa luge de 8 kg le long d'une pente inclinée de 10° à vitesse constante. Le coefficient de friction cinétique entre la luge et pente est de 0,12. Quelle est la tension de la corde si elle fait un angle de 20° avec la pente ?

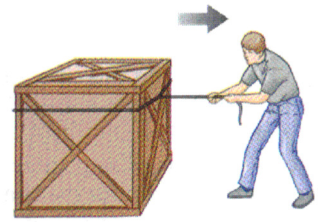
share.ehs.uen.org/node/8081




8. Une boite de 50 kg est sur le sol. Le coefficient de friction entre le sol et la boite est 0,7. On déplace la caisse avec une force de 300 N faisant un angle $\theta$ avec l'horizontal. Quelle doit être la valeur de $\theta$ pour que l'accélération soit la plus grande possible ? (Indice : trouver la valeur de l'accélération en supposant que l'angle est $\theta$. Puis, utiliser le fait qu'à la valeur maximale de l'accélération, on a $da/d\theta = 0$.)



9. Hubert veut déplacer une caisse de 100 kg en tirant avec une corde. La caisse va-t-elle se mettre en mouvement s'il tire sur la corde avec une force de 600 N et que le coefficient de friction statique est de 0,6 ?

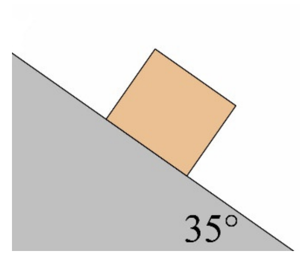


www.ux1.eiu.edu/~cfadd/1150/04Nwtn/frict.html

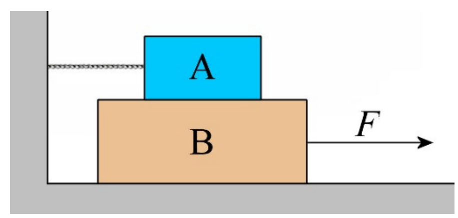
10. Une boite est dans un camion. Le coefficient de friction statique entre la boite et le plancher du camion est de 0,65. Quelle est l'accélération maximale que peut avoir le camion pour que la boite ne glisse pas sur le plancher du camion ?

www.canstockphoto.com/delivery-cargo-truck-13682465.html

11. Ce bloc initialement au repos va-t-il glisser vers le bas de la pente si le coefficient de friction cinétique est de 0,6 et le coefficient de friction statique est de 0,8 ?

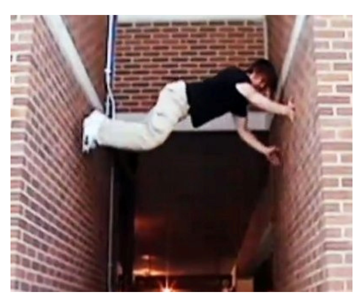



12. Une boite *A* de 5 kg est posée sur une autre boite *B* de 10 kg et la boite A est attachée au mur. Le coefficient de friction statique entre la boite A et la boite B est de 0,8 et le coefficient de friction statique entre la boite B et le sol est de 0,6. Avec quelle force minimale doit-on tirer sur la boite B pour qu'elle se déplace ?



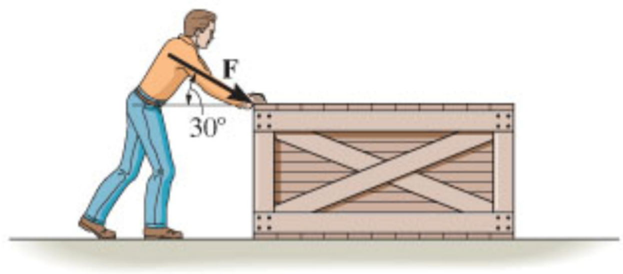

13. Donald, dont la masse est de 50 kg, reste en équilibre dans la position montrée sur cette figure. Quelle doivent être les normales minimales exercées par Donald sur chaque mur pour qu'il reste ainsi en équilibre si le coefficient de friction statique entre Donald et les murs est de 1,4 ?

(On suppose ici que les forces de friction sont les mêmes sur les pieds et les mains, ce qui n'est pas nécessairement le cas en réalité.)



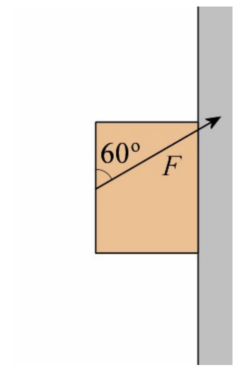
www.wired.com/wiredscience/2012/07/can-you-run-up-a-wall/

14. Boris pousse sur une boite de 100 kg initialement au repos avec une force dans la direction indiquée sur la figure. Avec quelle force minimale doit-il pousser sur la boite pour qu'elle commence à se déplacer si le coefficient de friction statique est de 0,5 ?



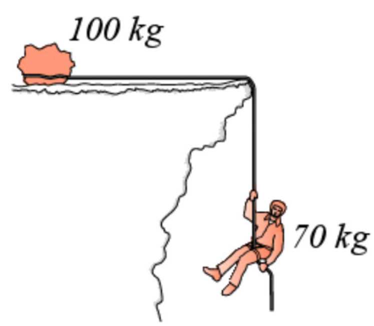

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/man-pushes-the60-crate-force-force-alwaysdirected-30-horizontal-shown-magnitude-increased--q763391

15. Un bloc de 1 kg est maintenu en place sur un mur quand on appuie dessus avec une force de 30 N dont la direction est montrée sur la figure.




a) Quelle est la force de friction (grandeur et direction) s'exerçant sur le bloc ?
b) Quelle est la valeur minimale que doit avoir le coefficient de friction statique pour que le bloc reste ainsi en place ?

16. Thalie, dont la masse est de 70 kg, se retrouve dans la situation montrée sur la figure.

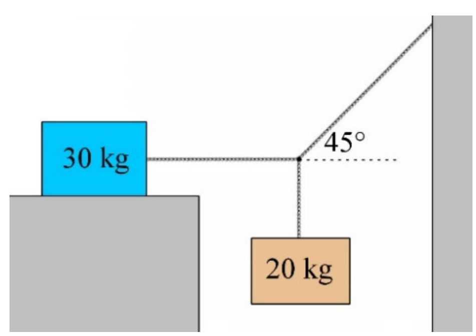



Le coefficient de friction statique entre la pierre et le sol est de 0,5 alors que le coefficient de friction cinétique entre la pierre et le sol est de 0,45. Quelle est la force de friction entre la pierre et le sol si la pierre est initialement au repos ?

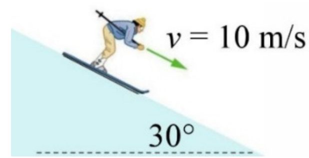
(Il n'y a pas de friction entre le sol et la corde sur le bord de la falaise.)

www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/75-climber-finds-dangling-edgeof-ice-cliff-shown-figure--fortunately-sroped-880-rock-locat-q780848

17. Quel doit être le coefficient de friction minimum entre la surface de la table et la boite de 30 kg pour que ce système reste en équilibre ?



18. Gastonne descend une pente de ski. Initialement, sa vitesse est de 10 m/s. Après avoir glissé sur une distance de 30 m, sa vitesse est maintenant de 16 m/s. Quel est le coefficient de friction cinétique entre ses skis et la pente ?



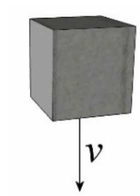

## 5.2 La force de friction de l'air

19. Un ballon de soccer a un diamètre de 22 cm. Quelle est la force de friction de l'air sur le ballon du soccer s'il se déplace à 20 m/s dans l'air, dont la masse volumique est de 1,3 kg/m³ ?

20. Quelle est la force de friction de l'air sur une Honda Civic, qui a un $C_dA$ de 0,682 m², se déplaçant à 120 km/h dans l'air, dont la masse volumique est de 1,3 kg/m³ ?

21. Un ballon de soccer a un diamètre de 22 cm et une masse de 440 g. Quelle est la vitesse limite de ce ballon dans l'air, dont la masse volumique est de 1,3 kg/m³ ?

22. Quelle est la vitesse limite du cube de fer tombant dans l'air avec l'orientation montrée sur la figure ? La densité de l'air est de 1,3 kg/m³ et le cube a un volume de 0,01 m³ et une masse volumique de 7,32 g/cm³.



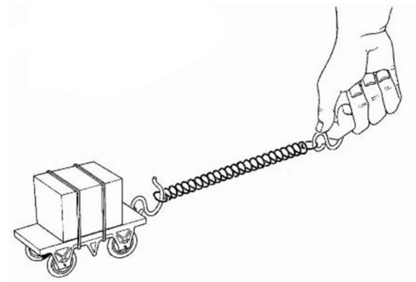

23. Quelle est la vitesse limite (en km/h) d'une Honda Civic 2001 de 1142 kg qui descend une pente inclinée de 10° si la friction de l'air est la seule force qui s'oppose au mouvement de la voiture (Prenez 1,3 kg/m³ pour la masse volumique de l'air et 0,682 m² pour $C_dA$ de la Honda Civic 2001) ?

24. Flavie, dont la masse est de 100 kg, fait un saut à partir d'un ballon ayant une altitude de 2 000 m. Pendant la chute, la vitesse limite de Flavie est de 30 m/s. Quelle est la force de friction de l'air sur Flavie quand sa vitesse est égale à la moitié de sa vitesse limite ?

25. Une Honda Civic, qui a un $C_dA$ de 0,682 m² et une masse de 1095 kg, est stationnée. Lors du passage d'une tornade, le vent (qui arrivait sur le devant de la voiture) est parvenu à faire glisser la voiture dans le stationnement. Sachant que le coefficient de frottement entre les pneus et l'asphalte est de 0,8, quelle fut la vitesse minimale des vents ? (Prenez 1,3 kg/m³ pour la masse volumique de l'air.)

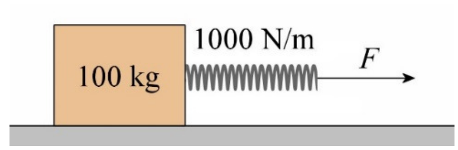
## 5.3 La force faite par un ressort

26. On tire sur un charriot de 2 kg avec un ressort ayant une constante de 200 N/m. Quel est l'allongement du ressort si l'accélération du charriot est de 4 m/s² ?
(Il n'y a pas de friction.)



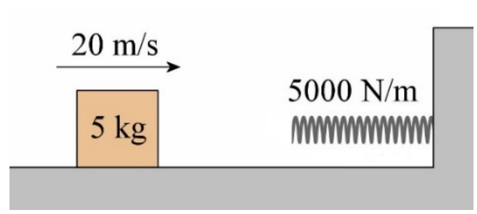
www.nuffieldfoundation.org/practical-physics/constant-and-varying-forces-between-trucks

27. On tire sur une boite de 100 kg avec un ressort dont la constante est de 1000 N/m. Le coefficient de friction statique entre la boite et le sol est de 0,5 et le coefficient de friction cinétique entre la boite et le sol est de 0,4.

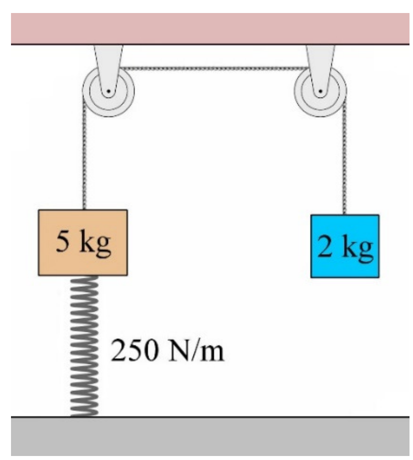



a) Dans ce premier cas, la boite est initialement au repos. Lentement, on augmente la force jusqu'à ce que la boite se déplace. Quel sera l'étirement du ressort quand la boite se mettra en mouvement ?
b) Dans ce second cas, on déplace le bloc à vitesse constante. Quel est alors l'étirement du ressort ?

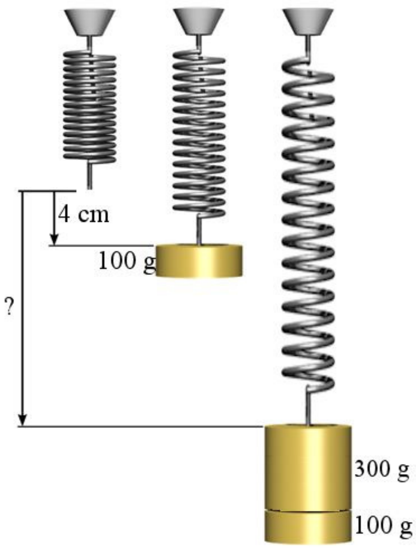
28. Une masse de 5 kg arrive avec une vitesse de 20 m/s sur un ressort. Le coefficient de friction cinétique entre le sol et le bloc est de 0,6. Quelle est l'accélération du bloc quand le ressort sera comprimé de 10 cm ?




29. Quel est la compression ou l'allongement de ce ressort à l'équilibre dans cette situation ? (Il n'y a pas de friction entre le bloc de 5 kg et les parois.)



30. Quand on ajoute une masse de 100 g au bout d'un ressort, il allonge de 4 cm. Quel sera l'allongement du ressort si on ajoute 300 g de plus ?

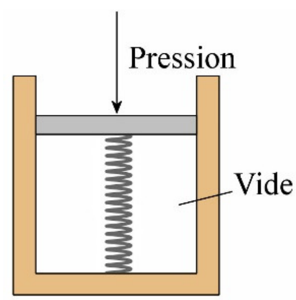



en.wikipedia.org/wiki/Hooke's_law

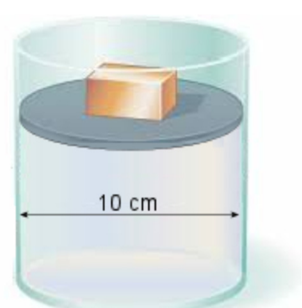
## 5.4 La force de pression

31. On place un gaz à l'intérieur d'une boite métallique hermétique de forme cubique dont les arêtes ont une longueur de 20 cm. Quelle est la force faite sur chacun des côtés de la boite par le gaz si sa pression à l'intérieur de la boite est de 300 kPa ?

32. Un ressort ayant une constante de 10 000 N/m est fixé au couvercle d'un piston. Le couvercle est un disque ayant un rayon de 10 cm et une masse négligeable. Quelle sera la compression du ressort si on fait le vide à l'intérieur du cylindre et si la pression atmosphérique est de 102 kPa ?




33. Un bloc de 3 kg est placé sur le couvercle d'un piston. La masse du couvercle est de 400 g. Le bloc et le couvercle sont maintenus en position par la pression de l'air à l'intérieur du piston. Quelle est la pression à l'intérieur du piston si la pression atmosphérique est de 101 kPa ?

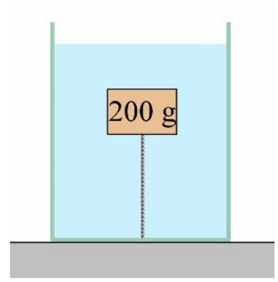



physics.unl.edu/~lnicholl/lectures/notes/lec33-notes.pdf

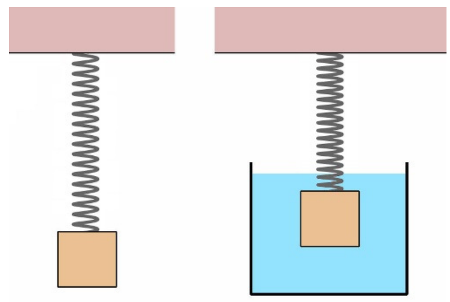
34. Quelle est la pression (en kPa) à une profondeur de 100 m ? (La masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³ et la pression atmosphérique est de 101,3 kPa.)

35. Au fond d'un lac, la pression est 5 fois plus grande qu'en surface. Quelle est la profondeur du lac ? (La masse volumique de l'eau est de 1000 kg/m³ et la pression atmosphérique est de 101,3 kPa.)

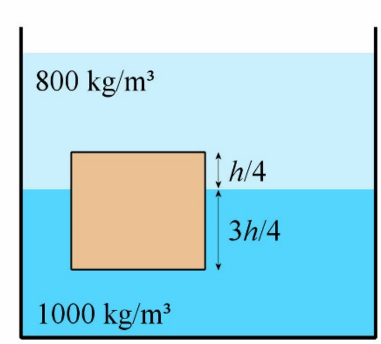
36. Un bloc de cèdre de 200 g et ayant une densité de 0,49 g/cm³ est attaché au fond d'un récipient rempli d'eau. Quelle est la tension de la corde si la densité de l'eau est de 1 g/cm³ ?



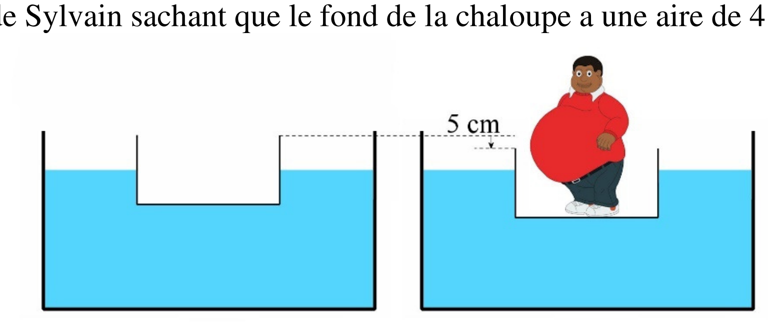

37. Quand on attache un morceau d'aluminium (masse volumique = 2700 kg/m³) au bout d'un ressort ayant une constante de 200 N/m, le ressort s'allonge de 10 cm. Que deviendra l'allongement du ressort si on plonge le morceau d'aluminium dans l'eau (masse volumique = 1000 kg/m³) ?



38. Un objet est en équilibre entre deux fluides. La masse volumique des fluides est indiquée sur la figure. Quelle est la masse volumique de l'objet ?

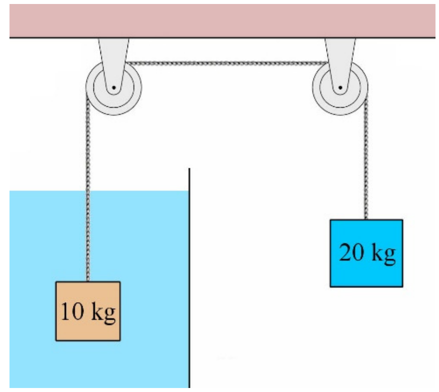



39. Quand Sylvain embarque dans cette « chaloupe », elle descend de 5 cm. Quelle est la masse de Sylvain sachant que le fond de la chaloupe a une aire de 4 m² ?




dk.pinterest.com/pin/507851295452117348/

40. Le bloc de 10 kg est un bloc cubique ayant une arête de 10 cm. Ce bloc se déplace dans l'eau (densité = 1000 kg/m³). Le bloc de 10 kg accélère vers le haut jusqu'à atteindre une vitesse limite. Quelle est cette vitesse limite ? (Il y a une vitesse limite parce qu'il y a de la friction faite par l'eau sur la masse de 10 kg.)

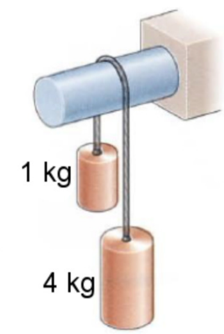



## Défis

(Questions plus difficiles que les questions qu'il y aura à l'examen.)

41. Dans la situation montrée sur la figure, les masses commencent à glisser sur le poteau si on ajoute une petite masse sur la masse de 4 kg. (Autrement dit, la friction statique entre la corde et le poteau est à son maximum dans la situation montrée sur la figure.) Quel est le coefficient de friction statique entre la corde et le poteau ?

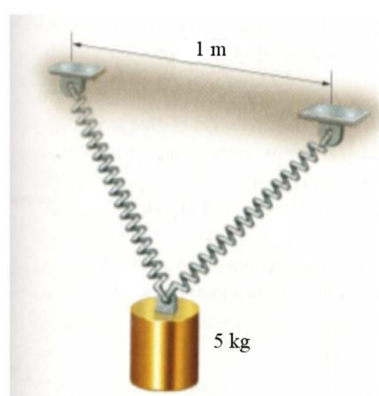
www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/-minimum-coefficient-friction-mu-rope-fixed-shaft-prevent-unbalanced-cylinders-moving-b--o-q4406714




42. Dans un vaisseau spatial loin dans l'espace, Alexandre lance une balle de baseball ($m$ = 145 g $r$ = 3,7 cm) à 30 m/s pour atteindre une cible à 100 m de distance. Comme il y a de l'air dans le vaisseau, la friction de l'air va ralentir la balle. La densité de l'air dans le vaisseau est de 1,3 kg/m³. Combien faudra-t-il de temps pour que la balle atteigne la cible et quelle sera la vitesse de la balle quand elle atteindra la cible ?

43. Deux ressorts identiques ont une longueur de 50 cm quand ils ne sont ni étirés ni comprimés. La constante des ressorts est de 98 N/m. Quelle sera la longueur des ressorts quand on attache une masse de 5 kg aux ressorts ?

(Normalement, vous allez obtenir une équation de degré 4. Trouvez la solution de cette équation avec le site suivant. [https://www.wolframalpha.com/widgets/view.jsp?id=dcc8007e03af36a0bd3635b09e4cd5a2](https://www.wolframalpha.com/widgets/view.jsp?id=dcc8007e03af36a0bd3635b09e4cd5a2))




www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/two-springs-identical-e-spring-constant-unstretched-length-04-m-50-kg-mass-suspended-b-len-q1487379

# RÉPONSES

## 5.1 La force de friction entre deux surfaces

1. 0,2551
2. a) 9,873 s b) 100,6 m
3. 8,358 m
4. a) 6,717 m/s² b) 67,135 N
5. a) 4,792 m/s² b) 16,232 N (entre 12 kg et 8 kg) et 9,258 N (entre 8 kg et 5 kg)
6. 103,3 N
7. 23,33 N
8. 35°
9. Elle se déplace
10. 6,37 m/s²
11. Reste au repos
12. 127,4 N
13. Les deux normales sont de 175 N
14. 795,4 N
15. a) 5,2 N vers le bas b) 0,2001
16. 441 N
17. 0,6667
18. 0,271

## 5.2 La force de friction de l'air

19. 4,645 N
20. 492,6 N
21. 19,27 m/s
22. 150,5 m/s
23. 238,4 km/h
24. 245 N
25. 139,2 m/s

## 5.3 La force faite par un ressort

26. 4 cm
27. a) 49 cm b) 39,2 cm
28. 105,88 m/s²
29. 11,76 cm
30. 16 cm

## 5.4 La force de pression

31. 12 000 N
32. 32,04 cm
33. 105,24 kPa
34. 1081,3 kPa

35. 41,3 m
36. 2,04 N
37. 6,296 cm
38. 950 kg/m³
39. 200 kg
40. 4,531 m/s

## Défis

41. 0,4413
42. $t$ = 5,425 s     $v$ = 12,12 m/s
43. 81,63 cm