

# 2 LES LOIS DE NEWTON

## 2.1 LES FORCES

### Une description intuitive de la force

Il est assez clair qu'on doit exercer une force sur un objet au repos pour le mettre en mouvement. Cette force peut être une poussée ou une traction. Par exemple, on doit pousser un chariot d'épicerie pour le mettre en mouvement.



[montagepages.fuselabs.com/public/HalimaSaeed/forcesinScience/2618b61d-0a68-481f-9ff9-4392f7e1ad9c.htm](http://montagepages.fuselabs.com/public/HalimaSaeed/forcesinScience/2618b61d-0a68-481f-9ff9-4392f7e1ad9c.htm)

Il existe plusieurs types de forces dans la nature. En voici quelques-unes

- La force gravitationnelle
- La force musculaire
- La force de friction
- La force électrique
- La force magnétique

Toutes ces forces peuvent mettre des corps en mouvement.

Intuitivement, la force est donc une action (poussée ou traction) exercée pour changer l'état d'un corps. Ce n'est pas notre véritable définition de la force, mais elle suffira ici. On aura une définition plus formelle plus loin dans ce chapitre.

#### **Définition temporaire d'une force**

Action (poussée ou traction) exercée pour changer l'état d'un corps

C'est qu'avant d'avoir une meilleure définition de la force, il faut connaître l'effet des forces sur les objets.

## La mesure de la force : le newton

La force se mesure en newton. Pour vous donner une idée approximative de ce qu'est 1 newton, il faut environ 10 N pour soulever une masse de 1 kg.

Autrefois on utilisait aussi la dyne, valant 0,000 01 newton.

Dans le système anglais, la force est mesurée en livre. Cette force est égale à la force qu'il faut faire pour soulever une masse de 454 g. On a donc les facteurs de conversion suivante

Unité de départ	Multipliez par	Pour obtenir des
dyne	0,000 01	newton
livre	4,448	newton

## La direction de la force est importante

Il peut y avoir plusieurs forces qui s'exercent sur un corps. Dans ce cas, il faudra trouver la force nette résultante qui est simplement la somme des forces s'exerçant sur le corps.

### Force nette ou force résultante

$$F_{\text{nette}} = \sum F$$

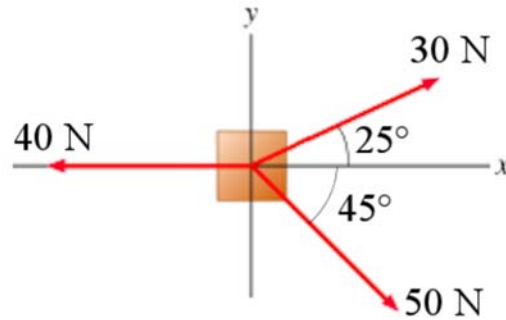
Il ne s'agit pas simplement d'additionner les grandeurs des forces agissant sur un objet parce que la direction de la force est très importante. On peut comprendre pourquoi avec la situation suivante.



[science.howstuffworks.com/innovation/scientific-experiments/newton-law-of-motion3.htm](http://science.howstuffworks.com/innovation/scientific-experiments/newton-law-of-motion3.htm)

Les chiens de traîneaux tirent avec 200 N chacune de leur côté du traîneau. On se doute bien que la force résultante n'est pas de 400 N et que les forces vont plutôt s'annuler. Comme ce traîneau reste en place, son accélération est nulle et la force nette est donc nulle. Cela montre bien que la direction de la force est importante et qu'il faut tenir compte de cette direction dans le calcul de la force totale.

En général, les forces peuvent être dans n'importe quelle direction. Par exemple, on pourrait avoir 3 forces qui agissent sur un corps tel qu'illustré sur la figure suivante.



[www.scienceforums.net/topic/10699-physics-homeowrk-help/](http://www.scienceforums.net/topic/10699-physics-homeowrk-help/)

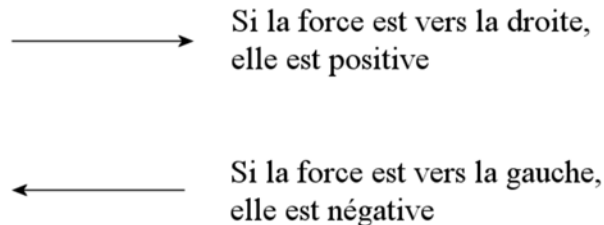
Dans ce cas, il faudra savoir comment additionner des forces ayant n'importe quelle direction.

Pour faire cette addition correctement, il faut séparer les forces horizontales et verticales.

## Forces horizontales et verticales

Pour additionner les forces, on va utiliser un système d'axe avec un axe  $x$  et un axe  $y$ . Il faudra sommer indépendamment les forces en  $x$  et les forces en  $y$ .

Les forces horizontales seront les forces en  $x$ . On tient compte de la direction de la force en utilisant la convention de signe suivante :



Les forces verticales seront les forces en  $y$ . On tient compte de la direction de la force en utilisant la convention de signe suivante :



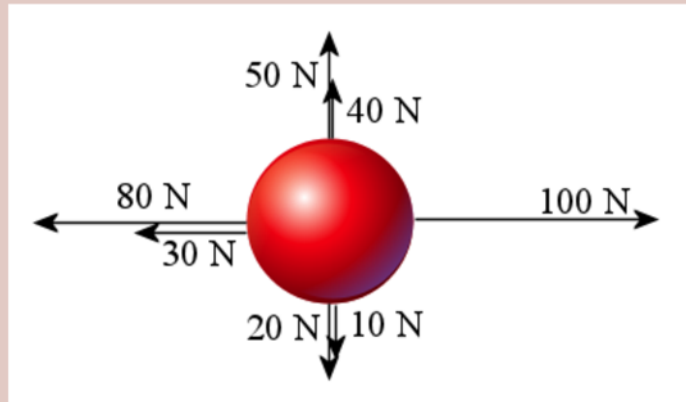
Si la force est vers le haut,  
elle est positive



Si la force est vers le bas,  
elle est négative

### Exemple 2.1.1

Quelle est la somme des forces agissant sur cet objet ?



La force nette en  $x$  est

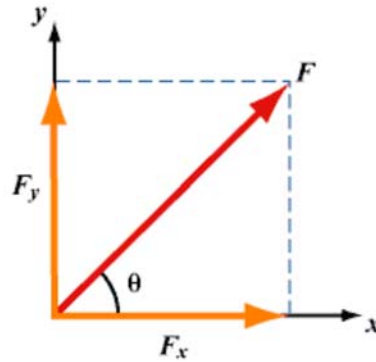
$$\sum F_x = 100N + -80N + -30N = -10N$$

La force nette en  $y$  est

$$\sum F_y = 50N + 40N - 20N + -10N = 60N$$

### Forces dans une autre direction

Une force qui n'est ni en  $x$ , ni en  $y$  peut être séparée en deux composantes qui sont dans la direction des axes.



[www.hk-phy.org/contextual/mechanics/for/ad\\_fo02\\_e.html](http://www.hk-phy.org/contextual/mechanics/for/ad_fo02_e.html)

Ainsi, on additionnera toujours les forces en additionnant séparément les forces en  $x$  et en  $y$ , mais il faudra préalablement séparer les forces qui ne sont pas dans la direction d'un axe en composantes  $x$  et  $y$ .

Nous verrons plus loin comment trouver la grandeur des composantes.

## La dynamique

Nous allons maintenant tenter de déterminer quel est l'effet de ces forces quand elles agissent sur un corps, une branche de la physique appelée *dynamique* (puisque dynamis signifie force en grec).

La dynamique existe depuis près de 2500 ans, mais il fallut attendre 2000 ans avant que Newton trouve la solution à ce problème. Mais pourquoi a-t-il fallu près de 2000 ans avant qu'on trouve les véritables lois de la dynamique ?

## 2.2 AVANT NEWTON



### Attention

Ceci est un historique. Les théories de cette section ne sont plus acceptées. Toutefois, on peut apprendre beaucoup avec cet historique puisque ces théories semblent assez logiques au premier coup d'œil et il arrive donc souvent que nous les utilisions intuitivement. En les connaissant et en comprenant pourquoi on a rejeté ces théories, on pourra plus facilement éviter leur utilisation.

## On associe la force à la vitesse

Les premières théories connues concernant la dynamique datent de l'époque de la Grèce antique. Selon ces théories anciennes, il faut une force pour déplacer un objet. Plus la force exercée sera grande, plus l'objet se déplacera vite. On a donc rapidement associé la force à la vitesse d'un objet. Quand on associe la force à la vitesse, les éléments suivants sont à la base de la théorie.

**L'effet d'une force selon les théories avant Newton (théories erronées acceptées durant près de 2000 ans)**

$$\begin{aligned}v &= 0 \text{ si } F = 0 \\v &= \text{constante si } F = \text{constante} \\ \text{Si } F &\text{ augmente, alors } v \text{ augmente}\end{aligned}$$

On ne donnera pas de formules exactes reliant la force avec la vitesse parce qu'il y eut de nombreuses variantes.

L'idée d'associer la force à la vitesse semble tout à fait logique. Si on pousse une table, elle se déplace à une certaine vitesse. Si on pousse plus fort, elle se déplace plus rapidement. Si on cesse de pousser, la table s'arrête. Le lien entre la force et la vitesse semble évident. Cette association entre la force et la vitesse ne doit pas être si mauvaise puisqu'elle fut la seule théorie du mouvement durant plus de 2000 ans. Personne durant cette période ne proposa d'associer la force à autre chose que la vitesse de déplacement d'un objet. D'ailleurs, il est assez facile de trouver quelqu'un qui fait toujours cette association aujourd'hui. De nombreuses études montrent que la majorité des gens utilise une physique intuitive qui associe la force à la vitesse. Par exemple, plusieurs gens pensent que si on double la force exercée pour pousser une table, la table va deux fois plus vite. Il y a là une association claire entre la vitesse et la force. Faites le test autour de vous pour voir la réponse.

## Des problèmes

### La chute libre

La force de gravitation ne change pas beaucoup avec l'altitude. Vous ne sentez pas que votre poids est bien différent en haut d'une montagne par rapport à ce qu'il était au bas de la montagne. Mais alors, si la force est constante et qu'on associe la force à la vitesse d'un objet, la vitesse d'un objet en chute libre devrait être constante. Ce n'est évidemment pas le cas et tous savaient que la vitesse d'un corps en chute libre augmente (bien qu'on ne savait pas à quel rythme elle augmentait). La théorie était donc en contradiction avec les observations.

On a contourné ce problème en donnant un statut particulier à la gravitation. On ne la considérait pas comme une force, mais comme un *mouvement naturel* qui suivait des lois

différentes. (C'est la théorie de la position naturelle des quatre éléments vue au chapitre précédent.) L'association entre la force et la vitesse s'appliquait seulement aux autres forces et le mouvement qui résultait de ces forces s'appelait le *mouvement violent*.

### Le projectile

Pour illustrer les difficultés de la théorie avec les objets lancés, imaginons qu'on pousse une rondelle de hockey avec un bâton et que la rondelle glisse ensuite sur la glace sur une certaine distance.



[inst.eecs.berkeley.edu/~cs61c/sp10/assignments/ice/](http://inst.eecs.berkeley.edu/~cs61c/sp10/assignments/ice/)

Au départ, on pousse la rondelle avec le bâton. Pendant cette phase du mouvement, il n'y a pas de problème avec la théorie : la rondelle avance parce qu'on la pousse avec le bâton. Comme il y a une force, la rondelle peut avancer.



[galleryhip.com/hockey-puck-on-ice.html](http://galleryhip.com/hockey-puck-on-ice.html)

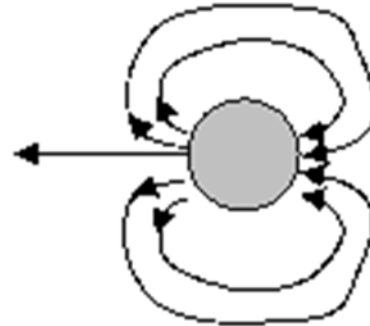
Mais voici le problème : pourquoi la rondelle continue-t-elle à avancer quand elle n'est plus en contact avec le bâton ? Dès que le contact entre la rondelle et le bâton de hockey cesse, il n'y a plus de force sur la rondelle (en supposant qu'il n'y a pas de friction). Selon la théorie, cette force nulle sur la rondelle devrait signifier que la rondelle a une vitesse nulle. La rondelle devrait donc arrêter d'un coup dès qu'elle n'est plus en contact avec le bâton. De toute évidence, ce n'est pas ce qui se passe.

## **Des solutions au problème des objets lancés**

Comme la rondelle continue d'avancer alors qu'elle n'est plus en contact avec le bâton, il devait y avoir une force qui permettait à la rondelle de continuer son mouvement selon cette théorie. Restait à trouver cette force.

Des mouvements d'air

Aristote, qui avait fait une des premières théories du mouvement associant la force et la vitesse, savait qu'il y avait un problème. Il proposa donc une solution : quand la rondelle avance, elle pousse sur l'air qui fait alors le tour de la rondelle pour aller combler le vide derrière la rondelle créé par le mouvement de cette dernière. En frappant l'arrière de la rondelle, l'air la pousse et c'est ce qui fait la force qui permet à la rondelle d'avancer ! Cela amène Aristote à penser que le mouvement d'un objet est impossible dans le vide.



[www.mathpages.com/home/kmath641/kmath641.htm](http://www.mathpages.com/home/kmath641/kmath641.htm)

Si vous trouvez que la théorie d'Aristote est un peu farfelue, vous serez soulagé d'apprendre que vous n'êtes pas seul. Déjà, les contemporains d'Aristote n'étaient pas satisfaits de cette explication et les attaques contre cette théorie continuèrent durant près de 2000 ans. Mais qu'avait-on de mieux à proposer ?

Les théories de la force imprégnée

Cette théorie spécifie qu'en appliquant une force sur un objet, on le remplit de force, on l'imprègne de force. L'objet poussé contient donc de la force en lui. Reprenons notre exemple de la rondelle pour illustrer cette théorie. En poussant la rondelle avec le bâton, on imprègne de la force dans la rondelle. Une fois que la force du bâton sur la rondelle arrête de s'appliquer, c'est cette force imprégnée dans la rondelle qui fait la force qui permet à la rondelle de continuer d'avancer. La cause du mouvement ne vient plus de l'extérieur de l'objet, comme c'était le cas avec le mouvement de l'air d'Aristote, mais vient maintenant de l'objet lui-même. C'est la théorie de la force imprégnée. (Cette force imprégnée prit plusieurs noms selon les époques et les endroits, le plus connu étant l'*impétus*.)

Dans certaines variantes, la force de friction éliminait graduellement cette force imprégnée, alors que dans d'autres variantes elle se dissipait d'elle-même, un peu comme un objet chaud qui refroidit perd de la chaleur. Avec la force qui se dissipait, la vitesse de l'objet diminuait.

**Des résultats intéressants**Une vitesse constante sans friction

On a vu que, selon certains, la force imprégnée se dissipait lentement d'elle-même et que, selon d'autres, c'est la friction qui faisait disparaître la force imprégnée. Si la baisse est due à la friction, cela amène une conclusion intéressante (Buridan arriva à cette conclusion au 14<sup>e</sup> siècle) : s'il n'y a pas de friction, la force imprégnée ne diminue pas et l'objet



continue à se déplacer à vitesse constante. On verra que cette idée, même si elle est basée sur une physique fautive, ressemble passablement à la première loi de Newton.

### Une force constante change la vitesse

Certains utilisèrent la théorie de la force imprégnée pour expliquer pourquoi la vitesse augmente durant la chute libre. La force de gravitation, en agissant sans arrêt pendant la chute, ajouterait constamment de la force imprégnée à l'objet, ce qui ferait augmenter sa vitesse.

Benedetti, qui fit ses travaux un peu avant Galilée, arriva même à la conclusion que si c'était vrai pour la gravitation, ça devait aussi être vrai aussi pour les autres forces. Ainsi, une force constante ferait continuellement augmenter la force imprégnée, ce qui ferait augmenter la vitesse d'un objet. Selon Benedetti, une force constante ferait donc continuellement augmenter la vitesse de l'objet. On verra que cette idée, même si elle est basée sur une physique fautive, ressemble passablement à la deuxième loi de Newton. Inutile d'insister sur le fait que tout cela entraîne aussi en contradiction avec l'idée de base de la théorie qu'une force constante donne à l'objet une vitesse constante !

## **L'accélération est constante lors d'une chute libre**

On a vu que la gravitation ne fut pas vraiment considérée comme une force. Elle était considérée comme étant un mouvement naturel qui n'avait rien à voir avec l'action des forces et elle était régit par des règles bien différentes. Bien souvent, ces règles stipulaient que les objets plus massifs devaient tomber avec plus de vitesse que les objets peu massifs. Par exemple, Aristote affirme que les objets tombent avec une vitesse proportionnelle au poids du corps. Ainsi, si on laisse tomber un objet 4 fois plus lourd qu'un autre en les lâchant en même temps, l'objet plus léger prendra 4 fois plus de temps à arriver au sol que le plus lourd.

Au premier coup d'œil, l'idée que la vitesse de chute dépende de la masse peut sembler avoir bien du bon sens. Bien des gens vous diront d'ailleurs que les objets plus lourds tombent plus vite que les objets légers. Le video suivant, dans lequel on laisse tomber une cuisinière (l'appareil électroménager, pas la madame) et un oreiller, prouve bien cela. <http://www.youtube.com/watch?v=RGVcKYpo9EM>

Toutefois, il y a cette différence parce qu'il y a de la friction de l'air. La friction de l'air sur l'oreiller est trop importante par rapport à son poids ce qui ralentit beaucoup sa chute.

Dans cet autre essai, on utilise deux balles de même taille. Il y a une balle de métal et un ballon de soccer.

<http://www.youtube.com/watch?v=8ytIANs7Nz8>

Dans ce cas, la force de friction est la même sur les deux balles (nous verrons plus tard qu'elle dépend de la taille et de la forme de l'objet, mais pas de sa masse). Encore une fois, la balle plus lourde l'emporte parce que la force de friction par rapport au poids de l'objet

est plus grande pour le ballon de soccer, ce qui signifie que la force de friction a un plus grand effet sur ce ballon.

Dans ce dernier essai, on a pris soin de prendre des objets pour lesquels le rapport entre le poids et la force de friction est presque le même. Dans ce cas, l'arrivée au sol se fait en même temps malgré une importante différence de poids entre les deux objets.

<http://www.youtube.com/watch?v=Pgs3wv3VYy4>

Le vidéo suivant montre également qu'il n'y a pas de différence entre les temps d'arrivée de deux objets de masse assez différente (une balle de golf et une boule de quilles) quand on les laisse tomber en même temps de la même hauteur.

<http://www.youtube.com/watch?v=Z789eth41FU>

(Notez que sur une distance de chute plus grande, la friction de l'air aurait commencé à ralentir davantage la balle de golf. Sur une faible distance de chute comme dans ce vidéo, les vitesses ne sont pas très grandes et la friction de l'air n'est pas très importante.)

On peut voir la même chose avec ces deux citrouilles de taille différente.

<http://www.youtube.com/watch?v=gVAJcd4JXyE>

[http://www.youtube.com/watch?v=r2-h\\_bpUSqM](http://www.youtube.com/watch?v=r2-h_bpUSqM)

Les démonstrations précédentes ne sont pas entièrement convaincantes parce que la friction de l'air est toujours présente et on doit respecter des conditions plutôt particulières pour que les objets arrivent au sol en même temps. Pour se convaincre davantage, il faut éliminer complètement la friction de l'air. On peut le faire en laissant tomber des objets dans une pièce dans laquelle on fait le vide. Dans ce vidéo, la plume et la boule de quilles arrivent en même temps au sol.

<http://physique.merici.ca/mecanique/Chute-vide.wmv>

On peut aussi aller sur la Lune, où il n'y a pas d'air. L'astronaute Dave Scott d'Apollo 15 a fait cette expérience.

<http://www.youtube.com/watch?v=03SPBXALJZI>

Par contre, on voit que les objets tombent avec une accélération plus faible. Il en est ainsi parce que la force de gravitation est plus faible à la surface de la Lune qu'à la surface de la Terre.

Ainsi, pendant 2000 ans, plusieurs ont montré que la vitesse de chute n'était pas proportionnelle au poids comme l'affirmait Aristote. Mais même si plusieurs savaient qu'Aristote avait tort, cela ne veut pas dire qu'on savait comment se faisait la chute des corps.

En 1603, Galilée commença ses expériences sur la chute des corps. Comme celle-ci se fait trop rapidement, il fit descendre les corps sur des plans inclinés pour ralentir le mouvement. Comme il n'y avait pas de façon simple pour mesurer le temps à cette époque, il dut trouver une façon de mesurer la position en fonction du temps. Une des façons employées par Galilée consistait à placer des petites cloches qui sont frappées par la balle qui roule le long

du plan incliné, tel qu'illustré sur cette image et dans ce video (filmé à Woolsthorpe Manor, lieu de naissance d'Isaac Newton).



Luc Tremblay

<https://www.youtube.com/watch?v=eUbv78PHaro>

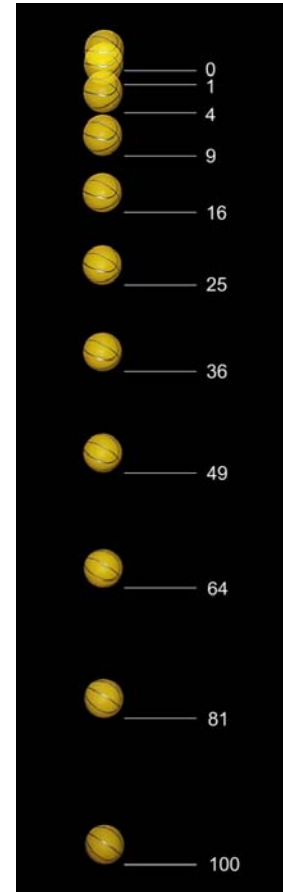
Dans un tel mouvement à accélération constante, la vitesse augmente continuellement à un rythme régulier. Dans le cas de la chute verticale, la vitesse de l'objet augmente de 9,8 m/s (35,3 km/h) chaque seconde. Voici un tableau donnant la vitesse d'un objet en chute libre en fonction du temps (pour un objet lâché avec une vitesse initiale nulle)

Temps	Vitesse (m/s)	Vitesse (km/h)
0 s	0	0
1 s	9,8	35,3
2 s	19,6	70,6
3 s	29,4	105,8
4 s	39,2	141,1
5 s	49,0	176,4

Un changement de 9,8 m/s chaque seconde est noté comme une accélération de 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Aujourd'hui, on dispose de meilleurs moyens pour démontrer que la chute se fait à accélération constante. On peut, par exemple, utiliser un stroboscope pour photographier un objet à intervalle régulier pour ainsi facilement mesurer les positions et observer que le mouvement se fait selon les lois du mouvement à accélération constante avec une accélération de  $9,8 \text{ m/s}^2$ . (Figure de droite)

On associe souvent à cette découverte l'expérience que Galilée aurait faite du haut de la tour de Pise, dans laquelle il lâcha deux objets de masse différente pour montrer qu'ils arrivent au sol en même temps. Il n'est toutefois pas certain que Galilée ait vraiment exécuté cette expérience. Même si c'est le cas, il aurait été devancé par Simon Stévin en 1586 qui fit cette expérience aux Pays-Bas. De toute façon, cette expérience montre uniquement que la chute se fait à la même vitesse peu importe la masse et ne permettait pas de découvrir, avec les moyens de l'époque, que l'accélération est constante.



[en.wikipedia.org/wiki/Equations\\_for\\_a\\_falling\\_body](http://en.wikipedia.org/wiki/Equations_for_a_falling_body)

## Newton associe la force à l'accélération

On pourrait penser que plusieurs savants de l'époque allaient associer la force à l'accélération à partir du moment où Galilée montra que l'accélération due à la gravitation était constante. Comme il est assez aisé de montrer que la force de gravitation est constante, peu importe l'altitude (en fixant, par exemple, l'objet à un ressort et en mesurant l'élongation du ressort à différentes altitudes), on voit qu'on pouvait assez facilement faire le lien

Force constante  $\Rightarrow$  accélération constante

qui amenait à associer la force à l'accélération plutôt qu'à la vitesse. Pourtant, personne ne fit cette association et il fallut même attendre deux générations pour qu'on le fasse. Deux obstacles majeurs empêchaient de faire cette association.

- 1) Au 17<sup>e</sup> siècle, on cherchait presque exclusivement l'effet des forces par l'étude des collisions. Ces collisions étant très brèves, il est difficile de connaître l'accélération des objets. Ce sont plutôt les vitesses des objets avant et après la collision qui sont

facilement mesurables. Ainsi, ces études menaient naturellement vers des mesures de changement de vitesses lors de la collision et à une association entre la force et la vitesse (avec  $v$  ou  $v^2$ , vous comprendrez mieux pourquoi quand on étudiera les collisions).

- 2) On ne faisait pas le lien entre l'accélération gravitationnelle constante et la force gravitationnelle constante tout simplement parce que les savants de l'époque ne considéraient pas la gravitation comme une force, mais comme un mouvement naturel régi par d'autres lois.

Pour associer la force à l'accélération, il fallait mettre la gravitation au premier plan et considérer qu'elle était une force comme les autres. C'est ce que semblent avoir fait certains, comme Gassendi et Wallis, mais ils ne font que mentionner l'idée comme une simple possibilité. Huygens avait commencé à développer un peu plus l'association entre la force et l'accélération, mais il n'a jamais terminé ses travaux. Peut-être qu'on parlerait aujourd'hui des lois de Huygens plutôt que des lois de Newton s'il avait terminé son ouvrage (c'est peut-être une bonne chose que ces lois portent le nom de Newton parce que c'est assez difficile de prononcer le nom de Huygens correctement).

C'est Isaac Newton qui développa l'association entre la force et l'accélération le premier. Des discussions avec d'autres savants anglais, dont Robert Hooke et Edmund Halley, l'avaient amené à étudier les orbites des planètes. Or, ces mouvements sont régis uniquement par la force de gravitation entre les planètes et le Soleil. Ainsi, Newton mettait la gravitation au premier plan et il arriva tout naturellement à la conclusion que tout était beaucoup plus simple si la force était reliée à l'accélération. Avec une telle association entre la force et l'accélération, on a les éléments suivants.

### L'effet d'une force selon Newton

$a = 0$  si  $F = 0$   
 $a = \text{constante}$  si  $F = \text{constante}$   
Si  $F$  augmente, alors  $a$  augmente

Newton tira alors des conclusions importantes qui devinrent les lois de Newton.

## 2.3 LA PREMIÈRE LOI DE NEWTON

Commençons par examiner ce qui se produit en l'absence de force si on associe la force à l'accélération. Dans ce cas, une force nulle signifie que l'accélération est nulle, ce qui signifie que la vitesse est constante. C'est la conclusion à laquelle arriva Newton.

### Première Loi de Newton ou loi de l'inertie

Si la force externe nette sur un objet est nulle alors  
la vitesse de l'objet est constante (grandeur et direction)

La force qui s'exerce sur l'objet doit être faite par un autre objet, d'où le nom de *force externe*. La force ne peut pas provenir de l'objet lui-même (comme c'était le cas pour la force imprégnée). L'objet ne peut donc modifier lui-même son mouvement. C'est ce qu'on veut dire par inertie, d'où l'autre nom de *loi de l'inertie* donné à la cette loi.

Newton révolutionnait véritablement la physique avec cette loi qui est l'affirmation même de l'association entre la force et l'accélération. Pour bien illustrer ce point, reprenons le problème de la rondelle qui glisse. Voici ce qui se passe selon Newton. Quand on pousse la rondelle avec le bâton, on exerce une force qui fait accélérer la rondelle. La rondelle, initialement au repos, prend donc de la vitesse pendant qu'elle est poussée par le bâton. Quand le contact entre le bâton et la rondelle cesse, il n'y a plus de force sur la rondelle et elle n'accélère plus. Elle continue donc sa glissade à vitesse constante (s'il n'y a pas de friction). Selon les lois de Newton, il est donc tout à fait normal que la rondelle continue son mouvement. Il n'est plus nécessaire d'invoquer un mouvement d'air ou une force imprégnée pour que la rondelle puisse se déplacer. La principale difficulté de la mécanique prénewtonienne disparaissait d'un seul coup. Par cette seule loi, Newton signait l'arrêt de mort de toutes les théories de la force imprégnée développées à grand-peine durant les deux millénaires précédents.

On peut illustrer l'inertie des corps à l'aide de quelques démonstrations. Commençons par montrer que les objets en mouvement continuent à la même vitesse en l'absence de force en examinant ce qui se produit lors d'un accident de voiture. Quand la voiture se déplace à vitesse constante, il n'y a pas de force nette sur vous. Il n'est pas nécessaire qu'une force vous pousse pour que vous puissiez avancer. D'ailleurs, vous ne sentez pas qu'une force vous pousse quand vous avancez en voiture à vitesse constante. Les forces exercées par le siège (qui sont là pour annuler la gravitation) sont exactement les mêmes que quand la voiture est arrêtée, la sensation est exactement la même. Vous sentez des forces supplémentaires uniquement quand la vitesse de l'automobile change. Dans ce cas, il faut qu'il y ait des forces sur vous pour que vous puissiez accélérer avec votre auto. Voyons maintenant ce qui arrive si vous foncez dans un mur sans porter une ceinture de sécurité. Dès que l'auto entre en contact avec le mur, une force s'exerce sur l'auto pour la ralentir. Si vous n'avez pas de ceinture de sécurité, vous n'avez rien qui vous retient au siège et aucune force ne peut s'exercer sur vous. Vous continuez donc votre mouvement à vitesse constante pendant que l'auto s'arrête. Résultat : vous foncez dans le volant et le pare-brise. Regardez bien la personne continuer avec sa vitesse originale pendant la collision dans ce vidéo (première moitié du vidéo).

<http://www.youtube.com/watch?v=d7iYZPp2zYY>

(Petite note de sécurité routière : sans ceinture, le passager de la voiture s'arrête sur le volant et le pare-brise sur une distance d'arrêt de seulement quelques centimètres. Avec cette distance d'arrêt si petite, l'accélération est immense, ce qui implique que les forces qui s'exercent sur le passager le sont aussi. Ces énormes forces agissant sur un corps humain font alors beaucoup de dégâts. Avec une ceinture de sécurité (ou un coussin gonflable), il y a maintenant quelque chose qui empêche le passager de continuer son mouvement. Le passager reste alors en place sur son siège et s'arrête avec la même

accélération que l'habitacle de la voiture. Selon les lois de la cinématique, plus la distance d'arrêt sera grande, plus l'accélération sera petite. On doit donc augmenter au maximum la distance d'arrêt de l'habitacle pour diminuer l'accélération. Pour y arriver, le devant de la voiture doit pouvoir s'écraser au maximum, sans provoquer une déformation de l'habitacle. Le vidéo suivant montre que l'habitacle des voitures de 2009 se déforme beaucoup moins que les habitacles des voitures de 1959.

<http://www.youtube.com/watch?v=fPF4fBGNK0U&NR>)

Reste qu'il est assez facile de trouver des erreurs commises encore de nos jours dans lesquelles la première loi de Newton n'est pas respectée et où on fait toujours appel aux théories associant la force à la vitesse. On retrouve souvent ces erreurs dans les films de science-fiction. Dans l'espace, il n'y a pas de friction et, s'il n'y a pas de planète ou d'étoile tout près pour faire une force de gravitation, la seule force s'exerçant sur le vaisseau est celle du moteur. On voit parfois une scène dans laquelle le moteur se brise et le vaisseau s'arrête. C'est bien sûr une erreur de physique puisque si le moteur arrête, il n'y a plus de force et ainsi, le vaisseau devrait continuer à vitesse constante ! D'ailleurs, pourquoi avait-on besoin de faire fonctionner le moteur ? On n'avait qu'à le faire fonctionner au départ pour donner une vitesse au vaisseau, laisser ensuite le vaisseau aller à vitesse constante sans moteurs pour finalement arrêter le vaisseau en utilisant un moteur qui va ralentir le vaisseau. C'est d'ailleurs comme ça, en gros, qu'on a procédé pour envoyer des astronautes sur la Lune. Si on laisse fonctionner le moteur du vaisseau tout le temps, le vaisseau va accélérer sans cesse. On peut bien le faire, mais le vaisseau va aller pas mal vite à l'arrivée et il ne pourra pas s'arrêter facilement. Si le voyage a duré deux semaines, on ne pourra pas accélérer pendant deux semaines et ralentir en deux minutes ; imaginer l'accélération que ça prendrait ! Si on veut absolument utiliser le moteur, il faudrait plutôt accélérer pendant une semaine et ensuite ralentir pendant une semaine.

Il y a également une grosse erreur de première loi de Newton dans cette scène de *Gravity*

<http://physique.merici.ca/mecanique/Gravity.wmv>

Tout va bien pour les 39 premières secondes de la cet extrait. C'est alors que les choses se gâtent. Une fois que George Clooney tient le bout de la corde, il a une vitesse constante (qui est la même que celle de Sandra Bullock). À partir de ce moment, il y a de gros problèmes de première loi de Newton. Dans le film, George doit tenir continuellement la corde pour maintenir sa vitesse. En réalité, la corde n'est pas utile puisqu'une fois que George a la même vitesse que Sandra, aucune force n'est nécessaire pour se déplacer à vitesse constante. Quand George lâche la corde, il devrait continuer toujours à la même vitesse et rester à la même distance de Sandra. Pourtant dans le film, George commence à s'éloigner de Sandra comme s'il fallait une force pour pouvoir continuer à vitesse constante. (S'ils étaient dans l'atmosphère, la scène serait correcte parce que la force faite par la corde devrait être là pour compenser la force de friction de l'air. Mais comme il n'y a pas d'air dans l'espace, cette scène est complètement fausse.)



## 2.4 LA DEUXIÈME LOI DE NEWTON

### L'effet d'une force

On sait que les forces font accélérer les objets, mais quelle est cette accélération au juste ?

Pour le découvrir, commençons par voir ce qui arrive quand on y a une seule force sur un objet en réalisant l'expérience suivante. (En passant, Newton n'a pas fait d'expérience de ce genre. Il obtint cette formule en tenant pour acquis que les objets en chute libre ont tous la même accélération.) On attache trois ressorts identiques à trois objets de masse différente (1 kg, 2 kg, 3 kg). On tire alors sur chacun des ressorts de telle sorte que l'allongement du ressort soit le même dans les trois cas. On s'assure ainsi que la force exercée par le ressort est la même puisque l'allongement du ressort dépend de la force exercée. On a donc

$$F = \text{constante}_1$$

On mesure ensuite l'accélération et on obtient les valeurs indiquées sur la figure. On remarque alors que le produit de la masse et de l'accélération ( $ma$ ) est une constante

$$ma = \text{constante}_2$$

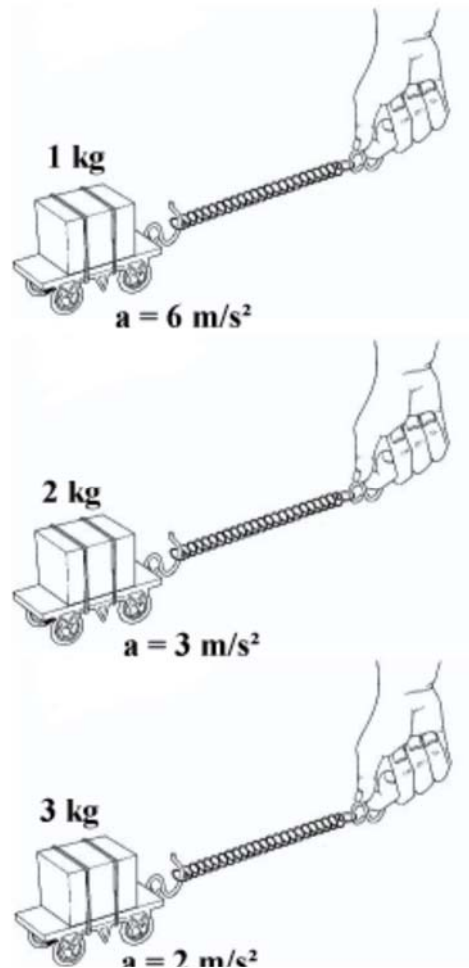
À partir de ces informations, on a

$$\frac{F}{ma} = \frac{\text{constante}_1}{\text{constante}_2}$$

$$\frac{F}{ma} = \text{constante}$$

La valeur de la constante est tout à fait arbitraire. On peut donc faire le choix le plus simple (constante = 1) pour obtenir

$$F = ma$$



[www.nuffieldfoundation.org/practical-physics/constant-and-varying-forces-between-trucks](http://www.nuffieldfoundation.org/practical-physics/constant-and-varying-forces-between-trucks)



Malgré le choix un peu arbitraire de la constante, il y a deux aspects fondamentaux incontournables de la nature dans cette loi : la force donne une accélération et plus la masse est importante, plus l'accélération sera petite pour une même force.

Ainsi, l'équation précédente est notre véritable définition de la force.

### Définition de la force

Avec une seule force agissant sur un objet, on a le lien suivant entre la force et l'accélération

$$F = ma$$

Pour démontrer ces éléments, on peut regarder, pour commencer, ce vidéo (en anglais) dans lequel on propulse deux balles de masse différente avec deux forces identiques.

<http://www.youtube.com/watch?v=iwP4heWDhvw>

Dans cet autre vidéo, deux objets de masse différente sont poussés par un élastique placé entre les deux. Comme un élastique fait la même force à chaque bout, chaque objet subit la même force. Puisque la masse des objets est différente et que la force est identique, on voit que le chariot le plus lourd a une accélération plus petite. (Le vidéo s'appelle Newton's third law, mais c'est plus une démonstration de la deuxième loi...)

<http://www.youtube.com/watch?v=D4j5bcaV2Ws>

On pourrait même calculer l'accélération des objets et montrer qu'elle est inversement proportionnelle à la masse comme le prévoit la deuxième loi de Newton.



[www.sophia.org/tutorials/newtons-2nd-law-of-motion-the-mathematical-law](http://www.sophia.org/tutorials/newtons-2nd-law-of-motion-the-mathematical-law)

## La deuxième loi de Newton

Avec plusieurs forces qui agissent sur un objet, on peut connaître l'accélération de l'objet à partir de la force nette agissant sur ce dernier avec

### Deuxième loi de Newton

$$F_{\text{nette}} = ma$$

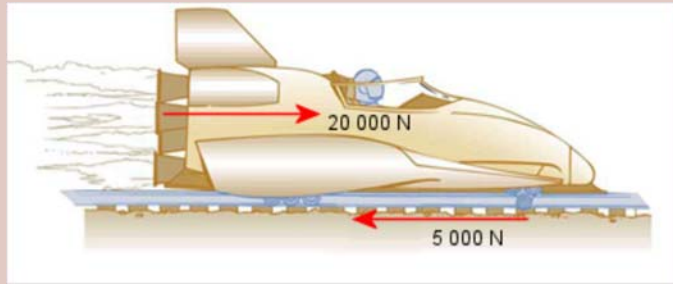
Quand il y a des forces horizontales et verticales, cette équation devient plutôt

### Deuxième loi de Newton

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y$$

### Exemple 2.4.1

Les moteurs d'une fusée de 500 kg roulant sur des rails font une force de 20 000 N. La force de friction s'opposant au mouvement de la fusée est de 5000 N. Quelle est l'accélération de la fusée ?



[cnx.org/content/m42073/latest/?collection=col11406/latest](https://cnx.org/content/m42073/latest/?collection=col11406/latest)

Comme il n'y a que des forces horizontales, on n'a pas besoin de s'occuper des forces verticales. La force nette est

$$\sum F_x = 20000N + (-5000N) = 15000N$$

L'accélération de la fusée est donc

$$\begin{aligned} \sum F_x &= ma_x \\ 15000N &= 500kg \times a_x \\ a_x &= 30 \frac{m}{s^2} \end{aligned}$$

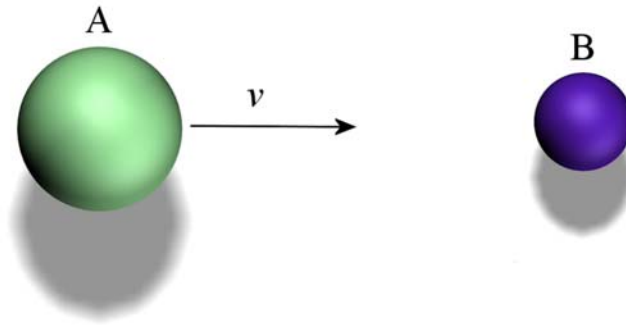
Cette accélération signifie que la vitesse de la fusée augmente de 30 m/s (108 km/h) chaque seconde.

## 2.5 LA TROISIÈME LOI DE NEWTON

### Les forces viennent par paire de même grandeur

Au 17<sup>e</sup> siècle, on pensait trouver les lois de la dynamique par l'étude des collisions. Ces études ne permirent pas de découvrir que la force est associée à l'accélération, mais elles permirent d'obtenir les lois des collisions. Ces lois permettent de trouver les vitesses des objets après la collision à partir des masses des objets et des vitesses avant la collision. Ces lois allaient aussi permettre à Newton de découvrir une propriété importante des forces.

Imaginons qu'une balle A se dirige vers une balle B immobile.



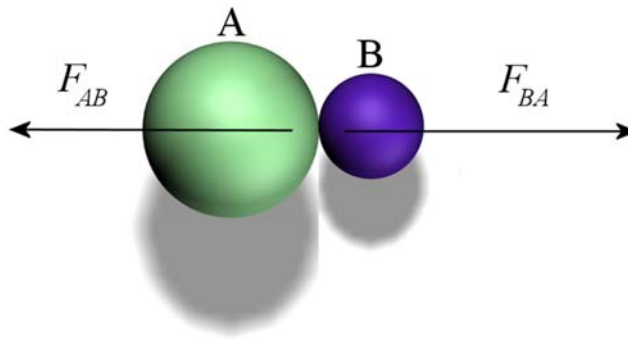
[www.youtube.com/watch?v=yRj\\_7CO38GA](http://www.youtube.com/watch?v=yRj_7CO38GA)

Après la collision, la balle B se dirige vers la droite alors que la balle A a perdu de la vitesse.

Si la balle B a maintenant une vitesse vers la droite, c'est qu'elle a eu une accélération vers la droite et donc qu'elle a subite une force vers la droite.

Si la balle A a perdue de la vitesse, c'est qu'il y a eu une accélération dans le sens contraire de la vitesse, donc vers la gauche. Il y a donc eu une force vers la gauche lors de la collision.

Il y a donc eu les forces suivantes lors de la collision



[www.youtube.com/watch?v=yRj\\_7CO38GA](http://www.youtube.com/watch?v=yRj_7CO38GA)

Il y a une force faite sur la balle A et cette force est faite par la balle B. On notera cette force  $F_{AB}$ , ce qui veut dire la force sur la balle A faite par la balle B. Il y a aussi une force faite sur la balle B faite par la balle A. On notera cette force  $F_{BA}$ , ce qui veut dire la force sur la balle B faite par la balle A. En utilisant la valeur du changement de vitesse donné par les formules des collisions et en sachant que le temps de collision est nécessairement le même pour les deux objets entrant en collision, Newton calcula que, dans toutes les collisions, la grandeur de la force agissant sur chacune des balles est toujours identique et que les directions des forces sont opposées. Comme toutes les forces connues à l'époque, à l'exception de la gravitation, étaient des forces de contact, donc le résultat d'une collision, cela devait être vrai pour toutes ces forces. Et comme c'était aussi vrai pour la force de gravitation (que Newton avait découvert), cette propriété devait être vraie pour toutes les forces.

### Troisième loi de Newton

$$F_{AB} = -F_{BA}$$

On dit alors que ces deux forces sont associées par la troisième loi de Newton. Cette équation est restée vraie même avec la découverte d'autres types de force jusqu'à aujourd'hui. On ne s'attend d'ailleurs pas à ce qu'elle soit prise en défaut, car on montrera plus tard que si elle était fautive, les objets pourraient accélérer d'eux-mêmes sans qu'il y ait de force externe, ce qui serait contraire à ce que dit la première loi de Newton.

Cela signifie aussi que pour chaque force, il y a toujours une autre force opposée qui existe quelque part dans l'univers. Les forces viennent donc toujours par paires. Il est impossible d'avoir une force sans qu'il y ait quelque part une force qui lui est associée par la troisième loi de Newton et qui est de même grandeur et de direction opposée. Il n'y a aucune exception à ce principe.

Cette loi est souvent écrite sous la forme de la loi de l'action et de la réaction : À toute action, il y a une réaction opposée de même grandeur. Je n'aime pas tellement cette forme puisqu'elle laisse penser que les deux forces ne sont pas simultanées, que la réaction se produit un peu après l'action. En réalité, les deux forces associées par la troisième loi de Newton agissent toujours simultanément.

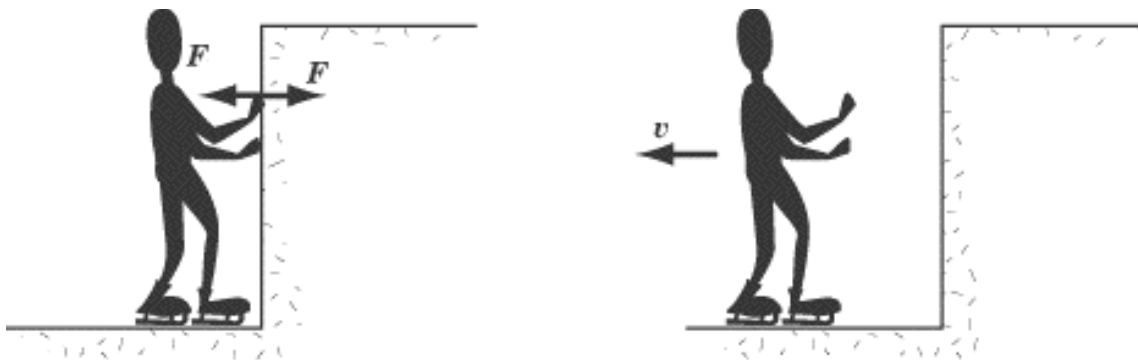
### Démonstration de la loi

Commençons par ce qui a mis Newton sur la piste : une collision. Observez premièrement ce qui se passe dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=T8eLWEeQXkc>

Quand la personne de gauche frappe la personne de droite, celle-ci subit une force vers la droite et lui donne une accélération durant le temps que dure la collision, ce qui finit par lui donner une certaine vitesse. On remarque également que la personne de gauche a également subi une force puisqu'elle a ralenti. Si elle a ralenti, c'est que la force s'oppose à son mouvement et est donc dirigée vers la gauche. On voit donc qu'il y a une force sur chacune des personnes en collision et que ces forces sont dans des directions opposées comme le prévoit la troisième loi de Newton.

Si vous poussez sur un mur, alors le mur pousse sur vous selon la troisième loi de Newton. Pourtant, il ne semble pas y avoir d'effet, car vous n'êtes pas projeté. Ici, c'est moins évident, car la friction avec le sol vous empêche de reculer. Si on élimine la friction, en étant en patin sur de la glace par exemple, l'effet devient plus évident. Si vous poussez sur la bande, vous exercez une force sur la bande et, selon la troisième loi de Newton, la bande fait une force sur vous dans la direction opposée. Cette force vous fait accélérer et vous vous éloignez de la bande.



[www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/physics/chapter6section2.rhtml](http://www.sparknotes.com/testprep/books/sat2/physics/chapter6section2.rhtml)

Vous pouvez voir une démonstration de cela (avec un skateboard) dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=Em0R896soTA>

La troisième loi de Newton explique également ce qui se passe dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=pyVTNyzQ1bl>

(Daryl est sur la chaise de gauche et Raphael est sur la chaise de droite.)

Quand Daryl pousse sur la chaise de Raphael, les deux chaises accélèrent. La chaise de Raphael accélère puisque Daryl a exercé une force sur cette chaise. La chaise de Daryl a aussi accéléré puisque, selon la troisième loi de Newton, la chaise de Raphael a exercé une force vers la gauche sur Daryl quand Daryl a exercé une force vers la droite sur la chaise de Raphael. C'est cette force qui a propulsé la chaise de Daryl vers la gauche.

Si, tout comme moi, vous avez été impliqué dans une bataille au secondaire et que vous ne saviez pas vous battre, vous pouvez vous reconforter en vous disant que vous avez donné de grands coups de face sur le poing de votre adversaire (mes salutations ici à Michel Gouin). En effet, chaque fois que votre adversaire vous donne un coup de poing et exerce ainsi une force sur votre face, votre face exerce exactement la même force sur le poing de votre adversaire. Pauvre petit poing ! Vous pouvez admirer cette douleur au poing dans ce vidéo très édifiant.

<http://www.youtube.com/watch?v=crdbnEMCt58>

Les exemples précédents nous montrent qu'il y a bien deux forces, mais il est plutôt difficile de dire si les deux forces ont la même grandeur. Dans le vidéo qui suit, on pourra s'en convaincre. Vous pouvez admirer de nombreuses collisions entre deux chariots de différentes masses. Encore une fois, quand un chariot A exerce une force sur le chariot B lors de la collision, alors le chariot B exerce une force sur le chariot A dans la direction opposée. Les deux chariots subissent donc une force. Ce qui rend ce vidéo intéressant, c'est la présence d'un anneau, en face des chariots, qui se déforme sous l'effet des forces. Plus la force sur le chariot est grande, plus l'anneau se déforme. On remarque alors que lors des collisions, la déformation des anneaux des deux chariots est identique, ce qui montre que la force sur chacun des chariots est identique comme le prévoit la troisième loi de Newton.

<http://www.youtube.com/watch?v=KB3Y-pSGHos>

Les premiers astronautes ont eu beaucoup de difficultés à travailler dans l'espace à cause de la troisième loi de Newton. Par exemple, chaque fois qu'un l'astronaute forçait pour visser une vis, il y avait une force sur l'astronaute qui le faisait tourner dans l'autre sens, ce qui compliquait drôlement cette tâche. Ce documentaire (en anglais) vous renseignera davantage à ce sujet.

<http://www.youtube.com/watch?v=PrJnWTcW55s>

Même si on vous a dit que les forces sont les mêmes quand deux objets entrent en collision, plusieurs diraient que dans une collision entre un camion et une petite voiture, la voiture subit une force plus grande que le camion. On dirait bien sur ce vidéo que la petite voiture subit une plus grande force que la voiture plus grande.

<http://www.youtube.com/watch?v=JN11NU1P18>

Il ne faut pas confondre la force avec l'effet qu'aura cette force. La force est la même sur les deux voitures, mais l'accélération ne sera pas la même. Selon  $F = ma$ , la voiture la moins massive subira l'accélération la plus grande. Les occupants de cette voiture seront donc plus affectés que ceux de la voiture plus lourde. Dans une collision entre un camion et une petite voiture, les deux véhicules subissent la même force, mais l'accélération de la voiture sera immense alors que celle du camion sera petite. La vitesse de l'auto change alors énormément et celle du camion change peu.

## Erreur dans des films

On voit parfois dans des dessins animés que les personnages tentent de faire avancer un voilier plus vite en soufflant dans les voiles. Cette idée ne peut fonctionner à cause de la troisième loi de Newton. Supposons qu'un ventilateur souffle dans la voile. Il est vrai alors que l'air exerce une force sur la voile vers l'avant du voilier ce qui le ferait avancer. Mais il y a un problème. Si le ventilateur fait une force sur l'air vers l'avant du voilier, alors l'air fait une force sur le ventilateur vers l'arrière du voilier, ce qui pousse le voilier vers l'arrière. Cette force vient annuler la force vers l'avant fait par l'air sur la voile (en supposant que la voile est efficace à 100 %). On peut voir la démonstration de cela sur le vidéo suivant.

<http://www.youtube.com/watch?v=8HoQH0nAiHs>

[www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/miscon.htm](http://www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/miscon.htm)



Au départ, un petit morceau de carton joue le rôle de la voile et on remarque que le petit véhicule ne bouge pas puisque la force sur le ventilateur annule la force sur le carton. Quand on enlève le carton, il ne reste plus que la force sur le ventilateur vers l'arrière et le véhicule se met à accélérer vers l'arrière. Morale de l'histoire : plutôt que d'envoyer l'air dans la voile, les navigateurs seraient mieux de prendre le ventilateur pour propulser l'air vers l'arrière du voilier pour que celui-ci subisse une force vers l'avant. C'est d'ailleurs le principe de fonctionnement du type de bateau présenté dans ce vidéo.

<http://www.youtube.com/watch?v=abLcIiyXBPs>

La « force » dans les films de Star Wars ne semble pas respecter la troisième loi de Newton. Quand le comte Dooku utilise la force pour pousser Obiwan dans un combat, il devrait aussi y avoir une force faite par Obiwan sur Dooku selon la troisième loi de Newton, ce qui ne semble pas se produire.

<http://www.youtube.com/watch?v=kmIkpRkgaZk>

Mais comme cette force n'existe pas vraiment, c'est peut-être pardonnable.

## Comment trouver les deux forces associées par la troisième loi de Newton

Si les forces viennent par paires associées par la troisième loi de Newton, comment peut-on trouver quelle force on doit associer à une autre ? Voici le truc, illustré par un exemple. Supposons que nous ayons la force suivante

La Terre exerce une force de gravité sur la Lune.

Pour trouver la force associée, il suffit d'inverser les deux objets (Terre et Lune) dans la phrase.

La Lune exerce une force de gravité sur la Terre.

Ce sont les deux forces associées par la troisième loi de Newton. Deux remarques s'imposent

- 1) Les deux forces sont du même type. Ici, c'était des forces de gravitation. On ne pourrait pas associer deux forces de type différent comme la gravitation et la force exercée par un ressort par exemple.
- 2) Les deux forces ne s'appliquent pas sur le même objet. Ce qui amène la mise en garde suivante.



**Erreur fréquente : Des forces associées par la troisième loi de Newton s'appliquent sur le même objet.**

Cela ne peut jamais se produire. Si l'objet A exerce une force **sur l'objet B**, alors l'objet B exerce une force **sur l'objet A**. Vous voyez que les deux forces sont sur des objets différents.

Cette confusion amène parfois le paradoxe suivant : comment le mouvement peut-il exister si la troisième loi de Newton est vraie ? En effet, si pour chaque force il y a une force opposée de même grandeur, la somme des forces serait toujours nulle. Si je pousse une charrette avec une force de 50 N et qu'il y a une autre force de 50 N dans la direction

opposée, la somme est nulle et la charrette ne pourra pas accélérer ! Ce raisonnement n'est pas correct, car il faut considérer sur quel objet la force s'applique. Si je pousse sur une charrette avec une force de 50 N, alors la charrette exerce une force de 50 N sur moi. Ce qui importe pour l'accélération de la charrette, ce sont les forces qui s'appliquent sur la charrette seulement. La deuxième force de 50 N s'appliquant sur moi, elle ne compte pas pour calculer l'accélération de la charrette.

## RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

### Force nette ou force résultante

$$F_{nette} = \sum F$$

### Première Loi de Newton ou loi de l'inertie

Si la force externe nette sur un objet est nulle alors  
la vitesse de l'objet est constante (grandeur et direction)

### Deuxième loi de Newton en composantes

$$\sum F_x = ma_x \qquad \sum F_y = ma_y$$

### Troisième loi de Newton

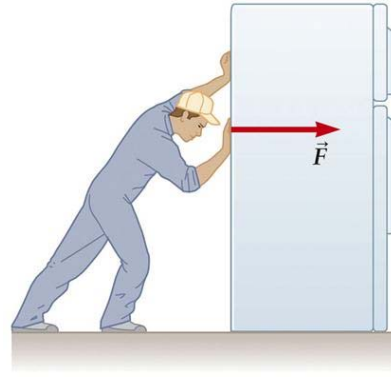
$$F_{AB} = -F_{BA}$$



## EXERCICES

### 2.4 La deuxième loi de Newton

1. Rajiv pousse sur un réfrigérateur de 80 kg avec une force de 120 N. En supposant qu'il n'y a pas de force de friction entre le réfrigérateur et le plancher, Quelle est l'accélération du réfrigérateur ?

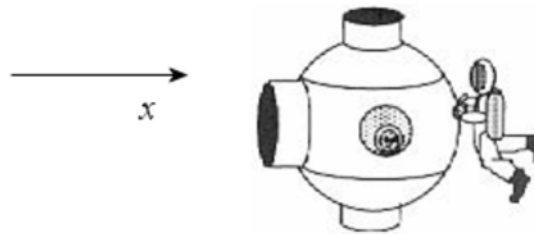


[www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-shown-pushing-refrigerator-sits-level-floor-assume-floor-slippery-horizontal-force--q1442657](http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/person-shown-pushing-refrigerator-sits-level-floor-assume-floor-slippery-horizontal-force--q1442657)

2. Un F-18 a une masse de 23 500 kg au décollage. Il y a deux moteurs qui, à pleine puissance, fournissent 48,9 kN chacun. Quelle est l'accélération du F-18?

### 2.5 La troisième loi de Newton

3. Un astronaute de 100 kg pousse son vaisseau spatial de 2500 kg avec une force de 200 N. Initialement, le vaisseau et l'astronaute sont au repos.



[www.ahsd.org/science/stroyan/hphys/CH4/ch4wq/p2ch4wq3.htm](http://www.ahsd.org/science/stroyan/hphys/CH4/ch4wq/p2ch4wq3.htm)

- a) Quelle est l'accélération du vaisseau pendant la poussée ?
- b) Quelle est l'accélération de l'astronaute pendant la poussée ?

## RÉPONSES

### 2.4 La deuxième loi de Newton

1.  $1,5 \text{ m/s}^2$
2.  $4,162 \text{ m/s}^2$

### 2.5 La troisième loi de Newton

3. a)  $0,08 \text{ m/s}^2$  vers la gauche    b)  $2 \text{ m/s}^2$  vers la droite